



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA, BIOTECNOLOGÍA Y MATERIALES

DISEÑO A ESCALA LOCAL: EQUIPO DOMICILIARIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL QUÍMICA

JENNY SUE SCARLETTE MIRANDA PÉREZ

PROFESOR GUÍA:

FELIPE DÍAZ ALVARADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:

VALERIA PROBOSTE SOBARZO

FRANCISCO GRACIA CAROCA

SANTIAGO DE CHILE

2018

DISEÑO A ESCALA LOCAL: EQUIPO DOMICILIARIO PARA EL APROVECHAMIENTO DE RESIDUOS

Esta memoria ha sido concebida como una guía educativa para que cualquier persona interesada en el diseño, iniciada o no en el tema, pueda comprender el diseño y su proceso creativo, desde la ciencia aplicada, la sustentabilidad y la innovación.

Los residuos sólidos son objetos que han perdido su utilidad y que son descartados. Durante siglos de desarrollo humano han sido acumulados y, actualmente, la mayor parte es dispuesta en rellenos sanitarios generando impactos negativos en el planeta. En Chile, los residuos están concentrados en la Región Metropolitana (RM), con un 43% del total nacional. A fin de aportar en la solución del problema, se propone concebir y diseñar un equipo que aproveche residuos a nivel domiciliario y se adapte a usuarios en diferentes contextos de la RM, utilizando las herramientas de diseño Upcycle y TRIZ, que permiten integrar la sustentabilidad e innovación en el diseño, respectivamente.

Con la meta de crear el equipo, se compuso una metodología dividida en: definición del problema, resolución del problema y cierre de la solución, integrando los pasos propuestos por Upcycle y TRIZ.

Definición del problema: a partir de una encuesta, se determinó que el flujo promedio de residuos generados en una vivienda de la RM es de $1,6 [kg/día]$, compuesto por: plásticos (5,5%), orgánicos (46,6%), vidrios (20,9%), papeles y cartones (5,7%), metales (4,9%) y otros (16,5%). También de la encuesta y de un estudio bibliográfico, se definieron las características físicas y sociales de los domicilios; con ellas se decidieron las características deseadas para el equipo, destacando su instalación en cualquier vivienda de la RM, tratamiento de un tipo de residuo y operación manual. Considerando los impactos asociados a los tipos de residuos y sus posibles tratamientos, se decidió que el equipo trataría residuos orgánicos mediante digestión anaeróbica, produciendo biogás para cocinar, con un caso base de $0,6 [kg/día]$. Un estudio de antecedentes permitió definir las etapas necesarias para el proceso y sus condiciones, y otorgó ideas iniciales para configurar el equipo.

Resolución del problema: considerando las etapas del proceso, se determinó que el equipo debe realizar 12 operaciones unitarias, de las cuales se dimensionaron 8, obteniéndose un volumen total de $1.040 [l]$. Se realizó el diseño de las partes del equipo, es decir, se definió cómo llevar a cabo las operaciones unitarias, incluyendo aislación y suministros de calor requeridos. Se obtuvo un volumen final de $1.331 [l]$, donde el 75% corresponde al almacenamiento de biogás. El equipo genera un flujo promedio de $98 [l_{biogás}/día]$, con un rendimiento de $163 [l_{biogás}/kg_{residuos}]$.

Se resolvió un equipo compuesto por dos secciones: la sección 1 recibe los residuos orgánicos, procesa el sustrato, limpia el biogás obtenido y almacena digestato (subproducto), y tiene una configuración de prisma hexagonal; la sección 2 almacena biogás, y tiene 4 módulos para ser distribuidos espacialmente de diferentes maneras y adaptarse al espacio disponible.

Cierre de la solución: se concluyó que todas las características deseadas fueron cumplidas por el diseño propuesto, mas su tamaño es excesivo para adaptarse a todas las viviendas de la RM. Ahora bien, el diseño logrado se considera completo, bien sostenido y satisfactorio.

Respecto a las metodologías de diseño TRIZ y Upcycle, se concluyó que ambas son generales y poco estructuradas, y deben ser mejoradas para ser aplicadas en la ingeniería de procesos.

DEDICATORIA

A mi mamá y papá, Jenny y Luis, por su apoyo incondicional durante toda mi vida, por su silenciosa preocupación y comprensión, por su amor infinito. De ustedes he aprendido la constancia, el esfuerzo, la responsabilidad, la excelencia... y tantas otras características que me hacen orgullosa de ser quien soy. Soy tremendamente afortunada de que ustedes sean mis padres, los respeto y admiro profundamente. Espero poder construir una familia tan linda como la que ustedes me han brindado.

A Jorge, mi pareja de hace tantos años. Eres un sol en mi vida, y también una luna. Cuando nos conocimos éramos prácticamente unos niños, y hoy como adultos, te sigo amando como una niña. Agradezco tu cariño y apoyo en este viaje, me has ayudado a ser fuerte y también a ser frágil, a ser yo en paz. Lo nuestro es la aventura más exquisita que puedo imaginar, y sabes que puedo imaginar cosas inusuales. Aún nos queda mucho por descubrir juntos, y eso me hace ¡tan feliz!

A la señora Eli, a los niños y toda la familia, que me han recibido con los brazos abiertos y hecho de su casa un hogar para mí, habiéndome yo llegado como una extraña. De ustedes he entendido y querido la grandiosidad de lo sencillo y la calma.

A mi familia, a mis antepasados, a mis abuelos. Quisiera ser una integrante digna de la familia que han levantado. Sus luchas han hecho que estemos donde estamos y, así como las tuyas, espero que mis luchas sean significativas para el futuro. Siento la responsabilidad de responder a sus esfuerzos y hacer lo mejor que pueda con mi vida.

A mis hermanitas, Evelyn y María. Siendo las tres tan distintas, nos entendemos, nos queremos y somos cómplices. Les agradezco cuidarme siempre e integrarme a la familia. Atesoro nuestras vivencias de la infancia, nuestros juegos y tonteras. Las admiro porque son mujeres fuertes e inteligentes. A sus parejas, porque las hacen felices, las quieren y son buenos casi-hermanos.

Al Alonso y a la Dana, las personas más pequeñas de la familia y las más intensas. ¡Cuánto amor pueden entregar! ¡Cuánta inocencia y transparencia! Sus nacimientos le dieron una vuelta a mi vida. Simplemente conocerlos me hace una persona más feliz, y con más ánimo de ser más noble, como ustedes.

A la Pepa, mi gata. Siempre conmigo, la mejor compañera de la introspección. Tenemos un lenguaje secreto que solo conocemos nosotras y un cariño tan especial que no sé describir. Tú eres parte de la naturaleza, me conectas con el resto de los seres vivos y me haces quererlos.

A Felipe, mi profesor guía y un buen amigo. Me has enseñado y señalado muchas cosas nuevas, me dejaste conocer tus pensamientos sobre el mundo y lo que se supone que hacemos en la universidad. Gracias a las conversaciones y discusiones que tuvimos, hoy puedo entender mejor qué es lo que quisiera hacer con mi vida y a qué dedicarles mis esfuerzos. Valoro el espacio que has abierto para que yo pueda crecer como profesional. Eres un buen maestro.

A la profe Andrea, una gran compañera. Fue en su curso de Liderazgo y Trabajo en Equipo donde al fin, por primera vez en la universidad, tuve tiempo para pensar en calma, para mirar lo que yo estaba haciendo y darle a mis sentimientos e intuiciones la importancia que merecen. Aprecio mucho la

oportunidad de trabajar con usted. Y me parece que todo lo que he aprendido no se borrará de mi historia.

Agradezco a esos profesores que marcaron mi vida universitaria, cuyos pensamientos y amor por su trabajo hicieron que viera la realidad con otros ojos. Nutro mi trabajo con lo que aprendí de ustedes, y eso le ha dado tanto sentido. Al profesor Enrique Solanich que me enseñó sobre historia del arte y mucho más, al profesor Alfredo Jocelyn-Holt que me enseñó sobre historia de Chile y mucho más, al profesor Nicolás Gómez que me enseñó sobre socioeconomía latinoamericana y mucho más y, por supuesto, a la profesora Andrea y Felipe.

A Qhantir, mi primer gran equipo de trabajo. Son personas increíbles. Juntos aprendimos muchas cosas, y yo personalmente crecí bastante. Siempre serán mi referencia de qué es hacer un buen trabajo y de lo que es un buen grupo, un grupo sano y cariñoso. Los llevo en mi corazón.

A la Valentina, que es una mujer potente e increíble. Eres tan inteligente y buena, siempre das lo mejor de ti. Realmente mereces lo mejor de la vida. Gracias por brindarme tu amistad, te quiero mucho.

A Physis, mis pequeños. Les agradezco habernos dejado, a Felipe y a mí, guiarlos en algo desconocido: el diseño. Me permitieron aprender más de este tema y también lo que significa hacer docencia con cariño. Me sorprende su complejidad e inteligencia, y me siento honrada de que confíen en mí. Estar con ustedes es un recreo.

A la comunidad de IQBT, que es tan fraternal. Conocí muchas lindas personas, que me ayudaron sin ni siquiera conocerlos tan bien, sin pedir nada a cambio. Espero que ese espíritu nunca se pierda.

Al consejo: al Cris, a la Vicky, al Sergio y al Jorge, los primeros amigos que tuve al entrar a la especialidad. Esforzándonos codo a codo, y riéndonos también. Para cada uno deseo lo mejor, y que puedan cumplir sus sueños. En particular, te agradezco Jorge tu amistad, has sido mi mejor amigo y mi confidente por un largo tiempo. La hemos pasado muy bien juntos y también hemos enfrentado dificultades, y espero que las enseñanzas que hemos sacado de ellas nos sirvan para el futuro. Sabes que te quiero.

A mis equipos docentes, donde he podido aprender lo que es educar. A mis compañeros en la batalla de llevar un curso. Y también a los estudiantes, que me han dado la oportunidad de aportar en su formación, y han sido comprensivos conmigo por mi poca experiencia. Prometo seguir esforzándome.

¡Gracias!

AGRADECIMIENTOS

A Felipe Díaz, por las eternas discusiones sobre diseño, ética profesional y tantos otros. Por tus consejos y apoyo inagotable en este trabajo y los anteriores. También, por compartir tus experiencias de la industria y liderando equipos, para mejorar mi labor profesional.

A Valeria Proboste, por entregarme tu opinión y criticar mi trabajo, desde el punto de vista industrial y desde tus propias inquietudes intelectuales. Agradezco, además, la retroalimentación realizada a mi desempeño durante mi formación profesional.

Al profesor Francisco Gracia, por abrirme las puertas de su oficina y por el tiempo dedicado a este trabajo y mi formación durante estos años.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1	Introducción	1
1.1	Los Residuos	1
1.2	Los Residuos en Chile	7
1.3	Diseño	11
1.4	Objetivos	15
Capítulo 2	Metodología	17
2.1	Metodología Upcycle	17
2.2	Metodología TRIZ	18
2.3	Metodología de Trabajo	23
PARTE I	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	25
Capítulo 3	Análisis del Contexto	26
3.1	Análisis Base	26
3.2	Análisis Complementario	37
3.3	Reflexiones Finales sobre el Análisis del Contexto	50
Capítulo 4	Características del Equipo	52
4.1	Resultado Ideal	52
4.2	Restricciones y Recursos	53
4.3	Idealidad Tolerable	58
4.4	Reflexiones Finales sobre las Características del Equipo	59
Capítulo 5	Elección de Residuo y Caso Base	60
5.1	Elección de Residuo	60
5.2	Caso Base	70
5.3	Reflexiones Finales sobre la Elección de Residuo y Caso Base	75
Capítulo 6	Beneficio Principal	76
6.1	Productos y Procesos	76
6.2	Criterios de Selección	82
6.3	Reflexiones Finales sobre el Beneficio Principal	88
Capítulo 7	Fundamentos	89
7.1	Fundamentos Físicoquímicos y Biológicos	89
7.2	Cinética del Proceso	114
7.3	Reflexiones Finales sobre los Fundamentos	119

Capítulo 8	Estado del Arte.....	120
8.1	Sistemas de Digestión Anaeróbica.....	120
8.2	Almacenamiento de Gas.....	126
8.3	Reflexiones Finales sobre el Estado del Arte.....	128
PARTE II	RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA.....	131
Capítulo 9	Objetivos, Estrategias y Tácticas.....	132
9.1	Paso 2: Definir Valores Humanos.....	132
9.2	Paso 3: Integrar los Principios de Hannover.....	132
9.3	Paso 4: Definir Objetivos.....	133
9.4	Paso 5: Decidir Estrategias.....	134
9.5	Paso 6: Decidir Tácticas.....	134
Capítulo 10	Operaciones Unitarias y Límite de Batería.....	135
10.1	Decisiones Generales.....	135
10.2	Operaciones Unitarias.....	138
10.3	Reflexiones Finales sobre las Operaciones Unitarias y Límite de Batería.....	142
Capítulo 11	Dimensionamiento.....	143
11.1	Dimensionamiento de Equipos.....	143
11.2	Características del Biogás Obtenido.....	192
11.3	Reflexiones Finales sobre el Dimensionamiento.....	192
Capítulo 12	Diseño.....	194
12.1	Características Mínimas del Equipo.....	194
12.2	Ideas Centrales.....	195
12.3	Molino.....	199
12.4	Depósito de Alimentación.....	199
12.5	Reactor de Digestión Anaeróbica.....	206
12.6	Adsorbedor.....	215
12.7	Depósito de Biogás.....	217
12.8	Combustión.....	220
12.9	Inspección y Separación.....	221
12.10	Depósito de Digestato.....	221
12.11	Medidas para los Requerimientos Térmicos.....	222
12.12	Configuración Final del Equipo.....	223

12.13	Reflexiones Finales sobre el Diseño	233
PARTE III	CIERRE DE LA SOLUCIÓN	237
Capítulo 13	Reflexiones sobre el Proceso Creativo.....	238
Capítulo 14	Conclusiones Generales	240
	Bibliografía	244
Anexo A	Documentos utilizados en la encuesta	249
Anexo B	Análisis de la muestra para encuesta	266
Anexo C	Resultados completos de la encuesta.....	266
Anexo D	Cálculos sobre la elección del residuo	267
Anexo E	Compostaje	267
Anexo F	Resultados de la dosificación de residuos	304
Anexo G	Cálculos: dimensionamiento conminución	304
Anexo H	Cálculos: dimensionamiento almacenamiento y mezcla de residuos	305
Anexo I	Código Modelo 1.....	305
Anexo J	Código ajuste de parámetros.....	322
Anexo K	Cálculos: dimensionamiento digestión	329
Anexo L	Definición de rendimiento en el sistema	330
Anexo M	Equilibrio gas-líquido de salida del reactor.....	331
Anexo N	Código Modelo 3.....	333
Anexo O	Cálculos: dimensionamiento adsorción	347
Anexo P	Cálculos: dimensionamiento almacenamiento de biogás	347
Anexo Q	Cálculos: dimensionamiento almacenamiento digestato	347
Anexo R	Cálculos de las características del biogás generado	347
Anexo S	Código Modelo 2.....	347
Anexo T	Cálculos para determinar el caso base	359
Anexo U	Cálculo columna de digestato del sifón	359
Anexo V	Cálculos de los requerimientos térmicos.....	359
Anexo W	Cálculos de volúmenes y formas de componentes	360

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los residuos constituyen un problema a nivel social, ambiental y económico, y se suele pensar que su existencia es inherente al desarrollo de la humanidad, asunto que complejiza el desarrollo de soluciones.

En este trabajo se propone una solución al problema de los residuos desde el diseño sustentable e innovador, y la ingeniería de procesos.

1.1 LOS RESIDUOS

¿Qué son los residuos?, ¿cuál es el problema? y ¿cómo se puede solucionar? son las preguntas que responde este capítulo y que sientan las bases del Trabajo de Título.

1.1.1 Conceptos

Según la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA), actual Ministerio del Medio Ambiente (MMA), un residuo es: (...) *una sustancia u objeto que: se elimina o valoriza, está destinado a ser eliminado o valorizado, o debe, por las disposiciones de la legislación nacional, ser eliminado o valorizado*. Entendiéndose por eliminación cualquier acción que permite tratar o disponer un residuo sin aprovechar sus materiales o valor energético, mientras que valorización corresponde a acciones que sí permiten aprovechar materiales y/o poder calorífico [1].

Por otro lado, la Organización de las Naciones Unidas (ONU) define residuos como: *materiales que no son productos primarios (es decir, producidos para el mercado), a los que su productor no tiene ya más usos que dar en función de sus propios objetivos de producción, transformación o consumo, y que desea eliminar. Se pueden generar desechos durante la extracción de materias primas, durante la transformación de éstas en productos intermedios o finales, durante el consumo de productos finales y durante otras actividades humanas. Se excluyen los residuos reciclados o reutilizados en el lugar en que se generan* [2].

El lector podría preguntarse cuáles son las causas para querer eliminar o valorizar un objeto, o porqué existen los residuos. De la definición de la ONU pueden extraerse un par de ideas que permiten despejar la duda: primero, los residuos son generados por la **humanidad**; y segundo, un objeto es un residuo cuando una **persona** ya no tiene más **usos** que darle. En contraste, la naturaleza¹ no genera residuos, ya que todo es reincorporado al ciclo natural a través de cadenas tróficas y de los ciclos biogeoquímicos [3], por lo tanto, los elementos naturales siempre tienen una o más funciones que aportar a la misma naturaleza. Los objetos creados por el ser humano

¹ Se entenderá naturaleza como un conjunto de cosas que existen en el mundo o se producen o modifican sin la intervención del ser humano, tal como los árboles y las piedras, y no las mesas.

parecieran tener vidas útiles limitadas, pues no pasan a ser parte de otros sistemas ni se transforman o integran al contexto para cumplir nuevas funciones útiles para las personas que adquieren esos objetos. Así, cuando la vida de un objeto termina, este constituye un residuo, y no queda más que eliminarlo o aprovechar lo que queda de él.

Cabe mencionar que las definiciones estudiadas son antropocentristas: se enfocan en la utilidad que puede entregar un objeto a la humanidad (no a otro ser vivo), por lo que cualquier beneficio que no sea útil para una persona (particularmente la persona que adquiere el objeto) no es relevante. Debido a esto, incluso elementos orgánicos que son producidos por la naturaleza, como los alimentos, pueden clasificarse como residuos cuando se incorporan a la vida de los seres humanos, pues en algún momento a una persona puede parecerle que los restos de alimentos no son útiles para ella, aunque lo sea para la naturaleza.

La ONU señala que si un residuo es aprovechado (en particular, reutilizado o reciclado) en el lugar donde es generado, entonces no constituye un residuo; se puede deducir que no califica como residuo porque el objeto sigue siendo útil para la persona que lo adquirió. Cabe mencionar que la definición chilena no hace referencia a esta particularidad, por lo que se deduce que un objeto es un residuo cuando ya no cumple la función original, aunque obtenga una nueva gracias a un tratamiento.

En ambas definiciones, es posible entender que un objeto no es un residuo si es capaz de autointegrarse al contexto y siempre entregar beneficios a los usuarios, sin requerir un tratamiento para lograrlo. Así, un objeto sin tratamiento y constantemente útil, no es un residuo.

Considerando las definiciones y reflexiones expuestas, en este trabajo se entenderá por residuo todo objeto que no es capaz de autointegrarse a un contexto ni aporta beneficios a las personas u otro ser vivo. Los residuos se eliminan o se tratan para ser aprovechados. Cabe mencionar que este concepto es concordante con la definición chilena, y amplía el espectro de los beneficiarios a todos los seres vivos, no solo el usuario, alejando la visión antropocentrista. Además, se deja fuera la excepción que da la ONU a aquellos residuos que son aprovechados en el lugar de origen.

1.1.1.1 *Clasificaciones*

En este trabajo son de particular interés los **residuos sólidos**, que corresponden a materiales inservibles con bajo contenido líquido, según la ONU, y comprenden basura urbana, desechos industriales y comerciales, fangos cloacales, desechos provenientes de operaciones agrícolas, cría de animales y otras actividades afines, y desechos de actividades de demolición y de minería [2]. Se deduce que quedan fuera de esta clasificación las aguas residuales de cualquier origen. Dado que no se hace referencia a los gases, se asume que no califican. Estos supuestos, además, coinciden con otras definiciones de la literatura [4].

Los residuos sólidos pueden clasificarse de diferentes formas, tan variadas como autores que escriben de ellos. Se considera la clasificación que establece la normativa chilena. Si bien en esta no se precisa qué son los residuos sólidos, de todas formas los clasifica según origen en dos grupos [1]:

- Residuos Sólidos Industriales: comprenden desechos provenientes de sectores silvoagropecuarios, mineros, industria manufacturera, entre otros.

- Residuos Sólidos Municipales (RSM): corresponden a residuos generados en los hogares, denominados residuos domiciliarios; y sus asimilables, como los residuos generados en vía pública, el comercio, instituciones, etc.

En la Tabla 1 se muestran los tipos de RSM y su origen:

Tabla 1: Tipos de Residuos Sólidos Municipales. Traducido de [5].

Tipo	Fuentes
Orgánico	Residuos de alimentos, poda y jardinería, y madera.
Papel	Residuos de papel, cartón, revistas, periódicos, bolsas, cajas, envases. Los papeles no son clasificados como orgánicos.
Plástico	Botellas, envases, contenedores, bolsas, vasos.
Vidrio	Botellas, vasos rotos, ampollitas.
Metal	Latas, papel alusa, latas de aerosoles no peligrosos, bicicletas, perfiles.
Otros	Textiles, cueros, gomas, multilaminados, residuos electrónicos, cenizas, otros materiales inertes.

Este trabajo se enfoca en resolver el problema de los **residuos sólidos municipales**; el lector encontrará las razones de esta decisión en la siguiente sección.

1.1.2 El problema de los residuos sólidos

¿Por qué interesan los residuos? se preguntará el lector. En este trabajo atañen porque son una fuente de problemas por resolver. A continuación, se relata la historia de su generación y gestión, y una propuesta de solución al problema.

La humanidad ha utilizado los recursos de la Tierra para sustentar la vida desde tiempos ancestrales. En los tiempos antiguos, la disposición de residuos no presentó problemas, porque la población era reducida y la tierra asimilaba los residuos generados (materia orgánica, principalmente). El problema inició cuando los seres humanos comenzaron a agruparse en comunidades y a acumular desechos. Una de las consecuencias más evidentes fue la propagación de vectores de enfermedades y la generación de malos olores [4].

En Atenas, cerca del año 500 a.C., optaron por prohibir acumularlos en las calles, y debieron transportarlos algunos kilómetros fuera de la ciudad a un basural abierto. En los primeros años del primer milenio, en Palestina comenzaron a quemarlos como una vía de solución; también en Jerusalem. En la Edad Media el problema continuó; en Inglaterra se obligó a los habitantes a mantener sus residuos dentro de las casas hasta que el servicio de recolección se los llevara a una fosa fuera de ciudad. Cabe destacar que en el s. XIV la deficiente gestión de residuos promovió la propagación de la peste negra en Europa [6].

Desde la Revolución Industrial, la tecnificación trajo consigo la producción a gran escala y, con ello, una mayor generación de residuos, los que contenían una gama de materiales como metales, vidrios y residuos de alimentos. La población migró desde las áreas rurales hacia los centros urbanos, produciendo una concentración de residuos domésticos [6] [4].

Desde entonces, la sensibilidad respecto a la salud pública y su relación con el medio ambiente ha ido en aumento, junto con la inclusión de nueva legislación asociada a recolección y disposición de residuos, a su incineración para obtener energía y otros tipos de tratamientos [6].

Los residuos sólidos son los que más preocupan, en comparación con los residuos líquidos o gaseosos, ya que se encuentran más desatendidos a nivel mundial. En la actualidad, la comunidad internacional se encuentra inquieta por reducir los impactos negativos asociados a la existencia de estos residuos. Se han desarrollado programas para promover un manejo adecuado de residuos sólidos, es decir, un transporte, almacenamiento, disposición y tratamiento responsable ambiental y socialmente [4].

Alguno de los impactos negativos son [7] [3]:

- Afectación de la calidad del agua y alteración de las características hidráulicas.
- Alteración de la cantidad de biomasa, del tipo de vegetación y fauna.
- Alteración de las propiedades físicas, químicas y de fertilidad de los suelos.
- Emisiones atmosféricas de dioxinas y furanos, sulfuros de hidrógeno, entre otros.
- Emisión de gases de efecto invernadero, como metano y dióxido de carbono, producto de los procesos de degradación anaeróbica en los rellenos sanitarios.
- Enfermedades provocadas por vectores sanitarios.
- Impactos paisajísticos.
- Riesgo de accidentes, tales como explosiones o derrumbes.
- Deterioro anímico y mental de las personas directamente afectadas por la cercanía de residuos.
- Mal olor.
- Contaminación acústica derivada del transporte de residuos.

La estrategia desarrollada por la Unión Europea (UE) para realizar un manejo adecuado, altamente difundida y aplicada en otros países, establece los principios de la jerarquía de gestión de residuos donde se prioriza la prevención de la generación de residuos, luego su reutilización, reciclado y compostaje, aprovechamiento energético y finalmente su disposición en relleno sanitario. También considera el principio de proximidad, que establece que los residuos deben ser tratados lo más cerca posible de su fuente de generación; y el principio de autosuficiencia en el tratamiento y eliminación de residuos, que dispone que, en conjunto, los Estados miembros de la EU deben conformar una Unión autosuficiente en el manejo de sus residuos. Esta estrategia fue formalmente adoptada en *1989 EU Community Strategy for waste Management* [6].

Según lo anterior, la mejor solución al problema de los residuos es la inexistencia de estos. Como notará el lector, los residuos aún existen, de hecho, a nivel mundial se generan 1.300 millones de toneladas de residuos sólidos (tanto industriales como municipales) y se estima que en el año 2.025 esta magnitud crecerá a 2.200 millones. Por otro lado, se realiza reciclaje o compostaje de un 25% aproximadamente, se aprovecha energéticamente alrededor de un 16% y, se disponen en relleno sanitario un 44% y un 9% en basurales. Con el restante 6% se realizan otras actividades. Se desconocen los niveles de reutilización, que no son reportadas por empresas u otras organizaciones, pues corresponden a una gestión interna [5].

Los RSM son los más preocupantes a nivel mundial, ya que las opciones de tratamiento son más reducidas que la de los residuos industriales, aún más si se considera el tratamiento local: generalmente, a nivel industrial existen mayor número de alternativas para aprovechar residuos en el mismo lugar de generación, mientras que los RSM son transportados a lugares de eliminación o tratamiento masivo. Una característica que complejiza el tratamiento de estos últimos es su composición, pues, a diferencia de los residuos industriales, es muy variada.

Finalmente, se puede concluir que el problema de los residuos sigue vigente a nivel mundial. Las razones que justifican este problema, en particular de los RSM, son las limitaciones tecnológicas, de energía y materias primas, gran variedad en la composición de los residuos, falta de recursos, existencia de políticas públicas inadecuadas y marcos regulatorios deficientes, entre otras [4] [7].

1.1.2.1 *Solución propuesta*

Este trabajo se enfoca en aportar a resolver el problema de los RSM debido a sus impactos negativos y déficit de soluciones satisfactorias, partiendo por aprovechar los residuos sólidos domiciliarios.

Según la jerarquía de gestión de residuos, la mejor solución posible es evitar la generación y la segunda mejor opción es aprovecharlos:

- La primera opción, posiblemente, requiere del cambio de conductas en las personas (cambio a largo plazo) y del diseño de objetos (productos) que no se conviertan en residuos, es decir, que sean capaces de reintegrarse al contexto y siempre generar utilidad a las personas u otro ser vivo (ver definición de residuo adoptada en este trabajo en sección 1.1.1 Conceptos).
- En la segunda opción, los objetos se convierten en residuos y estos son aprovechados, es decir, se requiere transformar los objetos ya inútiles en objetos que entreguen beneficios.

Se opta por desarrollar la última opción a través del diseño de un equipo capaz de aprovechar residuos, ya que es una solución a corto plazo que se adapta al tiempo del Trabajo de Título, es afín a la ingeniería de procesos y permite generar un cambio masivo (solución podría abarcar un mayor volumen de residuos, en comparación con la primera opción), cuestión que resulta urgente en el contexto mundial y chileno. Si bien la solución no es la ideal, es necesaria en la actualidad.

La finalidad del equipo es permitir que un residuo pueda integrarse al contexto de una vivienda aportando beneficios. Cabe mencionar que, según la definición de residuo de la ONU, sería posible que el objeto tratado con el equipo no se transforme en residuo, pues es aprovechado por la persona que adquirió el objeto; según la definición chilena, el objeto nunca dejará de ser residuo, independiente de los tratamientos que se realicen (ver definiciones en 1.1.1 Conceptos). Al margen de las definiciones, debe quedar claro que no es el objeto el que se reintegra al contexto, sino que el equipo diseñado integra el residuo a su contexto.

Cabe mencionar que la solución se diseña para ser implementada a escala domiciliaria², y así tratar a los residuos lo más cerca posible de su lugar de generación, evitando el transporte (y sus efectos negativos).

² Se entenderá por domicilio, vivienda y residencia todo lugar físico donde vivan y alojen personas, como casas, departamentos, hoteles, etc.

1.1.3 Tecnologías de tratamiento de residuos sólidos

Dada la decisión tomada en la sección anterior: diseñar un equipo que aproveche residuos sólidos domiciliarios, es de interés estudiar las tecnologías de tratamiento de residuos sólidos. Las siguientes son las más utilizadas [8] [6]:

1. **Reciclaje:**

Corresponde a la recuperación de materiales contenidos en los residuos y su procesamiento para hacer productos comercializables. El reciclaje de plástico y latas de aluminio es difundido y estudiado, de hecho, este suele generar mayores ahorros energéticos que la producción a partir del material virgen.

2. **Relleno Sanitario:**

Corresponde a una obra de ingeniería donde los residuos sólidos son confinados en el suelo, en condiciones controladas que minimizan los efectos adversos sobre el medio ambiente y la salud de la población. Se generan líquidos tóxicos (lixiviados) que pueden filtrarse a cursos de agua. Los materiales orgánicos se degradan, produciendo metano y dióxido de carbono, entre otros. Cabe destacar que el metano puede ser aprovechado como combustible.

3. **Compostaje** (tratamiento bioquímico):

Corresponde a un proceso de descomposición aeróbica de materia orgánica mediante el cual se generan compost, fertilizantes que nutren la tierra para permitir el crecimiento de plantas. Este tratamiento ha sido altamente difundido como forma de reciclaje en los hogares.

4. **Digestión Anaeróbica** (tratamiento bioquímico):

Corresponde a un proceso de descomposición anaeróbica de la fracción orgánica de los residuos, que genera digestato (lodo digerido) y biogás (principalmente metano) que pueden ser utilizados como fertilizante agrícola y combustible, respectivamente.

5. **Incineración** (tratamiento termoquímico):

Corresponde a un proceso de oxidación de materiales con contenido de carbono a alta temperatura y en presencia de oxígeno. Se genera, principalmente, dióxido de carbono y cenizas, además de calor que puede ser aprovechado, por ejemplo, en calderas para producir vapor y este a su vez para generar electricidad en turbinas. La incineración se ha utilizado para tratar materia orgánica.

6. **Pirólisis** (tratamiento térmico):

Corresponde a un proceso de degradación térmica de materiales con contenido de carbono que inicia cuando el material es calentado en ausencia de oxígeno. Se generan reacciones que rompen las moléculas del residuo, produciendo líquidos y gases combustibles, y carbón. La pirólisis se ha utilizado para tratar madera y residuos forestales, papel, cartón y plásticos.

7. **Gasificación** (tratamiento termoquímico):

Corresponde a un proceso de combustión incompleta de materiales con contenido de carbono a altas temperaturas con suministro de oxígeno limitado, para producir un gas combustible

llamado syngas (compuesto por monóxido de carbono e hidrógeno principalmente), además, se generan cenizas y alquitrán. El gas puede ser quemado en motores o utilizado para generar electricidad. La gasificación se ha utilizado para tratar residuos orgánicos, residuos forestales y maderas, residuos agrícolas, plásticos y neumáticos.

Las tecnologías mencionadas suelen ser aplicadas a gran escala. Este trabajo, sin embargo, se enfoca en soluciones a pequeña escala, buscando aportar en la solución del problema de manejo de los residuos domiciliarios lo más cerca posible de su origen, por lo que se debe evaluar la adaptabilidad de las tecnologías anteriores a contextos locales. Cabe mencionar que la disposición en relleno sanitario o basural es una opción que queda descartada por no corresponder a una tecnología de aprovechamiento o valorización, sino de eliminación.

1.2 LOS RESIDUOS EN CHILE

La solución propuesta para el problema de los residuos (ver 1.1.2 El problema de los residuos sólidos) se enfoca en el contexto nacional. En esta sección se explica el estado de la generación en Chile y se concluye el contexto específico de la solución, dando cuenta del estado del tratamiento.

1.2.1 Generación

Los residuos sólidos generados en Chile presentaron un aumento de un 42% desde el año 2.000 al 2.009, pasando de 11,9 a 16,9 millones de toneladas. En el año 2.009, los residuos sólidos municipales fueron 6,5 millones de toneladas (38,5% del total) y los industriales 10,4 millones de toneladas (61,5% del total) [1]. En la Figura 1 se muestra la generación de residuos desde el año 2.000 al 2.009.

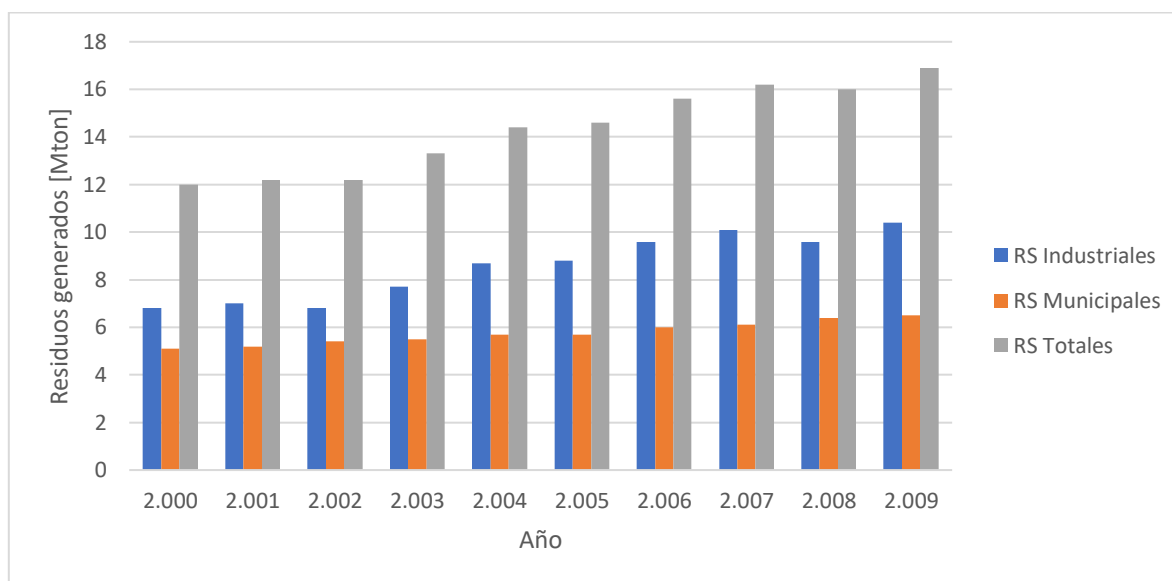


Figura 1: Residuos sólidos en Chile desde el año 2000 al 2009. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de [1]

Los RSM presentaron un crecimiento del 29% en el periodo de tiempo señalado.

Se ha determinado que la generación total se ve directamente influenciada por el número de habitantes, mientras que la generación per cápita depende del nivel de ingreso [1]. Respecto al

número de habitantes, cabe señalar que la Región Metropolitana concentra más del 50% de la población nacional y genera el 43% de los residuos totales (en la Tabla 2 se muestra la generación por región). Por otro lado, la generación por habitante ha aumentado de 326 $\left[\frac{kg}{per\ cápita}\right]$ de residuos por cápita en el año 2.000 a 384 $\left[\frac{kg}{per\ cápita}\right]$ en el año 2.009, tal como muestra la Figura 2 [1].

Tabla 2: Generación de RSM por región. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de [1].

Región	Generación de Residuos $\left[\frac{toneladas}{año}\right]$
Arica y Parinacota	114.485
Tarapacá	189.806
Antofagasta	196.289
Atacama	103.433
Coquimbo	220.860
Valparaíso	483.739
Metropolitana	2.807.247
Libertador Gral. Bernardo O'Higgins	343.694
Maule	359.862
Biobío	645.875
Araucanía	425.234
Los Ríos	147.563
Los Lagos	369.925
Aysén de Gral. Carlos Ibañez	44.918
Magallanes y de la Antártica Chilena	65.669
Total	6.518.599

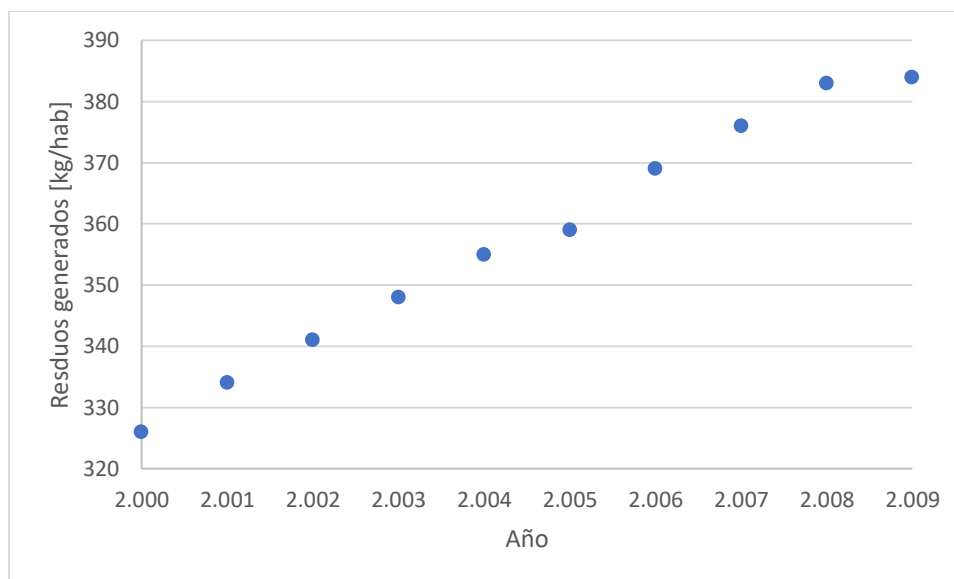


Figura 2: Masa per cápita anual de RSM generados en Chile. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de [1].

De esta información se puede extraer que el mayor flujo de RSM se encuentra concentrado en la Región Metropolitana; y la generación de residuos por habitante crece constantemente, aunque la tasa de crecimiento ha bajado entre el 2.008 y 2.009.

En la Figura 3 se muestra la composición de residuos generados en Chile en el año 2.009.

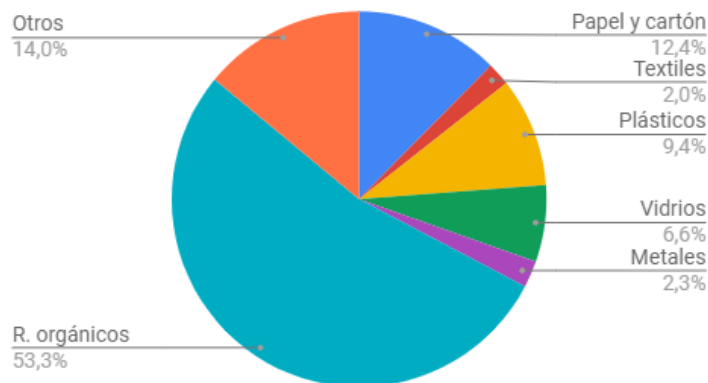


Figura 3: Distribución de la composición de los residuos sólidos municipales en Chile. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de [1].

Desde el año 1.973 al 2.009, la composición de papel, cartón y materia orgánica muestra una tendencia a la disminución, mientras que el plástico, vidrio, metal y otros residuos no clasificados han aumentado. Por otro lado, la composición de residuo textil ha permanecido constante en el tiempo [1].

Se propone enfocar la solución en la Región Metropolitana dado sus altos niveles de generación. El residuo a tratar y su cuantificación, son definidos más adelante, a partir de un estudio más profundo del contexto, que incluye la identificación de las necesidades de las personas en sus viviendas.

1.2.2 Tratamiento

La Ley N°20.920, promulgada en el año 2.016, establece la jerarquía del manejo de residuos [9]: *Orden de preferencia de manejo, que considera como primera alternativa la prevención en la generación de residuos, luego la reutilización, el reciclaje de los mismos o de uno o más de sus componentes y la valorización energética de los residuos, total o parcial, dejando como última alternativa su eliminación, acorde al desarrollo de instrumentos legales, reglamentarios y económicos pertinentes.* La jerarquía expuesta puede ser sintetizada en la Figura 4:

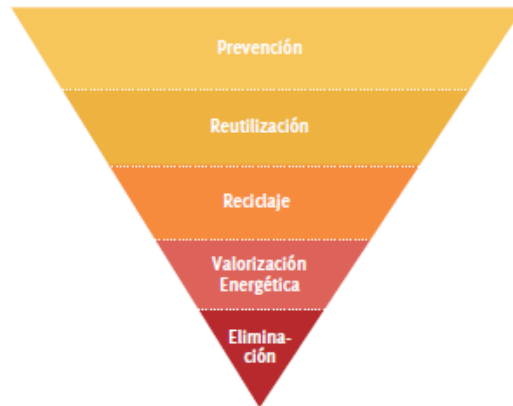


Figura 4: Pirámide de jerarquía de la gestión de residuos. Fuente: Elaboración a partir de datos de [9]

Se definen los siguientes conceptos [9] [3]:

- **Prevenición:** Son las medidas o acciones cuyo objetivo es evitar o reducir la generación de residuos o disminuir la concentración de sustancias peligrosas en ellos.
- **Reutilización:** acción mediante la cual productos o componentes de productos desechados se utilizan de nuevo, sin involucrar un proceso productivo
- **Reciclaje:** empleo de un residuo como insumo o materia prima en un proceso productivo, incluyendo el coprocesamiento y compostaje, pero excluyendo la valorización energética.
- **Valorización energética:** empleo de un residuo con la finalidad de aprovechar su poder calorífico. Ejemplo de ello es la incineración con recuperación energética.
- **Eliminación:** todo procedimiento cuyo objetivo es disponer en forma definitiva o destruir un residuo en instalaciones autorizadas. Dentro de esta categoría se encuentra la disposición en relleno sanitario e incineración sin recuperación energética. El MMA también considera como eliminación la disposición en vertederos y basurales, aunque estos sean instalaciones ilegales.

Respecto a la jerarquía, caben destacar las siguientes observaciones:

- El principio de jerarquía es similar al de la estrategia de gestión de la Unión Europea (EU Community Strategy for waste Management) (ver 1.2.2 Tratamiento)
- Las operaciones de valorización, concepto utilizado en la definición de residuo del MMA (ver sección 1.1.1 Conceptos), corresponden a la reutilización, reciclaje y valorización energética.

En el año 2.009 en Chile se generaron 16,9 millones de toneladas de residuos sólidos. Estos fueron tratados según lo que muestra la Figura 5, donde las operaciones de eliminación (disposición en relleno sanitario y basurales) corresponden aproximadamente al 99% de los casos [9].

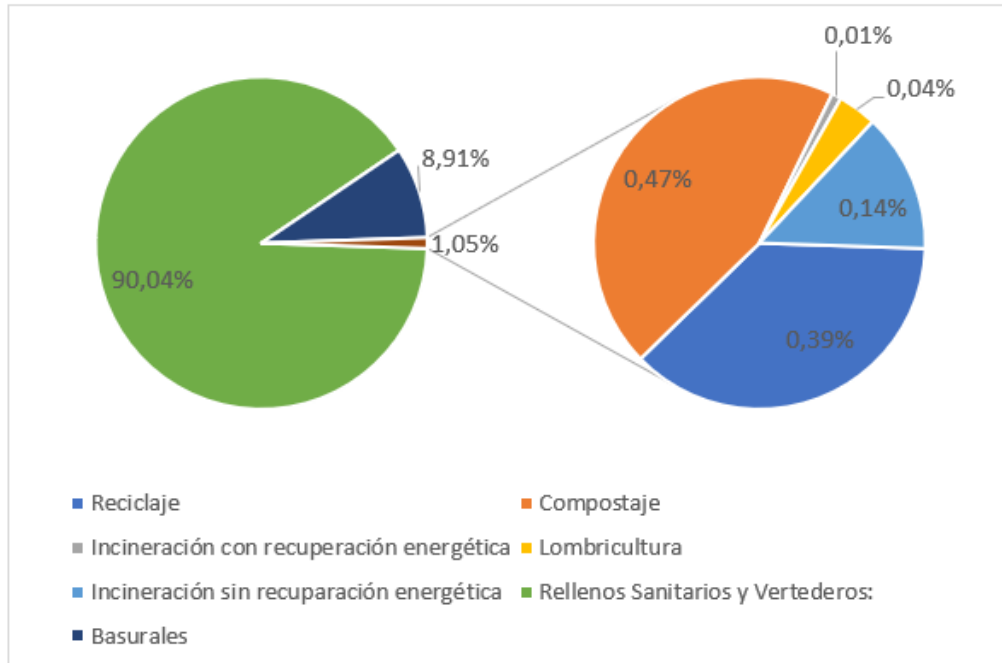


Figura 5: Distribución de las operaciones de valorización y disposición de residuos en Chile. Fuente: Elaboración propia a partir de datos de [9].

Cabe destacar que en Chile y en gran parte de América Latina el manejo de residuos se encuentra administrado por los municipios que sufren serias carencias técnicas y limitaciones en su manejo financiero, por lo que la calidad del servicio se ve reducida; el bajo costo del relleno sanitario frente a otras tecnologías es la causa de la predilección de esta. Si bien, la región ha mostrado avances tecnológicos en la recolección de residuos y disposición, esta última sigue siendo inadecuada. Existe una falta de innovación e implementación de prácticas de reducción, reuso y reciclado [7].

Como notará el lector, a la luz de la Ley, en Chile queda mucho por mejorar en tema de residuos: se requieren tecnologías con mayor jerarquía en el manejo, pues la realidad está configurada esencialmente por la disposición.

1.3 DISEÑO

Para solucionar el problema de los residuos se propone diseñar un equipo que los aproveche (ver 1.1.2). Este equipo será diseñado con dos herramientas: TRIZ y Upcycle, que permiten solucionar el problema de forma innovadora y sustentable, respectivamente. En esta sección se explican tales herramientas y sus orígenes.

1.3.1 TRIZ

TRIZ es una metodología sistemática o herramienta práctica, que provee un enfoque lógico para desarrollar la creatividad para la invención y resolución de problemas. Algunos autores consideran que este método es el más completo de los disponibles para fortalecer la innovación: abarca todos los aspectos de la comprensión de un problema y su resolución, con el objetivo de desarrollar nuevos sistemas técnicos.

TRIZ es el acrónimo de la frase rusa: *Teorija Rezhenija Izobretatelskih Zadach*, que en español significa *Teoría para la Resolución de Problemas Inventivos*. Fue creado por Genrich Altshuller (1.926-1.998), ingeniero y científico de la Unión Soviética [10].

En 1.946 Altshuller comenzó a trabajar en la oficina de patentes de la armada Soviética, y se dio cuenta que existían ciertos patrones de creación: personas de diferentes disciplinas tendían a resolver problemas con soluciones similares, pero en diferentes campos o aplicaciones. Profundizó este estudio hasta que fue condenado a 25 años de cárcel por sabotaje inventivo, en el gobierno de Stalin. En prisión compartió su teoría con otros ingenieros, científicos y prisioneros políticos. Luego de la muerte de Stalin en 1.953, los prisioneros fueron liberados, y la comunidad que se había creado en torno a TRIZ reinició el estudio. Analizaron 25.000 patentes y una de sus conclusiones, la más conocida y llamativa, fue que existían solo 40 formas de resolver contradicciones en áreas técnicas (denominados Principios Inventivos) [11] [12].

En los años siguientes el trabajo se ha profundizado y se ha creado más conocimiento. En la actualidad se han analizado más de 2,5 millones de patentes de todo el mundo y las conclusiones se reafirman [13].

1.3.1.1 *Síntesis de la Metodología TRIZ*

El diseño clásico de ingeniería resuelve el problema directamente inmerso en su contexto. TRIZ, en cambio, para resolver un problema real y específico, propone transformarlo en un problema conceptual, es decir, un problema más general y abstracto, despojado de sus particularidades. Todas las herramientas que TRIZ provee ayudan a resolver el problema conceptual, generando soluciones conceptuales, que luego deben ser adaptadas o transformadas para ser aplicables en el contexto real (ver Figura 6) [12].

TRIZ permite resolver cualquier problema técnico o de la industria de forma conceptual, a partir del conocimiento y experiencia provenientes de diferentes disciplinas. Por ejemplo, un ingeniero químico puede tener acceso a ideas del área de la aeronáutica, abriendo nuevos tipos de soluciones para él. La experticia del ingeniero es fundamental para aplicar dichas soluciones conceptuales a su contexto y hacerlas factibles de implementar. TRIZ permite que la falta de conocimiento no sea una limitante [12].

Como ya se ha mencionado, TRIZ fracciona el problema en dos: solucionar el problema conceptual y luego adaptar la solución a un contexto real. Esta estrategia provee ventajas frente al diseño tradicional, pues permite que el diseñador centre su atención en pocos puntos a la vez, y que sus mayores esfuerzos se enfoquen en resolver lo más difícil, que corresponde a traducir la solución conceptual a una solución real, cuestión que solo puede ser resuelta por el experto. Para el resto de los problemas dentro del nivel conceptual, TRIZ ofrece ayuda y conocimiento ilimitado.

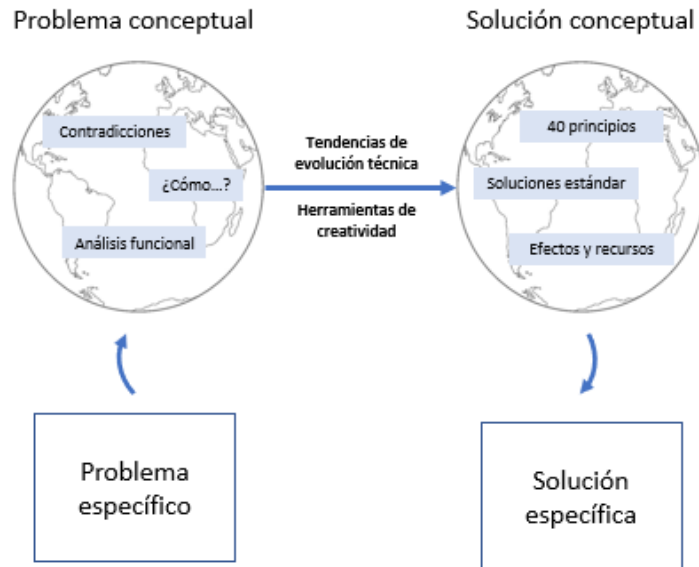


Figura 6: Prisma TRIZ. Fuente: Elaboración propia a partir de [12]

Se propone utilizar TRIZ para diseñar la solución, pues se desea realizar un diseño innovador, que permita obtener todos los beneficios que requieren los usuarios, evitando costos y daños, y aprovechando los recursos disponibles.

Más detalles sobre TRIZ en el Capítulo 2 Metodología.

1.3.1.2 TRIZ en el mundo

La metodología TRIZ se ha difundido a través del mundo en más de 35 países. Actualmente, es enseñada en universidades y es aplicada por diversas organizaciones para desarrollar o mejorar productos.

En la Tabla 3 se listan algunas universidades que actualmente enseñan TRIZ; y en la Tabla 4, las empresas más conocidas que utilizan la metodología.

Tabla 3: Ejemplos de universidad que utilizan la metodología TRIZ. Fuente: Elaboración propia de datos obtenidos de [14].

Australia: Queensland University of Technology (Brisbane), Australia	Estados Unidos: Carnegie Mellon University
Alemania: Dortmund University	Estados Unidos: Pennsylvania State University.
Alemania: Karlsruhe University	Korea del Sur: KAIST (Korea Advanced Institute of Science & Tech)
Brasil: Universidade de São Paulo	Singapur: National University of Singapore

Tabla 4: Ejemplos de empresas que utilizan la metodología TRIZ .Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos de [13].

3M	Mobil Oil
BP	Procter & Gamble
Dow	Shell
Intel	Siemens
Jet propulsion laboratory (NASA)	Pfizer
LG Electronics	Toyota

1.3.2 The Upcycle

Upcycle es una estrategia de diseño sustentable, desarrollada por William McDonough y Michael Braungart y publicada en el libro *THE UPCYCLE: Beyond Sustainability—Designing for Abundance* el 2.013, como una continuación del libro *Cradle to Cradle* del 2.002 [15].

McDonough nació en Japón en el año 1.951 y es arquitecto de profesión [15], mientras que Braungart nació en Alemania en el año 1.958 y estudió química e ingeniería de procesos [15]. Ambos son considerados líderes de pensamiento por sus ideas sobre sustentabilidad. Los autores proponen que la contaminación no es la causa de los problemas ambientales de la Tierra, sino los diseños defectuosos. Un producto bien diseñado no tendría como consecuencia contaminación o escasez, es más, podría proveer infinita utilidad, sin daños [16].

Mientras el ecologismo propone reducir las emisiones a cero, Upcycle posee una perspectiva totalmente diferente: promueve la abundancia, tal como en la naturaleza. Los procesos naturales generan emisiones y estos no son considerados negativos, sino que constituyen materiales que nutren la tierra, que se acoplan a otros procesos. De hecho, en la naturaleza no existen residuos. Desde la perspectiva Upcycle, la humanidad deja de verse como un parásito de la naturaleza, y acopla sus procesos técnicos con los naturales [16].

El nombre Upcycle hace referencia al diseño en ciclo ascendente: un producto siempre puede entregar beneficios y nunca ser desechado (nunca convertirse en residuo), es decir, siempre será integrado a ciclos naturales o tecnológicos, una y otra vez. Cada vez será más provechoso o valioso, pudiendo cumplir distintos objetivos a lo largo de su vida.

1.3.2.1 La estrategia Upcycle

Generar ideas novedosas y sustentables requiere pensar de forma diferente, dejando atrás el diseño tradicional donde lo primordial son las métricas (como los costos o eficiencias). La estrategia Upcycle consiste en una serie de pasos de diseño, que tiene por prioridad satisfacer las necesidades humanas, valorando el contexto natural, y luego considera las métricas [16].

Son 7 pasos que permiten definir valores, objetivos, estrategias y tácticas para resolver un problema, y se adoptan un conjunto de principios inviolables, los principios de Hannover. Estos fueron creados por la ciudad de Hannover (Alemania) el año 2.000, y condicionan las soluciones a diseños respetuosos con la humanidad y la naturaleza [16].

Se propone utilizar Upcycle para diseñar el equipo de aprovechamiento de residuos con el objetivo de generar un dispositivo que no se convierta en residuo, que se adapte e integre al contexto humano y natural, y que sea realmente útil para las personas.

Más detalles sobre Upcycle en la sección 2.1 Metodología Upcycle.

1.3.2.2 *Upcycle en el mundo*

Un ejemplo de diseño Upcycle es La Base Sustentable de la NASA que fue creada con los mismos plazos y presupuestos que el gobierno asigna a una construcción normal. Fue diseñada sin ideas preconcebidas y situándose en el contexto en que se emplazaría. El edificio se acopla a su ambiente, utilizando los recursos disponibles. Los diseñadores resolvieron las necesidades de agua, energía, el aire y climatización que requiere el edificio aprovechando el clima y geografía del lugar: la energía proviene del sol, el enfriamiento de la tierra y el agua de la atmósfera; la iluminación es natural, excepto 40 días al año, en invierno, cuando las horas de luz son pocas en el día. La Base es capaz de auto-monitorearse, lo que permite predecir los requerimientos energéticos y con ello se optimiza el uso de la energía utilizando las condiciones atmosféricas locales. Además, el edificio fue diseñado para que fuese habitable por personas. Por ejemplo: si bien el sistema de ventanas pudo haber sido automático o haber estado sellado para aumentar la eficiencia energética, los diseñadores decidieron que fuese configurable quienes habitan el edificio y así no sacrificar su libertad para sentir el viento o escuchar el canto de las aves, por un poco más eficiencia [16].

En la actualidad existen más de 2.900 productos certificados que fueron diseñados bajo la filosofía de los autores y más de 150 empresas certificadas [17] como L'Oréal [18] y C&A [19].

1.4 OBJETIVOS

Como se ha explicado en las secciones anteriores, es urgente solucionar el problema de manejo de los Residuos Sólidos Municipales debido a sus impactos negativos y la falta de soluciones adecuadas ambiental y socialmente. En particular, el problema se contextualiza en la Región Metropolitana debido a sus altos niveles de generación.

El Diseño arraigado en la sustentabilidad y la innovación puede dar una respuesta a este problema.

Se propone aprovechar los residuos con un equipo, utilizando tecnologías de tratamiento recomendadas en la jerarquía de gestión de residuos de la legislación chilena e internacional (reutilización, reciclaje y valorización energética), quedando fuera la opción de disposición. También, se descarta la alternativa de prevenir la generación debido a que es un cambio de largo plazo, que no depende solo de la ingeniería química y es más difícil de escalar.

La solución se diseña para ser implementada a nivel domiciliario, para tratar a los residuos lo más cerca posible de su lugar de generación y evitar su transporte.

1.4.1 Objetivo general

Concebir y diseñar un equipo que aproveche residuos a nivel domiciliario y se adapte a usuarios en diferentes contextos de la Región Metropolitana, utilizando las herramientas de diseño Upcycle y TRIZ.

1.4.2 Objetivos específicos

- Analizar diferentes contextos domiciliarios en la Región Metropolitana para:
 - Definir la composición de los residuos.

- Identificar conducta humana de la generación de residuos.
- Decidir caso base y límite de batería.
- Examinar el estado del arte del aprovechamiento de residuos.
- Decidir características del dispositivo, considerando beneficios, restricciones y recursos disponibles, sobre el análisis del contexto.
- Definir operaciones unitarias del equipo.
- Dimensionar y diseñar los componentes del equipo, con herramientas de diseño Upcycle y TRIZ.

Capítulo 2

METODOLOGÍA

En el presente capítulo se define la metodología seguida para realizar el diseño de un equipo de aprovechamiento de residuos, a partir de las estrategias de diseño Upcycle y TRIZ.

Se comienza explicando los aspectos fundamentales de las estrategias mencionadas, y se concluye una metodología para el trabajo.

2.1 METODOLOGÍA UPCYCLE

La estrategia de diseño sustentable Upcycle consiste en 7 pasos, que permiten dirigir el enfoque del diseño al contexto en que la solución será implementada. Se detallan a continuación [16]:

1. Situarse en el contexto natural y humano donde se implementará la solución.
2. Definir valores humanos.
Por ejemplo: diseñar un estilo de vida y producción que permita hacer sostenible el bienestar humano y del planeta, con seguridad, excelencia, trabajo en equipo e integridad.
3. Integrar principios.
Este paso se entiende como definir principios, que deben ser usados en el diseño de la solución.
Upcycle propone los Principios de Hannover:
 - a. Insistir en el derecho de la humanidad y la naturaleza de coexistir.
 - b. Reconocer la interdependencia.
 - c. Respetar las relaciones entre espíritu y materia.
 - d. Aceptar la responsabilidad del diseño y sus consecuencias.
 - e. Crear soluciones seguras con valor en el largo plazo.
 - f. Eliminar el concepto de basura.
 - g. Dependier de flujos de energía naturales.
 - h. Entender las limitaciones del diseño.
 - i. Buscar la mejora continua mediante el intercambio de conocimientos.
4. Definir objetivos del diseño.
Por ejemplo: crear tecnologías que permitan sostener la vida de los seres humanos, con el mismo o menor presupuesto y plazos actuales.
5. Decidir estrategias para diseñar.
Por ejemplo: enlazar las tecnologías desarrolladas con ciclos naturales. Separar ciclos de la biósfera y tecnósfera.
6. Decidir tácticas para diseñar.
Por ejemplo: Trabajar en conjunto con los mejores científicos, ingenieros, técnicos y humanistas para proponer ideas. Usar energía renovable del Sol y de la Tierra, con todo lo que hay sobre y bajo la superficie.

7. Medir eficiencia de la solución.

Por ejemplo: Energía consumida por persona y costo de energía producida.

También se deben considerar los flujos positivos compartidos, que corresponden a flujos de materia o energía que entrega la solución, o bien características o acciones de esta que son positivas para entorno natural y humano.

2.2 METODOLOGÍA TRIZ

TRIZ propone una serie de etapas para resolver un problema para obtener una solución innovadora. En la Tabla 5 se listan las 5 etapas fundamentales que se recomiendan cubrir siempre, independiente del tipo de problema; además, se incluyen las herramientas TRIZ más útiles para cada paso.

Tabla 5: Etapas para el desarrollo de soluciones propuestas por TRIZ, y herramientas útiles para abordarlas. Fuente: Elaboración propia a partir de [12].

Etapas	Herramienta TRIZ
Comprender el problema	9 cajas del contexto
	Idealidad
	Recursos
Descubrir necesidades y proyectar soluciones	Resultado Ideal
	Sistema ideal con las 9 cajas
Definir el problema	Análisis funcional
	40 principios inventivos para resolver contradicciones
	Pequeñas personas inteligentes
Identificar los gatillantes de solución y generar soluciones	Soluciones estándar
	Recorte
	40 principios inventivos para resolver contradicciones
	Tendencia
	Base de datos de efectos
	Pequeñas personas inteligentes
	Tamaño - tiempo - costo
	Recursos
9 cajas	
Jerarquizar soluciones e implementar	Gráfico de idealidad

Idealmente, se deben utilizar todas las herramientas mencionadas, pero para desarrollar este trabajo se escogen solo algunas por la magnitud del mismo. A continuación, se explican las herramientas más utilizadas [12].

2.2.1 Idealidad

La Idealidad corresponde a la Ecuación (1), que puede o no ser reemplazable matemáticamente.

$$\text{Idealidad} = \frac{\text{Beneficios}}{(\text{Costos} + \text{Daños})} \quad (1)$$

Donde:

Beneficios: lo que se desea lograr (no cómo se logra). El beneficio principal es el beneficio que más se desea.

Costos: cualquier entrada necesaria para desarrollar acciones que permitan lograr los beneficios, incluyendo tiempo, energía, recursos, etc.

Daños: todas las desventajas, sean entradas o características de la solución, entonces, es todo aquello que no es un beneficio ni un costo necesario.

Se busca que la Idealidad sea lo más alta posible, es decir, maximizar los beneficios y minimizar costos y daños en los que incurre la solución.

La **Idealidad tolerable** corresponde a aquellos beneficios reales a los que se puede aspirar considerando las restricciones del sistema, a los costos que se está dispuesto a aceptar y los daños que se pueden admitir.

Las **restricciones** pueden ser: limitaciones físicas, como tamaño y tiempo, regulaciones, vida del sistema, presupuesto disponible, escala de tiempo para desarrollar la solución y habilidad para implementar soluciones. Se debe tener precaución en asumir como restricciones prejuicios, como suponer que, si un producto es sustentable, entonces es caro.

2.2.2 Recursos

Un recurso es cualquier cosa que puede ser utilizada para sopesar costos. Permite, entonces, mejorar la Idealidad de la solución.

Un recurso es cualquier cosa que se puede usar libremente, que puede encontrarse disponible cerca del problema, en el medio ambiente o en el detalle de los componentes de la solución (hasta nivel molecular). Incluso, elementos problemáticos y que causa daños pueden ser transformados en recursos. También, los conocimientos, la experiencia, las actitudes y las emociones de quien diseña o quien de quien aprovecha la solución pueden ser aprovechados. El tiempo y el espacio también corresponden a recursos.

2.2.3 Resultado ideal

El resultado ideal es una lista de beneficios; todo lo que se tendría en un mundo ideal respecto al problema analizado, no importa si los beneficios son imposibles de lograr. La lista no incluye cómo, sino qué es lo que se desea.

El resultado ideal se utiliza para pensar en los objetivos de la solución, sin restricciones. Luego se analizan las restricciones por separado. Esto evita que se asuman condiciones que no son necesarias, o que se supongan ideas preconcebidas de la disciplina que no son requerimientos reales.

2.2.4 Análisis funcional

El análisis funcional es el proceso para entender una situación en un tiempo determinado a partir de sus *funciones*, por ejemplo, el contexto donde se desenvuelve un problema o un contexto donde ya se ha implementado una solución. El mapa funcional es el diagrama que muestra todos los *componentes* y cómo ellos *interactúan* y todas las *funciones* (deseadas y no deseadas).

Esta herramienta permite identificar problemas.

Las funciones consisten en acciones sobre objetos, tanto acciones deseadas y no deseadas. La acción debe **cambiar el estado del objeto**. Por ejemplo, en la situación donde una persona está tomando agua, se diría que el agua (sujeto) está hidratando (función) a la persona (objeto), pues esta última es la que cambia en la situación.

Los componentes son objetos y sujetos que realizan acciones; en el ejemplo anterior los componentes son la persona y el agua.

Las interacciones se dan entre componentes y corresponden a acciones, que se valoran como útiles, dañinas, entre otras, como se muestran en la figura, y que desembocan en daños o beneficios. Por ejemplo, en la situación descrita anteriormente, puede ocurrir que cuando la persona bebe agua, el agua moja a la persona, y en dicho caso la función corresponde a mojar, que se puede asociar a una acción dañina, pues provoca un daño (mojar a la persona).

En la Figura 7 se presenta la estructura de un mapa funcional y los tipos de interacciones que pueden darse. En la Figura 8 se muestra un ejemplo de mapa funcional. Cabe destacar que un sujeto puede realizar una o muchas acciones sobre uno o varios objetos. Y un objeto puede ser el sujeto de otra acción.

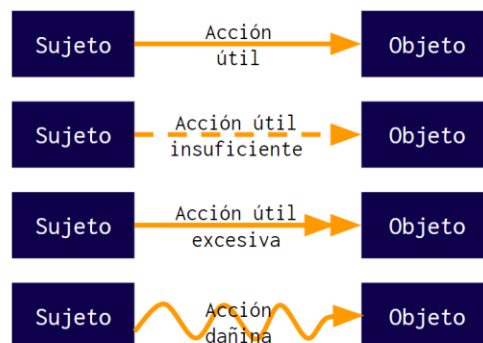


Figura 7: Tipos de interacciones en un mapa funcional.

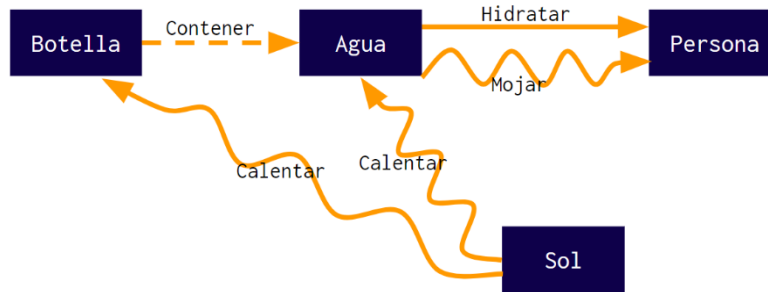


Figura 8: Ejemplo de mapa funcional para la situación: tomar agua de una botella.

2.2.5 40 principio inventivos para resolver contradicciones

La herramienta de los 40 principios identifica 40 formas de resolver contradicciones, de forma muy general (propone de soluciones conceptuales).

Existen dos tipos de contradicciones:

- Contradicción técnica: cuando se mejora una característica y otra empeora, por ejemplo: aumentar el tamaño de un producto provoca que se gasten más materiales. Se plantean como un *trade-off* entre dos de los 39 parámetros disponibles para describir la contradicción.
- Contradicción física: cuando se desea lo opuesto de la misma cosa. Se plantean como antónimos, por ejemplo, desear un paraguas grande cuando está lloviendo y pequeño cuando no.

Las contradicciones técnicas pueden ser traducidas a contradicciones físicas. Pese a que resulta más difícil plantear una contradicción técnica, los resultados son más precisos.

Para resolver una **contradicción técnica** se deben seguir los siguientes pasos:

1. Identificar contradicción técnica.
2. Identificar qué parámetros (2) se encuentran involucrados en la contradicción, escogiendo de los 39 parámetros técnicos disponibles [20].

Completar la siguiente tabla:

¿Qué está mejorando?	¿Qué está empeorando?
Asociar parámetro	Asociar parámetro

3. Identificar parámetros en la matriz de contradicciones [20]: parámetros en horizontal son aquellos que empeoran; parámetros en vertical son aquellos que mejoran. En la intersección de los parámetros, ver número de los principios sugeridos.
4. Ver la descripción de los principios sugeridos [20].
5. Generar ideas de solución a partir de los principios.

Para resolver una **contradicción física** se siguen los siguientes pasos:

1. Identificar cómo pueden ser separadas las cosas opuestas que se desean. Escoger alguna de las siguientes:

- a. En el tiempo: querer cosas opuestas en diferentes tiempos.
 - b. En el espacio: querer cosas opuestas en el mismo tiempo, pero en diferentes lugares.
 - c. En una condición: querer cosas opuestas al mismo tiempo y lugar, pero para diferentes características del sistema.
 - d. Por sistema: querer cosas opuestas en diferentes niveles. Los niveles pueden ser un macro contexto, contexto específico o parte del contexto específico, como una ciudad, una casa y una habitación, respectivamente.
2. Identificar cuál de los 40 principios sirve para resolver la contradicción, a partir de la tabla de los Principios de Separación [20].
 3. Ver la descripción de los principios sugeridos [20].
 4. Generar ideas de solución a partir de los principios.

2.2.6 Recorte

Herramienta que permite mejorar soluciones, eliminando componentes que aporten daños o costos, y dejando solo acciones útiles. Así, mejora la idealidad.

Por ejemplo, considere el lector una aspiradora con filtro de tela. El filtro sirve para separar el polvo del aire (acción útil), y luego de muchos usos, cuando se encuentra muy sucio, se desecha (acción dañina). Si en lugar de utilizar un filtro de tela se utiliza un ciclón, sería posible separar el polvo del aire sin necesidad de desechar el ciclón, porque su utilidad no se reduce con el uso. Así, reemplazar el filtro por el ciclón, permitiría eliminar un daño.

Para determinar si es posible eliminar un componente, se propone responder a las preguntas presentadas a continuación; si la respuesta es sí a alguna de las preguntas, entonces es posible eliminar el componente y mantener sus acciones útiles a partir de lo que sugiere la misma pregunta.

- ¿Se necesitan las acciones útiles del componente?
- ¿Puede el objeto realizar las acciones útiles sobre sí mismo?
- ¿Puede otro componente realizar la acción útil?
- ¿Puede un recurso realizar la acción útil?
- ¿Se puede cortar el componente luego de realiza la acción útil?
- ¿Puede cortarse una parte dañina del componente, dejando la parte útil?

Si no se puede aplicar la herramienta de recorte para eliminar acciones dañinas, entonces se sugiere utilizar la herramienta Soluciones Estándar, que permite modificar las acciones dañinas e insuficientes para mejorarlas.

También se puede atacar el daño de la siguiente forma:

- Bloquear el daño
- Transformar el daño en algo bueno.
- Corregir el daño: asumiendo que el daño existe, corregir sus efectos.

2.2.7 Base de datos de efectos

La Base de datos de efectos es un catálogo de soluciones conceptuales del área de la ciencia e ingeniería a problemas técnicos.

Para encontrar una solución en la Base de dato de efectos, se siguen los siguientes pasos:

1. Describir el problema real en un lenguaje simple. Por ejemplo: ¿Cómo quitar cloro del agua?
2. Reescribir la pregunta para describir lo que desea hacer de forma conceptual, a partir de una función y un objeto (problema conceptual). Por ejemplo: limpiar un líquido.
3. Dirigirse a la base de datos y buscar las funciones que se desean [20]. Identificar las soluciones conceptuales sugeridas.
4. Traducir las soluciones sugeridas en soluciones reales.

Otra alternativa para encontrar soluciones es:

- Buscar soluciones análogas usadas en otras industrias.
- Buscar industrias u organizaciones en donde el problema sea de vida o muerte.
- Buscar industrias que tengan dinero para gastar en investigaciones y desarrollos.
- Buscar productos y sistemas que se han convertido en commodity.

2.3 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Se compone la metodología para el trabajo, combinando y adaptando las metodologías TRIZ y Upcycle. A continuación, se presenta el paso a paso, haciendo referencia explícita a las partes y capítulos de este libro (ver Tabla 6). Cabe mencionar que se deja fuera el paso 7 de Upcycle, pues este requiere la implementación de la solución, lo que se escapa de los objetivos de este trabajo; respecto al último paso TRIZ, este tampoco se incluye por las mismas razones.

Tabla 6: Metodología de trabajo. Se incluyen las actividades y se indica el capítulo respectivo donde se desarrolla, y la relación con las metodologías TRIZ y Upcycle.

Parte	Actividad	Capítulo	Herramientas TRIZ útiles	Paso Upcycle	Paso TRIZ
Definición del problema	Describir el contexto	Contexto	Mapa funcional	Paso 1	Comprender el problema
	Definir necesidades y recursos	Características del equipo	Resultado ideal, Idealidad, Recursos		Descubrir necesidades y proyectar soluciones. Comprender el problema
		Elección de residuo y caso base			
		Beneficio Principal	Resultado Ideal		
		Fundamentos	Recursos		
Estado del Arte					
Resolución del problema	Establecer metas y métodos del diseño	Objetivos, estrategia y tácticas		Paso 2, 3, 4, 5 y 6	
	Definir solución conceptual	Operaciones Unitarias y límite de batería			Identificar los gatillantes de solución y generar soluciones
	Dimensionar operaciones de la solución	Dimensionamiento			
	Solucionar subproblemas	Diseño	40 principio inventivos para resolver contradicciones, Recorte, Base de datos de efectos		Identificar los gatillantes de solución y generar soluciones
Cierre de la solución	Discutir y concluir la solución	Reflexiones sobre el proceso creativo			
		Conclusiones generales			

PARTE I

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Capítulo 3

ANÁLISIS DEL CONTEXTO

Tal como propone la estrategia Upcycle, el primer paso para solucionar un problema es conocer el contexto en el que se desarrolla. Esto permite caracterizar el problema y extraer información para crear una solución que aproveche y sea afín al entorno natural y humano.

En concreto, el objetivo de este capítulo es definir los **residuos generados**, esto es, los tipos de residuos y su flujo de generación, e identificar las **características del contexto** que condicionan el diseño de la solución.

El problema de los residuos sólidos municipales se contextualiza en la Región Metropolitana. Son de interés los residuos que se generan en los domicilios, que es el lugar donde se implementará la solución. Así, es necesario estudiar el problema dentro de las viviendas de la RM.

Para cumplir con el objetivo de este capítulo primero se realiza un Análisis Base del contexto, que recoge la información bibliográfica disponible. Notará el lector a lo largo de tal sección que habrá información necesaria para el análisis que la literatura no provee. Así, se requerirá adquirir dicha información a partir de otras fuentes, componiendo con esto un Análisis Complementario para finalizar el análisis del contexto.

3.1 ANÁLISIS BASE

A continuación, se realiza un análisis del contexto para definir los residuos generados y las características del contexto sobre un estudio bibliográfico.

3.1.1 Residuos generados

En esta sección se pretende responder a la siguiente pregunta: ¿qué flujo de residuos se genera en una vivienda y cuál es su composición?

Se tiene información sobre la generación anual de RSM en la RM y su composición. Cabe destacar que los RSM consideran los residuos generados en los domicilios y asimilables, es decir aquellos provenientes de instituciones (como colegios, empresas, etc.), el comercio (como restaurantes, grandes tiendas, ferias libres, etc.), vía pública, los parques (residuos de poda), etc. Así, no se tiene información desagregada sobre los residuos generados en las viviendas y su composición.

Una solución simplificada podría asumir que la generación de RSM solo proviene de los domicilios. Sin embargo, esto sobreestimaría la generación real en las viviendas y equivocaría su composición, provocando un error en la elección del caso base. Asumir el supuesto mencionado alteraría el contexto y, peor aún, no se conocería la magnitud de esta distorsión.

Por otro lado, se sabe que los datos sobre RSM fueron entregados por las municipalidades de la RM, a partir de una encuesta elaborada por la Comisión Nacional del Medio Ambiente, del Gobierno de

Chile. Sin embargo, se desconoce totalmente cómo las municipalidades estimaron el flujo de residuos y los errores asociados.

Considerando lo anterior, y para sortear la incertidumbre en la cuantificación y composición de los residuos generados en una vivienda, se hace necesario determinar de otra forma estos datos sobre generación: se opta por preguntar directamente a personas de la RM a través de una encuesta. La consulta directa permite, además, tener conocimiento total sobre cómo han sido calculado los flujos.

Se preguntarán datos sobre los residuos generados en un día y, también, se aprovechará de obtener información visual de los residuos para conocer sus formas y tamaños, aspectos relevantes para el diseño de la solución. No se pedirá específicamente la masa de los residuos generados, sino una cuantificación a libre elección (en unidades de volumen o masa, número de unidades de algún objeto, etc.). Con esto se evitan errores en las respuestas de los encuestados.

Por lo tanto, se prefiere deducir los flujos máxicos a partir de la información entregada por los encuestados y la medición de las masas de objetos de referencia. Por ejemplo, si el residuo eliminado es un envase de yogurt, se medirá la masa del envase y se multiplicará por el número de envases desechados indicado por el encuestado. También se medirá el volumen para tener una referencia de cuánto espacio ocupan.

También es importante notar que existen residuos en los hogares que están destinados a ser reciclados y que, por lo tanto, posiblemente no requieran ser tratados por el equipo pues ya son aprovechados. Por esto, también se pide a los encuestados cuantificarlos.

En esta sección no es posible aún determinar el flujo de residuos ni su composición. Sin embargo, existen algunos elementos que condicionan la encuesta que sí pueden ser analizados.

Para recoger la información adecuada, en la encuesta se deben identificar los elementos que afectan la variabilidad del flujo de residuos generados y su composición. Esto permitirá definir a qué personas encuestar, procurando que las respuestas sean variadas y representativas de las viviendas de la RM. A continuación, se ahonda en estos factores.

3.1.1.1 Factores

Los factores que afectan al flujo generado de residuos son el número de personas y el nivel de ingreso de cada una [1]. No se tiene información sobre los factores que influyen en la composición; se deduce que el nivel socioeconómico podría afectar pues da cuenta de la forma de vida de las personas (sus riquezas y nivel educativo).

3.1.1.1.1 Número de personas

A medida que aumenta el número de personas por vivienda, los residuos generados aumentan [1].

En la Tabla 7 se muestra la población total por hogar (no se muestran los datos menores a 0,1%) según datos del Censo del año 2.002. Cabe mencionar que una vivienda está típicamente

constituida por un hogar³ (en el 94% de los casos [21]), por lo que para este análisis se asume que un hogar equivale a una vivienda.

Tabla 7: Población por hogar. Elaboración propia con datos de [2].

N° de integrantes por hogar	N° de hogares	Porcentaje de hogares [%]
1	182.126	10,97
2	292.280	17,60
3	352.949	21,26
4	382.929	23,06
5	237.368	14,29
6	121.233	7,30
7	48.028	2,89
8	21.924	1,32
9	10.004	0,60
10	5.007	0,30
11	2.567	0,15
Total	1.660.502	100

En la Tabla 7 se observa que las viviendas compuestas por 1 a 5 personas son las más abundantes. Así, en general, el flujo de residuos máximo producido sería generado en viviendas donde viven 5 personas, mientras que el mínimo en viviendas donde habita solo una persona.

Para obtener respuestas variadas y representativas de la RM, entonces, debe considerarse encuestar a personas que vivan en hogares conformados por 1 a 5 personas, al menos.

3.1.1.1.2 Nivel socioeconómico (NSE)

El nivel socioeconómico caracteriza a las personas a partir de su nivel de educación y la tenencia de bienes en la vivienda, variables que se relacionan con los ingresos, el nivel cultural y las riquezas acumuladas. Así, este factor también da cuenta del nivel de ingreso.

Se sabe que, a mayor nivel de ingreso, los residuos generados por persona aumentan. Por otro lado, no se tiene información sobre la composición de los mismos, pero se asume que varía respecto al NSE.

Existen 4 categorías en este ítem: ABC1, C2, C3, D y E. En la Tabla 8 se muestran algunas características de cada nivel. Cabe recordar el supuesto de equivalencia entre un hogar y una vivienda.

³ Un hogar es un grupo de personas que se beneficia de un mismo presupuesto alimentario [62]. En una vivienda pueden existir uno o más hogares.

Tabla 8: Características de los niveles socioeconómicos. Elaboración propia con datos de [22].

Característica	Nivel socioeconómico				
	ABC1	C2	C3	D	E
Proporción de hogares en la RM [%]	10,6	19,2	25,1	35,3	9,8
Comunas representativas en la RM	Vitacura, Las Condes y Lo Barnechea	Ñuñoa, San Miguel y Macul	Independencia, Estación Central y Quilicura	Recoleta, Pudahuel y Conchalí	Cerro Navia, La Pintana y Lo Espejo
Educación	Universitaria completa	Técnica Completa o Universitaria Incompleta	Media Completa	Media Incompleta	Básica Incompleta
N° de Bienes (de un total de 10)	9,2	7,2	5,7	4,4	2,3
Rango de ingresos del hogar [CLP]	\$1.700.000 a \$3.500.000 o más	\$600.000 a \$1.200.000	\$400.000 a \$500.000	\$200.000 a \$300.000	Menor o igual a \$160.000

Las personas del NSE ABC1 son las que tienen mayores ingresos y, por lo tanto, las que generarían un mayor flujo de residuos. Por otro lado, las personas del NSE E al tener los menores ingresos serían las que generan menos residuos.

Se debe considerar encuestar a personas pertenecientes a cada uno de estos niveles para representar a la RM.

Para cerrar esta sección (3.1.1 Residuos generados), recuerde el lector que no se ha podido responder a la pregunta que motiva esta sección: ¿qué flujo de residuos se genera en una vivienda y cuál es su composición? Sin embargo, se ha determinado qué factores influyen en esta respuesta, que será determinada a partir de una encuesta. Hasta aquí, tanto el flujo como la composición están condicionados por el número de personas por vivienda y su nivel socioeconómico.

En la sección 3.2.2 Muestra se encuentra la aplicación de los factores para seleccionar la muestra de población a encuestar. En la sección 3.2.3 Resultados y Análisis se encuentran los resultados de la encuesta.

3.1.2 Características del contexto

En esta sección se desea responder la siguiente pregunta: ¿qué características del contexto condicionan el diseño del equipo y cómo? Responder a esta pregunta es importante en la aplicación de la metodología de trabajo utilizada (ver Capítulo 2 Metodología).

Existen **características físicas** que restringen la solución o entregan recursos que pueden ser aprovechados por esta. Por ejemplo, un equipo que se pretenda instalar en un departamento

pequeño con acceso a electricidad debería ser pequeño (restricción) y podría utilizar electricidad (recurso).

Por otro lado, existen **aspectos sociales** que también podrían restringir o aportar recursos. Por ejemplo, si viven ancianos en el domicilio entusiasmados con el proyecto, la operación del equipo no debería requerir mucha fuerza (restricción) y podría aprovechar su disposición (recurso), por ejemplo, a lavar los residuos antes de ingresarlos al equipo.

Algunas de estas características no pueden obtenerse a partir de bibliografía, por lo que se realiza una encuesta para obtener la información faltante.

A continuación, se explican las características de contexto.

3.1.2.1 Características físicas del contexto

Se consideran como características físicas importantes las siguientes.

3.1.2.1.1 Tipo de vivienda

El tipo de vivienda es relevante puesto que entrega información sobre el espacio disponible. Se asume que este espacio existe para ser utilizado por el equipo (constituye un recurso) y su magnitud depende del tipo de vivienda.

Según el Censo del año 2.002, las viviendas de la RM pueden clasificarse en 8 categorías con la distribución que se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9: Población por hogar en la RM. Elaboración propia con datos de [2].

Tipo de vivienda	N° de viviendas	Porcentaje de viviendas [%]
Casa	1.206.698	73,40
Departamento en edificio	356.092	21,66
Piezas en casa antigua o conventillo	23.332	1,42
Mejora, mediagua	44.624	2,71
Rancho, choza	1.461	0,09
Móvil (carpa, vagón, container, bote, lancha, similar)	305	0,02
Otro tipo de vivienda particular	6.861	0,42
Vivienda colectiva (Residencial, Hotel, Hospital, etc.)	4.519	0,27
Viajeros (no es considerado vivienda)	53	0,00
Total	1.643.945	100

Como se observa en la tabla, el 73% y 22% de las viviendas son casas y departamentos, respectivamente, siendo estos los tipos de viviendas más comunes y abarcando el 95% del total.

Regularmente, las casas cuentan con más espacio interno que los departamentos, y estos últimos con más espacio que las piezas en casa antigua, conventillo, mejoras de viviendas, mediaguas, ranchos, chozas y viviendas móviles. Las viviendas colectivas podrían ser tanto o más grandes que las casas.

Respecto al espacio exterior, es probable que las casas tengan patio, no así los departamentos.

Las piezas en casas antiguas suelen contar con espacios comunes dentro de la casa antigua o en el exterior (patio). Análogamente, esto ocurre con los conventillos. Por otro lado, las mejoras de viviendas, mediaguas, ranchos y chozas podrían disponer de espacio exterior compartido con otras viviendas. Entonces, estas viviendas cuentan con reducido espacio interior y mayor espacio exterior.

Las viviendas móviles y viviendas colectivas podrían o no contar con espacio exterior disponible.

En conclusión, las viviendas con más restricciones sobre el espacio interior son las piezas en casa antigua, conventillo, mejoras de viviendas, mediaguas, ranchos, chozas y viviendas móviles. Mientras que la restricción sobre espacio exterior es mayor en los departamentos; esta restricción en viviendas móviles y viviendas colectivas es más variable. Comparando el espacio total (exterior e interior) de las viviendas con mayor restricción de espacio interior y exterior, se asume que el departamento tiene menos espacio. Se trata, además, de un contexto muy común.

Así, si el equipo tiene un tamaño que permite ser instalado en un departamento, entonces podrá ser instalado en el resto de las viviendas.

3.1.2.1.2 Bienes materiales

Los bienes materiales son relevantes porque aportan recursos y restricciones a la solución.

El agua y la infraestructura asociada (como cañerías o pozos) podrían ser aprovechadas como recurso: en la Tabla 10 se muestra el origen del agua en las viviendas, según el Censo del 2.002. Más de 20.000 domicilios no cuentan agua potable y, además, el agua podría ser de difícil acceso. El equipo no podría hacer uso de agua potable en todas las viviendas dada estas condiciones, pero sí podría utilizar agua sin tratamiento, de forma limitada.

Tabla 10: Origen del agua por vivienda en la RM. Elaboración propia con datos de [2].

Origen del agua	N° de viviendas	Porcentaje de viviendas [%]
Red pública (Cía. Agua Potable)	1.507.241	98,39
Pozo o noria	16.145	1,05
Río, vertiente, estero	8.477	0,55
Total	1.531.863	100

La electricidad y su infraestructura (como cableado o enchufes) también podrían constituir recursos: en la Tabla 11 se muestra el origen de la electricidad en las viviendas, según el Censo del 2.002. Se puede observar que aproximadamente 10.000 viviendas no cuentan con electricidad, por lo que el equipo no podría hacer uso de esta energía en todos los domicilios.

Tabla 11: Origen del alumbrado eléctrico por vivienda en la RM. Elaboración propia con datos de [2].

Origen del alumbrado eléctrico	N° de viviendas	Porcentaje de viviendas [%]
Red pública (Cía. Electricidad)	1.513.777	98,82
Generador propio o comunitario	7.957	0,52
Placa solar	60	0,00
No tiene	10.069	0,66
Total	1.531.863	100

Los combustibles y la infraestructura asociada (como tuberías para gas, estufas o calefones) podrían constituir recursos. Se tiene información sobre aquellos combustibles que se utilizan para cocinar (Tabla 12) a partir del Censo del 2.002; también los utilizados para calentar agua (Tabla 13) y climatizar espacios (Tabla 13), información obtenida de otra fuente [22] , pues el Censo del 2.002 no cuenta con esos datos.

Respecto a los combustibles utilizados para cocinar: se deduce que hay viviendas donde se utiliza más de un tipo de combustible, pues en la Tabla 12 el total de viviendas es mayor al número de viviendas existentes en la RM (ver Tabla 9). Se extrae que el combustible más utilizado para cocinar es el gas licuado. Además, existen casi 8.000 viviendas en donde no se cocina, por lo que no se cuenta con infraestructura ni combustible para estos.

Debido a inexistencia de combustibles para cocinar en algunos casos, no sería posible aprovechar siempre los combustibles como recurso para el equipo en desarrollo. Por otro lado, dada la variedad, el equipo tendría que adaptarse a los tipos de combustibles disponibles si se desea hacer uso de ellos. Análogamente, si se quiere utilizar la infraestructura asociada a la cocina, el equipo tendría que ser adaptado a cada caso.

Tabla 12: Combustible utilizado para cocinar por vivienda en la RM. Elaboración propia con datos de [2].

Combustible usado para cocinar	N° de viviendas	Porcentaje de viviendas [%]
Gas Natural	219.964	13,28
Gas Licuado	1.411.186	85,19
Parafina	2.098	0,13
Leña, aserrín	10.833	0,65
Carbón	102	0,01
Electricidad	4.371	0,26
Energía solar	11	0,00
No cocina	7.993	0,48
Total	1.656.558	100

Respecto al sistema de climatización: No hay información sobre las viviendas que no cuentan con climatización y, además, en una vivienda pueden existir más de un sistema de calefacción, tal como ocurre en el caso de los combustibles utilizados para cocinar.

Según la Tabla 13, el gas licuado y la parafina son los combustibles más utilizados para calefaccionar espacios. En este caso ocurre lo mismo que para los combustibles utilizados para cocinar: los

combustibles e infraestructura asociada a la calefacción son variables y, por lo tanto, si se desea aprovecharlos, el equipo debería ser adaptado a cada caso.

Tabla 13: Sistema de climatización por vivienda en la RM. Elaboración propia con datos de [22].

Sistema de climatización	N° de viviendas	Porcentaje de viviendas [%]
Calef. eléctrico	238.758	12,43%
Calef. gas licuado	793.172	41,29%
Calef. gas natural	105.501	5,49%
Calef. parafina	572.412	29,80%
Calef. leña	194.508	10,13%
Calef. pellet	0	0,00%
Aire acondicionado (eléctrico)	16.641	0,87%
Total	1.920.992	100%

Sobre el sistema de calentamiento de agua, no hay información sobre las viviendas que no cuentan con sistema de calentamiento de agua, además, puede haber viviendas que tengan más de uno.

Según la Tabla 14, en la mayoría de los casos se utiliza calefón como tecnología para calentar agua; por otro lado, hay un más de 137.000 viviendas que tienen otros sistemas.

Ocurre, nuevamente, lo descrito para los casos anteriores sobre combustibles para cocinar y calefaccionar: tanto el combustible como la infraestructura varían, por lo que el equipo debería ser adaptable para poder aprovechar estos recursos.

Tabla 14: Sistema de calentamiento de agua por vivienda. Elaboración propia con datos de [22].

Sistema de calentamiento de agua	N° de viviendas	Porcentaje de viviendas [%]
Calefón (gas natural o gas licuado)	1.424.146	86,63
Caldera	56.919	3,46
Termo a gas	0	0,00
Termo eléctrico	25.724	1,56
Otro	137.156	8,34
Total	1.643.945	100

Un atributo común para todas las energías, tanto electricidad como combustibles, es que existen casos donde no se cuenta con ellos ni su infraestructura. Si se desea hacer una solución aplicable a todos los contextos, entonces, no se podría hacer uso de ningún tipo de energía ni infraestructura.

Sin embargo, la solución podría no requerir nunca la infraestructura si el equipo mismo provee esa infraestructura; considere el lector el siguiente caso ilustrativo: si se quisiera generar gas a partir de los residuos, no se puede suponer que existe una cocina a gas que vaya a utilizarlo. Una solución apropiada a este problema es diseñar un equipo que genere gas y a la vez sea una cocina.

A parte de los bienes ya mencionados, se asume que pueden existir objetos como muebles, mesas, sillas, aparatos como lavadoras, etc. Estos podrían aprovecharse si se encuentran disponibles para ser utilizados, por ejemplo, un mueble se podría utilizar para apoyar el equipo.

No obstante, se desconoce cómo están distribuidos los objetos dentro del domicilio, qué espacio ocupan y su disponibilidad para ser aprovechados, aspectos que definen si son recursos o restricciones. Para los recursos de electricidad, agua y combustibles, también, se desconoce su disponibilidad en diferentes espacios dentro de la vivienda.

Se puede deducir cómo son las cocinas, los dormitorios, el comedor, etc., sin embargo, esta información es general y no permite identificar realidades distintas, ni los detalles de algún contexto en particular. Así, se prefiere ahondar más en el estudio del interior de las viviendas. Esto motiva la realización de una encuesta para preguntar a personas de la RM cómo es el interior de sus viviendas. Se opta por pedir fotografías de los domicilios, pues así se puede observar el contexto directamente. Se prioriza conocer solo un lugar de la vivienda, para facilitar la respuesta del encuestado.

¿Qué lugar escoger? Sería conveniente elegir aquel donde estará instalado el equipo. Potencialmente, podría estar instalado en el mismo lugar donde se sitúa el basurero, por comodidad del usuario. Por ejemplo, posiblemente el basurero principal de la vivienda se sitúe en la cocina, porque es allí donde continuamente se producen residuos (comida), entonces la cocina podría ser un lugar apropiado para instalar el equipo. En consecuencia, se preguntará a los encuestados qué hay alrededor de sus basureros: se pedirá una foto del basurero y su entorno. Conocer el basurero, además, da nociones del espacio que podría ocupar el equipo.

Conocer la vivienda de esta forma permite identificar otras características que no son fácilmente imaginables o deducibles, como la disponibilidad de luz solar.

En conclusión, aún quedan aspectos por definir: bienes materiales disponibles y su disposición en la habitación en la que se encuentra el basurero, además del espacio que ocupa este último. Todos estos aspectos serán determinados a través de la encuesta.

3.1.2.2 *Características sociales del contexto*

Independiente de qué personas habitan la vivienda, siempre es necesario que el equipo sea seguro, es decir, que no corte, que no queme, que no explote ni se inflame fácilmente, y que no esté compuesto ni libere sustancias peligrosas (es decir, sustancias corrosivas, inflamables, reactivas, infecciosas, tóxicas, explosivas y radiactivas). También, en todos los casos, la operación del equipo y sus instrucciones deben ser sencillas de entender.

Otras características sociales importantes son las siguientes: edades del grupo familiar y conducta de generación de residuos sólidos.

3.1.2.2.1 *Edades*

Las edades de las personas dentro de la vivienda otorgan tanto beneficios como restricciones.

Si existen niños pequeños, la operación del equipo no puede ser accesible para ellos a fin de no infringirles daño. El equipo, además, debe ser resistente a una mala manipulación (golpes, por ejemplo). Si existen ancianos, la operación del equipo no puede requerir mucha fuerza y se debe

evitar que ellos tengan que agacharse o subir escaleras. Por otro lado, si hay adultos, la operación podría hacer uso de su fuerza u otras habilidades físicas.

La condición más restrictiva, por lo tanto, sería asumir que en las viviendas habitan niños y ancianos. Cabe mencionar que este supuesto se encuentra exagerado, pues las edades más abundantes en la población se encuentran entre los 5 a 39 años, como se muestra en Tabla 15. Notar que la tabla presenta la distribución de edades a nivel regional, pues no es conocida la distribución en las viviendas.

Tabla 15: Rango de edad de la población en la RM. Elaboración propia con datos de [2].

Rango de edad	N° de personas	Porcentaje de personas [%]
0 – 4	451.955	7,46
5 – 9	511.864	8,44
10 – 14	545.399	9,00
15 – 19	500.692	8,26
20 – 24	498.692	8,23
25 – 29	499.700	8,24
30 – 34	493.062	8,13
35 – 39	503.215	8,30
40 – 44	464.931	7,67
45 – 49	366.188	6,04
50 – 54	310.041	5,12
55 – 59	245.903	4,06
60 – 64	195.812	3,23
65 – 69	152.479	2,52
70 – 74	135.798	2,24
75 – 79	85.311	1,41
80 y más	100.143	1,65
Total	6.061.185	100

3.1.2.2.2 Conducta de generación

Este ítem hace referencia a aspectos culturales asociados a la generación de residuos, que podrían constituir tanto recursos como restricciones.

Una característica que impone restricciones al equipo en desarrollo es la percepción que tienen las personas sobre sus propios residuos, por ejemplo, si les molesta tocarlos el equipo debería minimizar el contacto entre residuos y personas. Por otro lado, la disposición de las personas para separar sus residuos es un recurso que puede ser aprovechado en la solución: no sería necesario que el equipo segregue residuos si las personas están dispuestas a realizar esa labor.

La información requerida no se encuentra en bibliografía, así que se decide preguntar a las personas a través de la encuesta. Para determinar la percepción, se preguntará qué acción o propiedades asociadas a los residuos les incomoda más.; y para determinar la disposición se preguntará a las personas encuestadas si estarían dispuestas a separar alguno de sus residuos.

Cabe mencionar que, así como se desea aprovechar la disposición de las personas a separar sus residuos, se podría utilizar la energía física de las personas y su tiempo en la operación del equipo,

siempre y cuando la actividad sea breve y no genere cansancio ni fastidio, así como tirar la cadena del baño o encender una chimenea. Esto no se preguntará en la encuesta y se dejará a criterio de la diseñadora, puesto que es una situación imaginaria que podría no ser sencilla de entender o proyectar para el encuestado.

Para facilitar la respuesta sobre las incomodidades asociadas a los residuos, se darán opciones de molestias para que los encuestados elijan, aunque también podrán proponer otras molestias. En la Tabla 16 se indican las molestias consideradas en la encuesta.

Tabla 16: Molestias asociadas a los residuos.

n°	Molestia
1.	Que los residuos generen mal olor.
2.	Que los residuos ocupen tanto espacio.
3.	Que los residuos sean feos o desagradables a la vista.
4.	Que los residuos sea un foco de enfermedades.
5.	Que los residuos atraigan plagas (ratones, moscas, etc.).
6.	Que los residuos provoquen asco.
7.	Tener que sacar la basura.
8.	Que los animales escarben/jueguen en la basura.
9.	Que la basura se caiga y tenga que recogerla.
10.	Que la basura esté cerca de los niños.
11.	Que la bolsa de la basura se rompa.

Estas molestias condicionan el diseño de la solución: el equipo debe evitar que tales molestias existan. Por ejemplo, no puede ser desagradable a la vista o no puede atraer plagas.

Note el lector que las molestias pueden asociarse a residuos en particular. Por ejemplo, la generación de malos olores es causa de la descomposición de los residuos orgánicos. Así, estas molestias también pueden condicionar el caso base: se podría escoger tratar los residuos orgánicos puesto que son los que más molestias generan dentro de las viviendas. Este análisis llegará más adelante en el estudio del caso base.

En conclusión, queda por definir la disposición de las personas y su percepción de los residuos, que serán determinadas a partir de la encuesta.

Para cerrar esta sección (3.1.2 Características del contexto), note el lector que se ha dado respuesta a la pregunta que motiva esta sección: ¿qué características del contexto condicionan el diseño del equipo y cómo? Sin embargo, quedan aspectos inconclusos: bienes materiales disponibles y conducta de generación, que se definirán a partir de una encuesta.

Los resultados de la encuesta se encuentran en la sección 3.2.3 Resultados y Análisis.

3.2 ANÁLISIS COMPLEMENTARIO

En el Análisis Base el lector pudo percibir ausencias de información en la literatura y bases de datos del Estado. Se propuso realizar una encuesta para recoger aquella información, preguntando directamente a personas de la RM. Con esta información se podrá terminar el análisis del contexto.

A continuación, se explica la elaboración de la encuesta, la selección de la muestra de la población a encuestar y los resultados de la encuesta junto con su análisis.

3.2.1 Elaboración de la encuesta

Se requiere información sobre los residuos generados (flujo y composición) y características del contexto (bienes materiales y conducta de generación), así que la encuesta considera ambos ítem. A continuación, se explica la creación de la encuesta.

3.2.1.1 *Residuos generados*

Para obtener información sobre el flujo de residuos generado y su composición, se pedirá a los encuestados registrar cuántos y cuáles residuos son desechados en un día al basurero principal de su vivienda. También se les pedirá una foto para conocer visualmente sus residuos (formas y tamaños).

Cabe mencionar que los residuos generados en un día podrían no ser representativos de la generación habitual. Pese a lo anterior, se pide a los encuestados registrar sus residuos solo un día, facilitando con ello su participación en la encuesta y respuesta. A algunos de los encuestados se les pedirá que registren sus residuos por tres días, aprovechando su disposición a ayudar.

El basurero principal corresponde al basurero donde se descartan la mayoría de los residuos; por lo tanto, al preguntar solo por este basurero, no se consideran otros residuos generados, descartados en otros basureros más pequeños que podrían existir. Se decide solo preguntar por el basurero principal para facilitar la cuantificación de residuos al usuario. Así, los resultados estarán subestimados respecto a la real generación.

Se pedirá clasificar los residuos en: orgánicos (alimentos húmedos o sólidos, o residuos de poda y jardín), plásticos, metales, vidrios, papeles y cartones, y otros, pues estas clasificaciones son convenientes para analizar el tratamiento agrupando materiales de composiciones similares.

En la cuantificación de los residuos, la unidad de medida de los residuos será de libre elección, es decir, podrán contar de la forma que quieran, por ejemplo, en gramos, puñados, litros, etc.

Los residuos que las familias separan para reciclaje son parte de los residuos generados en las viviendas, aunque no se descarten en un basurero. Por lo tanto, también se solicitará a los encuestados registrar la generación de estos; se pedirá a los encuestados un registro semanal y no diario, pues se asume que su generación es más lenta que los de los residuos que van al basurero. También se pide cuantificar para determinar qué residuos posiblemente no requieren un nuevo tratamiento con el equipo a diseñar. En este sentido, será más significativo abordar un residuo que no vaya a reciclaje.

3.2.1.2 *Características del contexto*

Las características que se desea recoger con la encuesta son: **bienes materiales** alrededor del basurero principal y conducta de generación, específicamente, la **disposición** de las personas para realizar segregación y la **percepción** sobre los residuos.

Para determinar los recursos físicos, se pedirá a los encuestados tomarle una foto a su basurero procurando mostrar el entorno.

Para determinar la disposición, se preguntará a los encuestados si estarían dispuestos a separar al menos un tipo de residuo. La respuesta posible será *sí o no*.

Respecto a la percepción se generó una lista de molestias asociadas a los residuos (se encuentran listadas en Tabla 16), y se les preguntará a los encuestados cuáles son las dos opciones más representativas de su malestar frente a los residuos, teniendo la opción de proponer alguna molestia que no se encuentra en la lista.

3.2.1.3 *Encuesta*

En el Anexo A se encuentran los documentos utilizados como encuestas, que recogen todos los aspectos mencionados en esta sección. Los documentos son los siguientes:

1. *Encuesta: Generación de residuos comunes*: Se pregunta todo lo relacionado con la generación de residuos y bienes materiales. Este documento tiene dos versiones; en la *versión A* se pide registrar los residuos por un día y en la *versión B* por tres días.
2. *Encuesta: Generación de residuos para reciclaje*: Se pregunta sobre la generación de residuos destinados a reciclaje.
3. *Encuesta: Apreciación personal sobre residuos*: Se pregunta sobre disposición y percepción.

Cada uno de los documentos cuenta con instrucciones y ejemplos, para facilitar su uso, evitando con ello que las personas seleccionadas desistan de contestar.

3.2.2 **Muestra**

Se desea obtener información que permita representar a toda la RM respecto a la generación de residuos y características del contexto, a través de una encuesta a una muestra reducida.

Según la sociología, existen hasta 6 opiniones diferentes en una población; las otras opiniones se parecen a alguna de estas, con variaciones leves. Así, se deduce que las opiniones de la población se pueden agrupar en 6 conjuntos, cuyas opiniones representantes son alguna de las 6 antes mencionadas [23].

Si bien esta idea apunta a opiniones, se extenderá a respuestas de esta encuesta, que considera tanto opiniones como datos sobre la generación de residuos y su contexto.

¿Es válido extender la idea de las 6 opiniones a opiniones y datos? Si se asume que las opiniones emitidas por las personas se fundan en sus experiencias y estilos de vida, podría aceptarse que la regla de las 6 opiniones es una extensión de 6 estilos de vida subyacentes. En paralelo, los datos relacionados con características de su contexto y generación de residuos pueden ser concebidos como una expresión de los estilos de vida. Bajo estas suposiciones, se asume válida la premisa.

Con esto, es posible representar a la RM a partir de 6 respuestas a la encuesta muy diferentes entre sí; la dificultad radica en qué encuestados escoger para obtener dichas respuestas. Cada una de estas respuestas representará a un conjunto o sector de la población. Si bien la representación de la RM mediante esta muestra reducida será incompleta, la estimación puede ser muy responsable si se tiene en cuenta, como se mencionó anteriormente, una selección diversa de la muestra [23].

Se asume que la respuesta de cada encuestado se encuentra directamente relacionada con el contexto de su vivienda. Por lo tanto, considerando el supuesto anterior, para obtener respuestas muy distintas se deben escoger personas que vivan en contextos muy distintos entre sí.

Sintetizando lo anterior, para representar la RM se encuestarán a 6 personas que vivan en contextos muy diferentes. A continuación, se analizan las características de tales contextos y sus diferencias, denominadas parámetros del contexto, y posteriormente se explica la selección de personas encuestadas.

3.2.2.1 *Parámetros del contexto*

Se desea conocer el **flujo** y la **composición de residuos** de las viviendas en la RM a través de la encuesta, y se debe procurar que los resultados sean diferentes en cada contexto estudiado. Dado que los factores que determinan el flujo y la composición son el **número de habitantes** por vivienda y su **nivel socioeconómico** (ver sección 3.1.1.1 Factores), estos últimos son características que permiten diversificar el contexto, es decir, deben ser parámetros del contexto.

También se requieren conocer los **bienes materiales, disposición y percepción** de los habitantes, sin embargo, estos no se encuentran relacionadas con factores conocidos. De todas formas, se espera que los bienes materiales, disposición y percepción varíen en contextos que posean cualquier característica (relativa al problema de los residuos) diferente. Por ejemplo, aunque no existe una relación directa, se podría suponer que en una vivienda pequeña la percepción sobre los residuos es negativa porque ocupan mucho espacio. Así, se consideran relevantes todas las características del contexto mencionadas en la sección 3.1.2 Características del contexto, es decir, el **tipo de vivienda** y las **edades** de las personas son parámetros del contexto. El número de habitantes y el nivel socioeconómico también son atingentes para diversificar los contextos en este caso.

Cabe mencionar que las particularidades de la comuna donde se encuentra la vivienda podrían influir en las características de esta última. Si bien no existe una relación evidente entre el entorno y las características de la vivienda, se decide incluir estos factores para dar más variabilidad. Se consideran, en consecuencia, el **nivel socioeconómico comunal** y **generación comunal de residuos** como parámetros.

Se consideran como parámetros más relevantes aquellos relacionados directamente con el grupo humano y domicilio, antes que la comuna. Y entre estos, se prefiere el primero.

Así, los contextos a estudiar quedarán determinados por los siguientes parámetros, según orden de importancia decreciente:

1. NSE:

Este factor se considera el más importante de todos, es decir, ya que influye tanto en el flujo de residuos generados como en su composición, debido a que engloba dos propiedades importantes: el nivel de ingreso y el tipo de vida (cultura y riquezas).

Existen 5 niveles socioeconómicos (categorías): ACB1, C2, C3, D y E [22].

2. Número de habitantes por vivienda:

Este factor es importante por su directa relación con el flujo de residuos generados.

En la mayoría de los casos, las viviendas están compuesta por 1 a 5 personas. Para simplificar el estudio, se generan tres clasificaciones de número de integrantes del grupo familiar:

Tabla 17: Categorías sobre números de habitantes

Categorías	N° personas por vivienda
Tipo de familia A: F_A	1
Tipo de familia B: F_B	2 – 3
Tipo de familia C: F_C	4 y más

3. Edades:

Este factor no es más importante que los anteriores, pues solo otorga características que permiten diversificar los contextos. Sin embargo, se destaca que este parámetro dé cuenta de varios aspectos a la vez: la edad de las personas afecta en su comportamiento y los cuidados que se deben tener con cada uno, e impone restricciones de uso y seguridad del futuro equipo.

Si bien las edades más abundantes en la población están entre 5 y 35 años, el resto de las edades no constituyen un porcentaje insignificante del total. Para simplificar el estudio se reducen las categorías de edades a 4:

Tabla 18: Categorías sobre edades

Categorías	Edades promedio en la vivienda
Edad A: E_A	0 – 14
Edad B: E_B	15 – 24
Edad C: E_C	25 – 60
Edad D: E_D	61 y más

Las categorías hacen referencia a la edad promedio de las personas que habitan una vivienda, para simplificar el análisis. Así, una vivienda donde habite una madre de 20 años con un bebé recién nacido califica dentro de la categoría E_A .

4. Tipos de vivienda:

Este factor diversifica el contexto, pero solo restringe espacio, por lo que se considera menos determinante que el factor anterior.

Existen 8 tipos de viviendas, pero se consideran solo las más abundantes en la RM para simplificar, concluyendo las categorías: casas y departamentos.

5. NSE comunal:

Este factor no es determinante de las características de la vivienda.

El NSE comunal, en general, da cuenta del estilo de vida de la población. Existen, por lo tanto, 5 categorías en este ítem: ABC1, C2, C3, D y E.

6. Generación comunal de residuos:

Este factor no es determinante de las características de las viviendas, y se considera menos influyente que la característica del punto anterior.

Este factor es resultado del nivel de ingreso y número de habitantes en la comuna.

La generación de residuos de diferentes comunas fluctúa entre 2×10^3 hasta 3×10^5 toneladas al año. Se clasifica a las comunas a partir del orden de magnitud de su generación, de decir:

Tabla 19: Categorías sobre generación comunal de residuos

Categorías	Generación comunal (toneladas/año)
Orden 10^3	1×10^3 a 9×10^3
Orden 10^4	1×10^4 a 9×10^4
Orden 10^5	1×10^5 a 9×10^5

Los parámetros mencionados servirán para definir el conjunto de personas encuestadas en la siguiente sección. Para este fin, las categorías de cada parámetro se denominarán **valores**. Así, el parámetro 1 sobre NSE tiene 5 valores posibles (ABC1, C2, C3, D y E); el parámetro 2 sobre número de personas tiene 3 valores posibles (F_A , F_B y F_C), etc.

3.2.2.2 Personas encuestadas

Se desea encuestar a aquellas personas cuyos contextos son más diferentes entre sí.

Para caracterizar el contexto de cada persona se consideran los siguientes parámetros, jerarquizados según el siguiente orden, tal como se explica en la sección anterior:

1. NSE
2. Número de habitantes
3. Edades
4. Tipos de vivienda
5. NSE comunal
6. Generación comunal de residuos

Las combinaciones de estos 6 parámetros permiten generar 1.800 contextos diferentes, sin embargo, hay algunos que se parecen más que otros. Los contextos más diferentes entre sí son aquellos que presentan una variación en algún parámetro de alta jerarquía. Así, es preferible

encuestar a personas de contextos con NSE distintos, que personas que vivan en distintos tipos de vivienda.

Se dispone de una lista de 22 posibles encuestados cuyo nivel de compromiso hace verosímil su disposición a responder la encuesta, y de ellos se seleccionó a aquellos 6 con contextos más diferentes entre sí. Las respuestas de cada una de estas personas representan un sector de la población. Desde ahora en adelante estas 6 personas se denominarán **representantes**.

Se ha desarrollado una heurística que busca seleccionar los contextos más disímiles utilizando sus parámetros para concluir los 6 representantes. Considerando que los parámetros han sido jerarquizados, la heurística ha sido construida tomando en cuenta esta idea, así los parámetros son aplicados como criterios de selección sucesivamente.

En la Figura 9 se muestra un diagrama de decisiones que explica la heurística propuesta para la selección de representantes. Cabe mencionar que esta es válida solo para la lista de personas (posibles encuestados) estudiadas en este trabajo, y no ha sido desarrollada para una selección general. Se plantea, sin embargo, como un algoritmo de selección pertinente en este caso, pues recoge la jerarquización de parámetros descrita en la sección anterior y la diversificación de contextos seleccionados.

La heurística recorre los parámetros y valores que caracterizan el contexto de los encuestados, formando conjuntos de posibles encuestados, para proceder a su selección mediante una sucesión de preguntas.

A grandes rasgos, la estrategia considera:

1. **Punto de partida:** Se listan las personas y los valores de los parámetros de su contexto (ver lista completa en el Anexo B.1). De estas personas, se escoge el primer representante. Se selecciona a la persona cuyo contexto presenta un valor de parámetro que ningún otro contexto posee. Como este contexto es único, debe incluirse en el análisis.
En el diagrama, la primera persona representante es escogida con la pregunta: *¿Hay solo una persona en uno de los conjuntos?* Dado que la respuesta fue *sí*, no fue necesario considerar el caso con respuesta *no*.
2. **Estudio del parámetro n:** Se estudia uno de los parámetros (denominado parámetro n para generalizar los análisis sucesivos) para distinguir a las personas cuyo valor de parámetro n es ausente o escaso entre los representantes. Estas personas son potencialmente seleccionables para ser representantes.
Si solo hay una persona que tenga ese escaso valor de parámetro n, entonces debe ser seleccionada como representante. Si no, se debe estudiar el siguiente parámetro n+1.
Cabe mencionar que se considera un parámetro extra: el parámetro 7 permite seleccionar representantes a partir de su afinidad con la encuesta y compromiso con el proyecto. Este criterio resuelve cómo decidir qué persona encuestar cuando todas las disponibles viven en contextos iguales, en cuyo caso es innecesario encuestarlas a todas.
3. **Término:** El ciclo de estudio de parámetros termina cuando ya se han seleccionado 6 representantes.

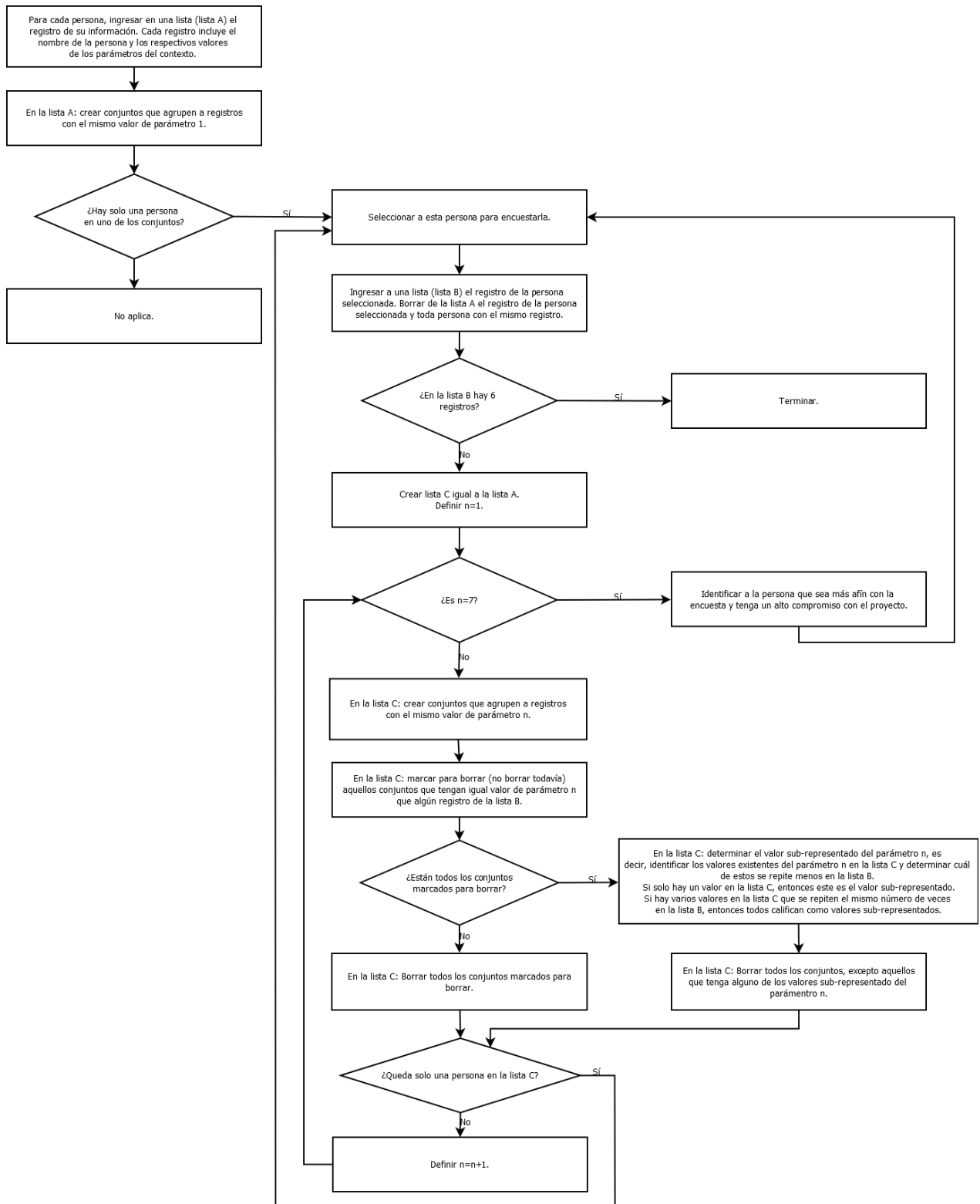


Figura 9: Diagrama de decisiones de la heurística para determinar encuestados

Finalmente, utilizando la heurística se seleccionaron 6 representantes en el siguiente orden: Persona n°21, Persona n°7, Persona n°12, Persona n°15, Persona n°19 y Persona n°9. Lista completa de posibles encuestados se encuentran en Anexo B.1.

Como se ha mencionado al inicio de esta sección, las respuestas de cada una de estas 6 personas representan las respuestas de un conjunto o sector de la población, y cualquier otra respuesta se estima clasificada dentro de uno de los sectores.

La Tabla 20 resume los valores de parámetro de cada representante, a quienes se ha asignado una numeración de sector. Esta etiqueta será utilizada en breve para clasificar a los encuestados que agrandarán la muestra.

Tabla 20: Valores de parámetros para cada representante y asignación de sectores respectivos.

Sector	Representante	Parámetros					
		NSE	Familia	Edad	Vivienda	NSE comunal	Generación comunal
1	Persona n°21	D	F_B	E_A	Casa	D	10^4
2	Persona n°7	ABC1	F_A	E_C	Depto.	C2	10^4
3	Persona n°12	C2	F_C	E_C	Casa	C3	10^5
4	Persona n°15	C3	F_B	E_D	Casa	C3	10^5
5	Persona n°19	C3	F_C	E_C	Casa	D	10^4
6	Persona n°9	C2	F_B	E_C	Depto.	C2	10^4

Considerando que existen personas de la lista de posibles encuestados que tienen una alta disponibilidad a ayudar, se decide encuestarlas para complementar o completar la información que se obtenga de los representantes. Esto abre un problema: ¿a qué sector asignar las respuestas de estos posibles encuestados? Dado que las respuestas a la encuesta están condicionadas por los contextos de origen, para clasificar a los nuevos encuestados se buscan similitudes entre los contextos de estos últimos y los respectivos contextos de los representantes de cada sector.

Con lo anterior, se obtiene la composición de los sectores mostrada en la Tabla 21. Finalmente, se encuestan a las 11 personas indicadas en esta tabla.

Tabla 21: Integrantes de cada sector. A cada integrante se le asigna un nuevo nombre.

Sector	Integrantes	Renombramiento
1	Persona n°21	Persona n°1
2	Persona n°7	Persona n°2
	Persona n°1	Persona n°3
	Persona n°3	Persona n°4
	Persona n°8	Persona n°5
3	Persona n°12	Persona n°6
4	Persona n°15	Persona n°7
5	Persona n°19	Persona n°8
6	Persona n°9	Persona n°9
	Persona n°11	Persona n°11
	Persona n°22	Persona n°12

Cabe señalar que la eventual sobre-representación de un sector será resuelta considerando las respuestas de cada sector de manera independiente, representando a un porcentaje de la RM. Por ejemplo, las repuestas de las personas 9, 11 y 12 representarán, como promedio, a un porcentaje de la población de la RM; mientras la persona 19 a otro.

A todos los encuestados se les pide responder los documentos *Encuesta: Generación de residuos comunes*, *Encuesta: Generación de residuos para reciclaje* y *Encuesta: Apreciación personal sobre residuos* (ver detalles sobre encuestas en la sección 3.2.1

Elaboración de la encuesta). Solo a los encuestados n°2, 3, 5 y 9 se les pide la información de la encuesta de generación *versión B* (encuesta más extensa y detallada que la *versión A*).

En el análisis de resultados se deberá estimar qué porcentaje de las viviendas de la RM pertenecen a cada uno de estos sectores, para ponderar, en consecuencia, las respuestas de la encuesta. Con el fin de determinar el porcentaje de viviendas asociadas a cada sector, se debería comparar las características de las viviendas de la RM con las respectivas características de los sectores. Sin embargo, no se tiene información completa sobre los parámetros para cada vivienda, sino que información de cada parámetro por separado. Es decir, se tienen valores de parámetros, pero estos no han sido informados en la literatura según tipos de vivienda y otras características de las mismas. Por lo tanto, se opta por utilizar solo un parámetro para clasificar a las viviendas. Se escoge el NSE por ser el más importante.

En aquellos sectores donde el NSE se repita, se supondrá que las viviendas se reparten equitativamente en cada uno (cálculos en Anexo B.2). Así, queda la siguiente distribución:

Tabla 22: Proporción de viviendas de la RM pertenecientes a cada sector.

Sector	NSE	Proporción de viviendas [%]
1	D	39,14
2	ABC1	11,75
3	C2	10,64
4	C3	13,91
5	C3	13,91
6	C2	10,64

Note el lector que se ha adoptado la estrategia señalada debido a que se cuenta con una muestra reducida y, además, tiempo y recursos acotados. Idealmente, si se pudiese hacer la encuesta a más personas, la estrategia sería diferente:

Siguiendo con la lógica de sectores: la estrategia original considera seleccionar las 6 personas con contextos más diferentes de una lista inicial de 22 posibles encuestados. Sin embargo, quizás lo más apropiado hubiese sido identificar qué contextos son los más diferentes entre sí en la RM, es decir, escoger 6 contextos de los 1.800 posibles, y entonces buscar a las personas que vivan en tales contextos para encuestarlas. Posiblemente, en este último caso se hubiesen abarcado todas las combinaciones posibles entre NSE y número de personas que generen diferencias importantes; por ejemplo, en una vivienda donde habita un grupo de 5 persona con NSE ABC1 se generarían los mayores flujos de residuos, por otro lado, una persona que vive sola y es de NSE D, generaría el

mínimo flujo de residuos. Así, estos contextos generan resultados muy distintos entre sí, y sería apropiado encuestar a personas que vivan en tales contextos. Cabe mencionar que esta estrategia requiere de un profundo análisis de los parámetros para poder discernir los 6 contextos más importantes o representativos de los 1.800 posibles.

Volviendo al caso original, ninguno de los contextos de los representantes cuenta con la combinación de características del ejemplo; así, estas personas seleccionadas podrían no representar los contextos más disímiles en la RM. Aquí el lector puede dimensionar la importancia de la lista inicial de los 22 posibles encuestados. Esta lista debe reflejar variadas realidades de la RM, de tal forma de poder obtener los contextos más diferentes de la RM. De hecho, dentro de los representantes escogidos no se encuentra ninguna persona del NSE E, pues en la lista no se contaba con ellas. Con la estrategia propuesta, fácilmente se deduce que debe encuestarse una persona del NSE E.

Para tranquilidad del lector, la lista de las 22 personas fue confeccionada intentando reflejar variadas realidades. Ahora bien, no será igual seleccionar entre 22 personas de contextos varios que entre 1.800.

Es importante notar que, para clasificar rigurosamente a la población dentro de cada sector con cualquier estrategia de las presentadas, se requeriría conocer en profundidad las características de todas las viviendas de la RM para asociarlas a un sector que las represente. La carencia de información detallada proveniente de Censos es, por cierto, una dificultad insalvable en este estudio.

Otra estrategia, que requiere menos análisis inicial sobre parámetros y, con ello, menos supuestos, sería encuestar a toda la población de la RM y trabajar con estos datos directamente. Esto podría ser posible si la información requerida se pregunta en un Censo, por ejemplo.

Por otro lado, se podría encuestar a muchas personas diferentes, y asumir que la RM queda totalmente representada por ellas y trabajar con los datos obtenidos.

Finalizando, se concluye que probablemente no se estén reflejando las realidades de la RM con la selección de encuestados. De todas formas, este ejercicio parece ser más acertado que tomar los datos que provee la literatura, pues estos no entregan información suficiente de las viviendas.

La siguiente sección presentará la información obtenida de la encuesta, que constituirá la base para definir el caso base, y las características sociales y físicas del contexto que condicionarán el equipo en desarrollo.

3.2.3 Resultados y Análisis

A continuación, se muestran los principales resultados obtenidos de la aplicación de la encuesta y sus análisis. Las respuestas obtenidas de la encuesta se encuentran en el Anexo C.1.

Las discusiones sobre los supuestos de la encuesta y las estimaciones realizadas serán abordadas en cada sección de información, pues la influencia en la cuantificación de residuos generados, bienes materiales y conducta de las personas en el hogar será diferente.

3.2.3.1 Residuos generados

De la encuesta se obtuvo información sobre los residuos generados en la vivienda de cada encuestado. Estos datos fueron transformados a flujos máscicos, considerando la masa unitaria de cada residuo. En el Anexo C.2 se encuentran disponibles los datos máscicos de diferentes residuos, medidos en este trabajo.

Se estima que los datos de flujo tienen un error del 30% debido a faltas de prolijidad en la toma de datos por parte de los encuestados, fallas en el tratamiento de datos y errores muestrales en la selección de las personas encuestadas y el día representado en la adquisición de datos (más detalles en Anexo C.3). Así, todos los datos de flujo presentados tienen un error de $\pm 30\%$.

Después de determinar los flujos máscicos de residuos generados por cada encuestado, se calculó el flujo generado por sector como el promedio de los flujos de cada integrante del sector. Luego, estos flujos se ponderaron por el porcentaje de viviendas de la RM que califican para pertenecer a los respectivos sectores. Finalmente, se utilizó la suma ponderada de los resultados para obtener la generación de residuos de una vivienda representativa de toda la región. Se procedió análogamente para determinar el flujo de residuos destinados a reciclaje.

En la Tabla 23 se muestran los resultados de la generación de residuos domiciliarios por sector y a nivel regional. En la Tabla 24 se encuentra el detalle de los residuos destinados a reciclaje por sector y a nivel regional. En Anexo C.3 se detallan los cálculos, y se incluyen los resultados en flujo volumétrico.

Tabla 23: Flujo máscico de residuos generados por vivienda, a nivel sectorial y regional.

Sector	Flujo de residuos generados por vivienda [$\frac{g}{\text{día}}$]						
	Plásticos	Orgánicos	Vidrios	Papeles y cartones	Metales	Otros	Total
1	30,0	0,0	0,0	35,1	61,1	0,0	126,3
2	100,5	660,6	196,9	168,2	35,7	35,3	1197,2
3	83,0	600,1	0,0	90,5	83,7	22,1	879,4
4	115,0	2200,0	213,7	56,9	0,0	652,1	3237,8
5	135,6	1714,4	1741,6	229,5	235,5	1154,4	5210,9
6	173,9	439,0	317,5	61,2	64,2	16,8	1072,5
Promedio regional (fracción%)	85,7 (5,45%)	732,7 (46,58%)	328,9 (20,91%)	89,5 (5,69%)	76,6 (4,87%)	259,6 (16,50%)	1.573 (100%)

Tabla 24: Flujo másico de residuos destinados a reciclaje en una vivienda representativa de la RM.

Sector	Flujo de residuos generados por vivienda $\left[\frac{g}{día}\right]$						
	Plásticos	Orgánicos	Vidrios	Papeles y cartones	Metales	Otros	Total
1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
2	58,0	0,0	196,9	82,6	12,5	0,0	350,0
3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
6	3,9	47,6	23,4	19,6	0,8	0,0	95,3
Promedio regional (fracción%)	7,23 (14,10%)	5,07 (9,88%)	25,63 (49,99%)	11,79 (22,99%)	1,55 (3,02%)	0 (0,00%)	7,23 (100%)

De la Tabla 23 se obtiene que el flujo promedio generado en las viviendas de la RM es de $1.600 \left[\frac{g}{día}\right]$, aproximadamente. Este valor se encuentra subestimado, pues en la encuesta se preguntó por el basurero principal y no todos los basureros presentes en la vivienda. Se puede ver fácilmente, a través de las respuestas a la encuesta, que los residuos del papelerero del baño en la mayoría de los casos no fueron considerados. Del análisis de los bienes materiales el lector notará que el basurero principal suele ser aquel que se encuentra en la cocina; se puede deducir que ahí no se botan los residuos provenientes del baño. En otros casos, cuando el basurero está afuera de la casa, sí se desechan allí. Cabe mencionar que el basurero principal podría albergar un porcentaje significativo de los residuos generados en el hogar, se estima un porcentaje mayor al 80%.

Se infiere que los residuos que no se están cuantificando y que hacen de los resultados datos subestimados, son los residuos provenientes del baño. Esto no es grave considerando que no es una gran pérdida para definir el caso base: estos residuos se encontrarían clasificados en *otros* al estar compuesto por una mezcla de varios tipos de residuos (papeles y orgánicos), y en el caso base se descarta tratar los residuos de este tipo (ver Capítulo 5 Elección de Residuo y Caso Base). En decir, de cualquier forma, los residuos del baño no serán tratados.

Si se asume que todos los RSM provienen de los domicilios, se obtendría un flujo por vivienda de $4.700 \left[\frac{g}{día}\right]$ aprox., es decir, tres veces mayor al flujo obtenido con la encuesta. Como era de esperar, el valor calculado a partir de la estadística regional es mayor debido a que, en realidad, considera otros emisores además de las viviendas. Esta diferencia se acentúa porque el valor obtenido con la encuesta está subestimado. Este desajuste es una muestra de la necesidad de estadísticas más detalladas sobre la generación de residuos que ha sido parcialmente resuelta con la encuesta realizada en este trabajo. Considerando que la estadística regional de RSM abarca emisores diferentes a las viviendas, no tiene sentido tomarla como referencia para la comparación de los flujos obtenidos de la encuesta.

Respecto a la composición, según las respuestas de la encuesta, la mayor proporción la presentan los orgánicos; y la menor, los metales. Solo para tener presente, los datos sobre RSM también

presentan este comportamiento. La diferencia mayor radica en la proporción de vidrios, que, según la encuesta, corresponden al 21% del total; y según los datos sobre RSM, al 7%.

Un aspecto que podría generar error es haber considerado solo un día de generación de residuos, para la mayoría de los encuestados. Esto provoca que los valores obtenidos con la encuesta puedan ser no representativos de la generación habitual. Sin embargo, se sabe que las personas respondieron la encuesta en días diferentes de la semana, entregando mayor representatividad en comparación con una respuesta sincronizada de las personas. Por otro lado, que algunos sectores estén conformados por más de un encuestado también aporta representatividad de la generación habitual del sector y, por lo tanto, de la muestra total. De todas formas, para definir el caso base debe considerarse que puede haber variaciones de flujo a través de los días.

Otro aspecto que puede influir en los resultados es que el registro de los residuos generado y el cálculo de las masas de los residuos presenten errores. Por lo tanto, para el caso base estos puntos también se debe tener presentes.

Respecto a los residuos reciclados, según la Tabla 24, el 3% de los residuos totales se aprovecha (reciclaje y compostaje). Este valor es más representativo de la generación habitual que los residuos que se desechan en el basurero, pues se pidió registrar por más tiempos la generación de residuos destinados a reciclaje. Cabe mencionar que para los RSM el aprovechamiento solo es del 1%.

3.2.3.2 *Bienes materiales*

A partir de las fotografías tomadas por los encuestados, se pudo caracterizar el contexto interior de las viviendas. En el Anexo C.4 se resumen los bienes materiales por sector.

En la mayoría de los casos, el basurero principal se ubica en la cocina; en general este lugar no cuenta con luz solar directa, el piso es de baldosas y tiene acceso a agua potable, enchufes y electricidad, una cocina y mesones. Dado que el equipo se podría encontrar dentro de la vivienda, no sería posible ser enterrado ni dañar las baldosas ni requerir luz solar, pero sí tendría acceso a agua y electricidad. El equipo, también, podría acoplarse a la cocina y utilizar parte de los mesones.

El basurero también puede estar ubicado en los patios de las casas; este lugar tiene piso de cemento, podría estar expuesto a las condiciones del ambiente y la luz solar no siempre se encuentra disponible; también puede albergar aparatos u objetos como lavadoras, cilindros de gas, calefones, bancas, etc. En este caso el equipo tampoco puede ser enterrado, sin embargo, el terreno es menos frágil que el de la cocina. El equipo debe estar protegido del ambiente, es decir, lluvia, viento, tierra, radiación solar, etc., pero no puede utilizar luz solar directa en todos los casos. También, podría acoplarse a los artefactos que se encuentren cerca, sin embargo, la existencia de estos en el patio es variable.

En todos los casos, el equipo debe procurar no dañar otros objetos que se encuentren cerca.

Cabe mencionar que los basureros que se encuentran en los patios de las casas ocupan un volumen mayor que aquellos que están en la cocina de casas y departamentos. En el exterior, el basurero tiene un volumen aproximado de 105 [l], mientras que en el interior es de 20 [l]. Así, la restricción de espacio podría ser variable dependiendo del lugar en donde se ubique el equipo.

3.2.3.3 Conducta de generación

Respecto a la disposición, 10 de los 11 encuestados separaría al menos uno de sus residuos. Esto equivale a que la mayoría de las personas de los sectores segregaría.

Los resultados sobre percepción se muestran en la Tabla 25 (detalles de los cálculos en Anexo C.5), donde las molestias mencionadas han sido indicadas en la Tabla 16. Se determinó un puntaje por sector para cada una de las molestias a partir de las respuestas de cada encuestado. Estos resultados se ponderaron por el porcentaje de vivienda de la RM que pertenecen a casa sector y, finalmente, los valores obtenidos se sumaron para obtener un promedio.

Tabla 25: Puntaje asociado a molestias, por sector y total.

Sector	Molestia											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1						1,0	1,0					
2	1,0	1,0	1,0		0,5		0,5					
3		1,0					1,0					
4	1,0				1,0						1,0	
5								1,0			1,0	
6	1,0					0,5	0,5		0,5			0,5
Promedio	0,4	0,2	0,1	0,0	0,2	0,4	0,6	0,1	0,1	0,0	0,3	0,1

Solo se recibió una propuesta adicional a las molestias de la lista, que corresponde a ‘lavar envases y bolsas que reciclo’. Por lo tanto, esta acción corresponde a la molestia n° 12.

Como puede percibir el lector, la variabilidad en las respuestas es alta. Esto da cuenta de la diversidad de opiniones sobre los residuos, lo que impondrá restricciones diversas sobre el equipo. Ahora bien, note también que la diversidad de respuestas obtenidas es una parcial validación de la selección de la muestra: 6 sectores, 6 perfiles de opinión diferente.

El puntaje mayor se encuentra asociado a sacar la basura, y le siguen la generación de mal olor y el asco que provoca en las personas. Así, el equipo debería evitar, principalmente, que exista transporte de residuos, impedir que los olores de los residuos lleguen a las personas y evitar que los residuos entren en contacto con las personas o que sean percibidos por ellos.

Finalmente, con el análisis realizado en esta sección se finaliza el estudio de los residuos generados y las características del contexto.

3.3 REFLEXIONES FINALES SOBRE EL ANÁLISIS DEL CONTEXTO

Este capítulo ha abordado la caracterización del contexto en que se centrará el trabajo: el equipo aprovechará residuos en un domicilio representativo de la Región Metropolitana.

La caracterización se ha sostenido, primero, sobre información disponible en la literatura o bases de datos del Estado. El capítulo también ha resuelto la ausencia de parte importante de la información necesaria, creando una encuesta para este fin.

La información más incierta es aquella que fue determinada a través de la encuesta, puesto que se aplicó a una reducida muestra de personas y no asegura representatividad de los diferentes contextos de la RM. La encuesta constituye, así, una solución preliminar a la falta de información, que puede ser mejorada escalando la muestra.

Como resultados de este capítulo, se ha determinado el flujo de residuos generado en las viviendas y su composición, y se han identificado las características que condicionan el diseño, tanto características físicas como sociales.

Se preguntará el lector porqué ha resultado necesaria una caracterización prolija del contexto y no se ha propuesto directamente un residuo a abordar, un producto a generar y una tecnología que la base del equipo en desarrollo. De hacer lo anterior se estaría quebrando el primer paso de la estrategia Upcycle y, con ello, cometiendo uno de los errores más comunes de la ingeniería: imponer el problema y la solución, y no partir del contexto

La información comprendida en este capítulo sustentará la definición del residuo a tratar, el caso base y, la definición las restricciones y recursos disponibles, análisis necesario en la técnica TRIZ.

Capítulo 4

CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO

TRIZ propone definir el Resultado ideal, es decir, los beneficios que tendría la solución en un mundo ideal, sin importar si son factibles en el mundo real. Esto permite identificar aquellos atributos que realmente se desean de la solución y trazar metas claras para el diseño.

Definido lo anterior, el siguiente paso es hacer más realistas las características de la solución, fijando límites aceptables para considerarla una buena solución. Estos límites se reúnen en el concepto de Idealidad tolerable: se definen beneficios que consideran las restricciones que impone la realidad, junto con los costos y daños que se estaría dispuesto a tolerar. Al mismo tiempo, es conveniente identificar los recursos del contexto que puede utilizar la solución para contrarrestar dichos daños.

Con lo anterior, una solución perfecta queda definida por el Resultado ideal. Dado que esto muchas veces no es posible de obtener, se define una solución realista y aceptable a través de la Idealidad tolerable, pero lo más cerca que sea posible de la solución ideal.

El objetivo de este capítulo es definir el Resultado ideal, las restricciones y recursos que provee el contexto, y la Idealidad tolerable.

Antes de comenzar, recuerde el lector que, como se definió en la sección 2.2 Metodología TRIZ, los beneficios son lo que se desea que componga la solución, en otras palabras, son las características de dicha solución. Por otro lado, los costos son cualquier entrada de energía, materia o tiempo requeridos para que el equipo desarrolle su función. Mientras que los daños son acciones u objetos que no entregan ningún tipo de beneficio.

4.1 RESULTADO IDEAL

En esta sección se define el Resultado ideal, expresado en una lista de beneficios de la solución, suponiendo un mundo ideal; no importa si las características parecen ser imposibles de lograr.

La lista de beneficios asociados a la solución es la siguiente:

1. El equipo aprovecha residuos en beneficio de las personas y la naturaleza.
En la introducción de este trabajo (en 1.4 Objetivos) se ha declarado el objetivo general de este trabajo, que es aprovechar residuos, por otro lado, los beneficiarios han sido establecidos en ese mismo capítulo (en 1.1.1 Conceptos) a partir de la redefinición del concepto de residuo.
Los beneficios que genera el equipo a las personas y naturaleza incluyen materiales y/o energía para los seres vivos.
2. El equipo puede ser instalado y utilizado en cualquier vivienda de la RM: Esta característica también es beneficio principal por ser parte de los objetivos del trabajo. Permite que la solución pueda ser utilizada masivamente.

3. El equipo puede aprovechar todos los residuos generados, es decir, infinitos residuos de todo tipo.
4. El equipo es atractivo visualmente. Esta característica corresponde a un flujo positivo, según Upcycle. Se desea que las personas les guste el equipo y se sientan cómodas con él.
5. El equipo emite infinitos gases o sustancias que generan impacto positivo en el medio ambiente.
6. El equipo es seguro para todos los seres vivos.
7. El equipo es duradero, por lo que debe ser resistente.

Una solución que presente todos los beneficios de la lista es la mejor solución posible. Entre más cerca se encuentre una solución a estas características, será mejor catalogada.

¿Cómo lograr que la solución genere dichos beneficios? Esta es, justamente, tarea del diseño. En otras palabras, el objetivo del diseño es generar un equipo con las características mencionadas.

4.1.1 Costos y daños

En el caso ideal, se consideran costos y daños nulos, que se explicitarán a continuación para poder entender mejor el análisis de la Idealidad tolerable.

Costo nulo:

1. El equipo no ocupa espacio.
2. El equipo no requiere ningún tipo de energía para funcionar.
3. La construcción y adquisición del equipo cuesta cero pesos.
4. La operación del equipo cuesta cero pesos.
5. La operación del equipo requiere nulo tiempo de las personas.

Daño nulo:

1. El equipo no genera ningún tipo de incomodidad: no hay olores, no atrae plagas, etc.
2. El equipo no genera emisiones o sustancias con impacto negativo al medio ambiente.
3. El equipo no interfiere con la conducta normal de las personas ni su cultura.

Se recuerda en este punto que el presente trabajo está orientado al diseño del equipo, excluyendo de esta fase la evaluación económica, que será propuesta para futuras etapas de este proyecto.

4.2 RESTRICCIONES Y RECURSOS

En esta sección se definen las restricciones y recursos que otorga la naturaleza y el contexto donde se implementará la solución, que condicionan el diseño del equipo.

4.2.1 Restricciones y recursos generales

Existen restricciones generales asociadas a procesos de tratamiento. Estas son:

1. El equipo debe tener masa y volumen. Este último estará acotado por el contexto, pero la Física impone un mínimo.

2. El equipo no puede tener una capacidad infinita pues esto significa que tenga un tamaño infinito y/o un infinito consumo energético. Por lo tanto, tampoco se pueden generar infinitos productos útiles.
3. Si el equipo genera cambios físicos y/o químicos en los residuos, se requiere energía.
4. Si el equipo genera cambios químicos en los residuos, posiblemente se requieran otras materias primas.
5. Si el equipo trata residuos de diferente naturaleza química para obtener un único producto, dicho producto tendría una aplicación limitada, pues no aprovecharía la materialidad de cada tipo de residuo, en comparación con los productos derivados de residuos específicos. En esta alternativa, la posibilidad de estar en categorías de reutilización o reciclaje se reduce.
6. Si el equipo trata residuos de diferente naturaleza química para generar diferentes productos, se requieren variadas etapas en el equipo, por lo que este sería más grande que si solo se tratara un tipo de residuo.
7. No existen procesos o tecnologías para transformar todos los gases o sustancias en elementos positivos para el medio ambiente. Sin embargo, hay sustancias más dañinas que otras. Utilizar tecnologías de aprovechamiento de residuos permite que el impacto ambiental sea menor que la disposición. Solo la inexistencia de residuos eliminaría la posibilidad de generar emisiones.
8. Si el equipo es operado por una persona, requiere algún grado de manipulación por parte de los usuarios, y es imposible que esto no les tome tiempo.

También, existe un recurso innegable:

1. El aire, compuesto por oxígeno y nitrógeno principalmente, se encuentra disponible siempre en las viviendas y puede ser aprovechado. Se debe considerar que no se puede consumir todo el aire porque esto afectaría la vida de personas y animales.

4.2.2 Restricciones y recursos del contexto

Existen algunas condiciones específicas del contexto que afectan el diseño de la solución.

Buscando que el equipo pueda ser instalado en **cualquier vivienda de la RM**, se diseña considerando las **restricciones más limitantes** de los contextos de las viviendas. Así, si el equipo puede operar en una vivienda con un contexto muy adverso, entonces podrá ser instalado en cualquier otra vivienda.

Estas restricciones provienen de las características del contexto (Capítulo 3 Análisis del Contexto), que son clasificadas como características físicas y sociales. A continuación, se mencionan las restricciones consideradas para cada una de las categorías. Se aprovecha, además, de identificar los recursos disponibles.

4.2.2.1 *Características físicas*

4.2.2.1.1 Tipo de vivienda

Se diseñará el equipo suponiendo que existe un espacio disponible para su instalación en la vivienda. Sin embargo, este espacio es limitado, lo que restringe el tamaño del equipo. La vivienda con más restricciones de espacio es el departamento, por lo tanto, el tamaño del equipo debe ser tal que permita ser instalado en tal tipo de vivienda.

4.2.2.1.2 Bienes materiales

Todas las viviendas tienen agua, sin embargo, existen viviendas en la RM donde el agua no es potable y podría ser de difícil acceso (se obtiene de pozos, ríos, vertientes, etc.). Así, se diseñará el equipo para el contexto más adverso posible, que es suponer disponibilidad limitada de agua (no potable) e inexistencia de un sistema de cañerías.

Existen viviendas sin acceso a electricidad, por lo tanto, se decide no utilizarla como recurso.

Los tipos de cocina, sistemas de climatización y sistemas de calentamiento de agua varían en las viviendas de la Región, siendo en algunos casos inexistentes. Lo mismo ocurre con el tipo de energía o combustible utilizados por dichas tecnologías. Siguiendo en la lógica de instalación en cualquier contexto, listada como un beneficio, se asume que ninguno de los elementos mencionados puede ser aprovechado por el equipo.

La energía y combustibles a los que se hace referencia son: combustibles fósiles, biomasa, electricidad y energía solar. La energía solar se descarta porque no se encuentra disponible en todas las viviendas, en particular, no se tiene acceso a ella en la cocina, que es la habitación donde posiblemente el usuario desee instalar el equipo.

Cabe mencionar que utilizar combustibles fósiles genera más impactos negativos en el ambiente que otras formas de energía accesibles para el ser humano en la ciudad. Por lo tanto, se considerará favorable no utilizarlos, reforzando la decisión anterior de no utilizar combustibles como insumos, en particular, fósiles.

De la encuesta se sabe que el equipo potencialmente podría estar instalado en la cocina o en el patio. Se asumirán las características más restrictivas de estos lugares, a saber: el equipo no puede dañar el piso ni otros objetos y debe ser resistente a las condiciones ambientales (lluvia, viento, tierra, etc.). Se supondrá que no hay disponibilidad de luz solar directa y que no se pueden aprovechar otros objetos (mesas, sillas, etc.).

Recuerde el lector que ya se ha descartado usar electricidad, combustible e infraestructuras asociadas.

Además, el tamaño del equipo se encuentra restringido, tal como se mencionó en la sección 4.2.2.1.1 Tipo de vivienda. El volumen apropiado del equipo dentro de la vivienda podría ser 20 [l] y en el exterior de 105 l, suponiendo que ocupa el mismo espacio que el basurero principal de la vivienda. El tamaño máximo del equipo quedará definido junto al caso base.

4.2.2.2 *Características Sociales*

Existen dos restricciones transversales a todos los contextos: el equipo debe ser seguro; y la operación, sencilla de entender.

4.2.2.2.1 Edad

Las edades que imponen más restricciones al equipo son la infancia y tercera edad. En consecuencia, se asumirá la presencia de personas de estas edades para mantener la lógica de instalación en cualquier contexto. Las restricciones asociadas son: el equipo debe ser resistente y seguro para los niños, y la operación no debe requerir un alto esfuerzo físico.

4.2.2.2.2 Conducta de generación

Note el lector que la conducta de las personas puede ser más flexible que las características físicas del contexto. La opinión de una persona puede cambiar al conocer el equipo y sus beneficios, no así la disponibilidad de agua o electricidad en la vivienda.

La mayoría de los encuestados respondió que separaría sus residuos. Si bien hay una persona que negó esta posibilidad, su opinión podría no ser definitiva considerando que esta persona, al momento de responder la encuesta, no estaba enterada de los beneficios asociados al equipo.

Teniendo presente el posible cambio de conducta, y dado que el equipo estará orientado a un tipo de residuo, se asumirá que las personas están dispuestas a separar al menos un tipo de residuos.

Siguiendo con la lógica anterior, se asume que las personas podrían aportar su energía física y tiempo en la operación del equipo, aunque de forma limitada, siempre y cuando esta actividad sea sencilla, corta y no agote sobremanera.

Respecto a las molestias, se identificaron 12 (ver sección 3.2.3.3 Conducta de generación) y de ellas las más molestas para las personas son: sacar la basura, generación de mal olor y sensación de asco provocada por los residuos en las personas. Así, se asumirá que estas molestias no deben ser generadas por el equipo, es decir, el equipo debe evitar el transporte de residuos, impedir que su olor llegue a las personas y evitar que los residuos entren en contacto con las personas o que sean percibidos por ellas.

El lector podría cuestionar el descarte parcial de molestias, que no ha abordado las 12 originalmente planteadas. En este aspecto, se ha asumido que solo las molestias más significativas para las personas podrían imposibilitar que el equipo sea instalado en sus viviendas. Es pertinente considerar que los residuos en basureros ya son tolerados por las personas con todas estas molestias. No obstante, se busca que el equipo sea más atractivo que un basurero, haciendo pertinente restringir, al menor, las molestias más importantes.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los recursos y restricciones concluidos en esta sección:

Tabla 26: Resumen de las restricciones y recursos que ofrece el contexto.

Restricciones	El equipo ocupa espacio.
	El equipo tiene una capacidad limitada de procesamiento.
	El equipo requiere energía.
	El equipo posiblemente requiere otras materias primas.
	Tratar varios tipos de residuos genera un producto de aplicación limitada.
	Tratar varios tipos de residuos requiere un equipo grande.
	Si las personas operan el equipo, estas deben manipular el equipo y el tiempo utilizado no es cero.
	Tamaño del equipo reducido (para instalar en departamento).
	Equipo debe ser resistente a condiciones ambientales.
	Equipo no puede dañar el piso ni otros objetos.
	Equipo debe ser seguro, en particular, para los niños.
	La operación debe ser sencilla de entender.
	El equipo debe ser resistente.
	La operación no debe requerir un alto esfuerzo físico.
	El equipo debe evitar el transporte de residuos.
El equipo debe impedir que los olores de los residuos lleguen a las personas.	
El equipo debe evitar que los residuos entren en contacto con las personas o que sean percibidos por ellas.	
Recursos	Aire (oxígeno y nitrógeno) limitado.
	Espacio limitado en la vivienda.
	Agua (no potable) limitada.
	Personas dispuestas a separar sus residuos.
	Personas dispuestas a operar el equipo si es sencillo y no exigente.

Se tienen pocos recursos y muchas restricciones, pues se desea que todas las personas de la RM puedan utilizar al equipo, como se ha mencionado en la lista de beneficios de la solución. Si se diseñara un equipo para una población menor, posiblemente habría más recursos disponibles y menos restricciones. Es más, si se diseñara un equipo para cada vivienda, el número de recursos serían máximos y el de restricciones mínimo.

Diseñar una solución masiva provoca desaprovechar recursos disponibles en algunos contextos y que las características del equipo (asociadas a restricciones) sean exageradas para algunos casos. Así, las soluciones masivas, tan típicas de la ingeniería, desaprovechan oportunidades para resolver mejor el problema.

Para cerrar esta sección (4.2 Restricciones y Recursos), se recuerda al lector las restricciones concluidas se utilizarán para acotar y restringir las características posibles de la solución. Mientras que los recursos se utilizarán para cubrir los posibles costos que vendrán con la solución.

4.3 IDEALIDAD TOLERABLE

En esta sección se definen los beneficios realistas del contexto junto con los costos y daños tolerables. Estas son las características **mínimas** que debe tener la solución para ser considerada una **buena solución**.

Definir la Idealidad tolerable luego del Resultado ideal, permite a quien diseña encontrar mejores soluciones, pues este tiende a generar soluciones aspirando al ideal y no solo a lo aceptable. Esta es una técnica central en la metodología TRIZ.

4.3.1 Beneficios reales

Una solución buena debe tener las siguientes características, que derivan de las restricciones del contexto:

1. El equipo aprovecha residuos, en beneficio de las personas y naturaleza: Esta característica no se flexibiliza al ser un beneficio principal.
2. El equipo puede ser instalado y utilizado en cualquier vivienda de la RM: Esta característica tampoco se flexibiliza, pues se trata de un beneficio principal. Notar que las restricciones impuestas sobre el diseño y los recursos considerados permiten cumplir con esta meta.
3. El equipo no aprovecha infinitos residuos: se restringirá un tipo de residuo para evitar un equipo grande y productos de aplicación limitada, y tratará el flujo habitual de residuos generados en las viviendas; se dejan fuera eventos excepcionales de generación de residuos sobre lo normal, pues podría considerar de forma importante el tamaño del equipo.
4. El equipo es atractivo visualmente.
5. El equipo no emite infinitas sustancias positivas para el medio ambiente. Si bien Upcycle plantea generar flujos o efectos positivos en el ambiente natural y humano, como un beneficio secundario, se buscará generar al menos una sustancia positiva para el ambiente.
6. El equipo es seguro en particular para los niños, y no debe dañar el piso ni otros objetos.
7. El equipo es resistente a las condiciones ambientales y una mala operación.

4.3.2 Costos tolerables

Considerando los recursos disponibles y las restricciones, los costos tolerables son los siguientes:

1. El equipo ocupa espacio. Dentro de la vivienda existe un espacio reducido que puede ser utilizado, por lo que el equipo debe tener un tamaño reducido para hacer posible su instalación en un departamento (ver tamaño máximo en sección 5.2 Caso Base).
2. El equipo requiere energía para funcionar. Se escoge utilizar energía que provenga de la actividad física humana. Esta actividad debe ser sencilla de entender y no requerir un alto esfuerzo físico. Además, el equipo no separará residuos porque esta acción puede ser realizada por las personas.
3. La operación puede requerir otras materias primas. Se encuentran disponibles el agua (no potable) y el aire. También podrían ser necesarias otras.
4. La operación del equipo podría costar dinero. Considerando que la operación podría necesitar insumos extras, se deja abierta la posibilidad de gastar dinero en alguna materia prima de bajo costo y con alta disponibilidad. Por ejemplo, podría gastarse \$1.000 [CLP] al mes.

5. La operación del equipo requiere un tiempo breve invertido por las personas. Se supondrá un máximo 10 minutos al día.

4.3.3 Daños tolerables

Considerando las restricciones, los daños que se toleran son los siguientes:

1. El equipo podría generar algunas molestias leves. No debe generar las molestias identificadas como más significativas para las personas, es decir:
 - a. El equipo debe evitar el transporte de residuos.
 - b. El equipo debe impedir que los olores de los residuos lleguen a las personas.
 - c. El equipo debe evitar que los residuos entren en contacto con las personas o que sean percibidos por ellas.
2. El equipo podría generar emisiones negativas, siempre y cuando sean menos dañinas que las emisiones asociadas a la disposición en relleno sanitario.
3. El equipo sí interferirá con la conducta normal de las personas, debido a la operación del equipo, pero se procurará que sea una actividad sencilla y de corta duración.

Para cerrar, todos los puntos definidos en esta sección (4.3 Idealidad Tolerable) permitirán identificar soluciones buenas o aceptables. Cualquier solución que no cumpla con los requisitos mínimos no podrá ser considerada para resolver el problema.

4.4 REFLEXIONES FINALES SOBRE LAS CARACTERÍSTICAS DEL EQUIPO

Se ha definido el Resultado ideal y la Idealidad tolerable, a partir de las restricciones y recursos que provee el contexto.

Como se ha mencionado al inicio de este capítulo, el Resultado ideal establece metas ideales claras para el diseño, mientras que la Idealidad tolerable establece metas realistas.

Así, la Idealidad tolerable permite definir qué soluciones son aceptables, mientras que el Resultado ideal permite identificar cuáles son mejores. Por ejemplo, suponga el lector que se diseña un equipo que emite CO_2 , gas de efecto invernadero, y otro que no; ambas son soluciones aceptables según la Idealidad tolerable, pero el equipo que no emite el gas es mejor pues está más cerca del Resultado ideal.

De esta manera, el Resultado ideal y la Idealidad tolerable serán utilizadas como herramientas para evaluar soluciones.

Ahora, que se encuentran trazadas las metas del diseño, el siguiente paso es concebir y diseñar soluciones.

Capítulo 5

ELECCIÓN DE RESIDUO Y CASO BASE

En este capítulo se selecciona el residuo que será tratado en el equipo y se determina el caso base, esto es, el flujo de residuo a tratar.

5.1 ELECCIÓN DE RESIDUO

Existen 6 tipos de residuos: orgánicos, plásticos, vidrios, metales, papeles y cartones, y otros sin clasificar. De estos, es posible tratar los primeros 5, puesto que sus características físicas y químicas son conocidas, no así los residuos sin clasificar que tienen una composición variable: podrían ser una mezcla de metales y plásticos, cerámicas, tierra, etc., por lo que tratarlos es menos factible técnicamente.

Como ya se mencionó en el Capítulo 4 Características del Equipo, se propone tratar uno de los 5 residuos, pues esto permite reducir el tamaño del equipo y diversificar las posibles aplicaciones del producto; el problema es definir cuál residuo. El lector podría pensar en tratar aquel que genere más daños en el ambiente o en la sociedad, siendo ambas propuestas válidas e importantes. Entonces, dada la atención simultánea en distintos criterios para definir el residuo, se utilizará un análisis multicriterio.

5.1.1 Criterios

Se desea tratar aquel residuo que genere más problemas, esto es, aquel cuyo ciclo de vida se encuentre menos adaptado al entorno. Siguiendo la estrategia de diseño sustentable, dicho entorno corresponde al contexto natural y humano. Así, los problemas mencionados corresponden a impactos ambientales y sociales.

El impacto económico, que se encuentra relacionado con el precio de las tecnologías de tratamiento, se deja fuera del análisis porque los aspectos económicos no se evalúan en esta etapa inicial del desarrollo de la solución, sino que en la fase final. Como propone la estrategia Upcycle, los aspectos económicos podrán constituir una restricción posterior, pero no pueden condicionar las fases tempranas de un proceso de diseño.

Además, se desean tratar, principalmente, los residuos que son dispuestos en relleno sanitario y no aquellos que son tratados con reciclaje, pues el reciclaje ya constituye una solución al problema de los residuos.

Por lo tanto, los criterios escogidos para seleccionar al residuo a tratar corresponden al impacto ambiental, impacto social y flujo de residuos no tratado con reciclaje.

A continuación, se explican los criterios escogidos y los indicadores utilizados para cuantificarlos. Note el lector que en las siguientes secciones se utilizan flujos de residuos generados en la RM, que fueron determinados en la sección 3.2.3.1 Residuos generados.

5.1.1.1 *Impacto ambiental*

El impacto ambiental es, según la ONU [2] y la OCDE [24], el efecto de las actividades humanas y eventos naturales en los organismos vivos y su medio abiótico. El impacto se puede medir a través de indicadores. En este trabajo se utiliza la **escasez ecológica**, que considera emisiones de contaminantes al aire, aguas subterráneas, aguas superficiales y tierra, uso de recursos energéticos y naturales, disposición de residuos (confinados), uso de suelo y uso de agua [25]. Cabe mencionar que el indicador utilizado considera impacto en todas las escalas espaciales y temporales, asumiendo que el residuo existe, en otras palabras: cuenta los efectos que el residuo provoca en su entorno inmediato hasta el más lejano (efectos a nivel mundial), desde el momento que se convierte en residuo hasta los siguientes 100 años.

Los residuos generan impactos ambientales dentro de las viviendas y fuera de ellas, cuando son transportados y tratados.

Los efectos del transporte son despreciables en comparación con el tratamiento [26]. También, el impacto intradomiciliario se estima menor al del tratamiento, debido al breve tiempo que los residuos permanecen en la vivienda. Por otro lado, no existen antecedentes de este tipo de análisis. Así, se mide solamente el impacto que produce el tratamiento de residuos, que en el caso de la RM corresponde a disposición y reciclaje.

Este criterio prioriza tratar aquel residuo con mayor impacto ambiental. Para determinar el impacto de cada residuo, se calcula la escasez ecológica de su disposición y de su reciclaje por unidad de masa de residuos. Luego se determina el flujo másico de residuos que se destinan a disposición y reciclaje en promedio de la RM, y se multiplican por la escasez ecológica específica. Ambos resultados se suman para obtener el impacto ambiental total del residuo. Finalmente, los resultados se normalizan para obtener un puntaje que se encuentren en una escala del 0 al 1, donde el 1 representa al mayor impacto; y 0, al menor. Este puntaje es necesario para realizar el análisis multicriterio, que es explicado en la siguiente sección.

Note el lector que se busca mejorar el contexto ambiental tratando al residuo con peor impacto ambiental. Entonces, el equipo a diseñar debe provocar un impacto ambiental menor que la situación actual para provocar dicha mejora.

En la Tabla 27 se muestra el impacto ambiental de cada residuo, calculado como se ha descrito anteriormente. El detalle de los cálculos se encuentra en el Anexo D.1.

Tabla 27: Resultados del criterio de Impacto ambiental.

Indicador	Impacto ambiental [UBP]				
	Plásticos	Orgánicos	Vidrios	Papeles y cartones	Metales
Impacto ambiental (I_a)	6,9	92,5	15,1	6,1	1,8
Puntaje normalizado I_a	0,06	1,00	0,15	0,05	0,00

Según este criterio, se deberían tratar los residuos orgánicos, pues poseen el puntaje más alto.

Suponga el lector que el equipo trata los residuos orgánicos a través de valorización energética. Esta solución tiene un impacto menor que disponer en relleno sanitario, así que efectivamente se estaría mejorando el escenario ambiental. Pero si se trata un residuo que anteriormente era reciclado, podría ser que el impacto ambiental de la nueva solución sea mayor para esos residuos. Se desea evitar este caso hipotético diseñando una solución que tenga menor impacto que la situación actual, es por ello que se debe prestar especial atención al momento de escoger la tecnología utilizada para tratar al residuo, discusión que se dará en el Capítulo 6 Beneficio Principal.

5.1.1.2 Impacto social

Según la Agencia de Protección Ambiental de Australia, el impacto social es el efecto de las actividades humanas y eventos naturales en el entorno social, considerando aspectos estéticos, culturales, económicos y comunitarios [27].

Existe impacto social dentro de la vivienda y fuera de ella, en su transporte y tratamiento, tal como ocurre con el impacto ambiental. Los indicadores de impacto social no han sido formalizados completamente en la literatura y son poco estandarizados[28], por lo tanto, se opta por cuantificar de otras formas, presentadas en las siguientes secciones.

Se analiza, entonces, el impacto social del transporte, el impacto social de la tecnología de tratamiento y el impacto social intradomiciliario. Este último debería considerar las enfermedades provocadas por los residuos y la molestia que podrían generar los residuos a las personas. Considerando que los residuos pasan un breve tiempo en las viviendas, las molestias alcanzan a ser más importantes que las enfermedades generadas. Además, la información asociada a enfermedades originadas por residuos no existe y requeriría un estudio más profundo, que escapa a los alcances de este trabajo. Así, solo se estudiará las molestias en las personas para cuantificar el impacto social intradomiciliario. Como en otros indicadores sociales, la declaración directa de las personas es más pertinente que indicadores alternativos.

5.1.1.2.1 Impacto social del transporte

Este criterio prioriza tratar el tipo de residuo que genere un mayor impacto social debido a su transporte. El equipo a diseñar podrá reducir este impacto, pues en ningún caso requiere transporte.

Tomando en cuenta que los residuos son transportados por camiones, los impactos en las comunidades incluyen ruidos molestos, polución, congestión vehicular y modificaciones estéticas

del barrio. Regularmente, estos efectos son identificados, pero no cuantificados en una escala regional, así que no se cuenta con datos.

Se sabe que el impacto aumenta con el número de camiones, que depende del volumen de residuos que deben transportar. Por lo tanto, a mayor volumen de residuos, existe un mayor impacto social. Entonces, un indicador de impacto social por transporte corresponde al volumen de residuos generados en promedio en la RM. Además, estos resultados se normalizan para obtener un puntaje entre 0 y 1. En la Tabla 28 se muestran el impacto social obtenido. La memoria de cálculo se encuentra en el Anexo D.2.

Tabla 28: Resultados del criterio de Impacto social del transporte.

Indicador	Impacto social del transporte $\left[\frac{l}{\text{día}}\right]$				
	Plásticos	Orgánicos	Vidrios	Papeles y cartones	Metales
Impacto social transporte (I_{st})	2,90	17,12	0,90	3,05	1,07
Puntaje normalizado I_{st}	0,12	1,00	0,00	0,13	0,01

Según el criterio de impacto social del transporte, los residuos que debe ser tratado son los orgánicos porque tienen el mayor impacto.

5.1.1.2.2 Impacto social de la tecnología en planta

Este criterio prioriza tratar el tipo de residuo que genere un mayor impacto social debido a la tecnología con la que es procesado en una planta de tratamiento (fuera de la vivienda); en el caso de la RM dichas tecnologías corresponden al reciclaje y disposición en relleno sanitario.

Se busca tratar al residuo con peor impacto social con el objetivo de mejorar esta situación implementando el equipo. El equipo, de hecho, tendrá un impacto nulo de la tecnología pues no es concebido como planta de tratamiento.

El impacto social de las tecnologías del tratamiento de residuos no ha sido cuantificado en Chile. Sin embargo, se tiene información de un estudio de impacto social de plantas de tratamiento de residuos orgánicos de poda y jardín, en la comuna de Santiago, que considera tecnologías de compostaje, digestión anaeróbica, gasificación y disposición en relleno sanitario [29]. Este caso será tomado como un antecedente para todos de los residuos: el cuantificador de impacto del compostaje será tomado como estimador del impacto social del reciclaje de los residuos en general; y el valor del indicador para la disposición en relleno sanitario se utilizará directamente.

Dichos impactos se asumen válidos para cada kilogramo de residuo, pues así, a mayor flujo másico, el impacto es mayor. Para cada residuo, el impacto del reciclaje y de la disposición se multiplican por el flujo másico correspondiente (promedio de la RM), y estos resultados se suman para determinar el impacto total. Este impacto total se normaliza para obtener un puntaje entre 0 y 1. En la Tabla 29 se muestran los resultados. La memoria de cálculo se encuentra en el Anexo D.3.

Tabla 29: Resultados del criterio de Impacto social de la tecnología en planta.

Indicador	Impacto social de la tecnología en planta				
	Plásticos	Orgánicos	Vidrios	Papeles y cartones	Metales
Impacto social tecnología (I_{stec})	705,6	6157,6	2711,2	726,8	641,5
Puntaje I_{stec}	0,01	1,00	0,38	0,02	0,00

Según este criterio, los residuos que deben ser tratados son los orgánicos, pues presentan el mayor impacto.

5.1.1.2.3 Molestia

Este criterio prioriza el tratamiento de aquel residuo que genere más molestias a las personas. Con el equipo se busca reducir tales molestias; de hecho, en la sección 4.3 Idealidad Tolerable ya se han definido los requerimientos mínimos para evitar las más importantes.

Las molestias se deben a los malos olores emitidos por los residuos, atracción de plagas, traslado, entre otros. Para el análisis se consideraron las molestias listadas en la Tabla 16. Se cuantificó el nivel de molestia que generan las primeras 11 a partir de una encuesta: se preguntó directamente a una muestra de personas qué es lo que más les desagrada de sus residuos, teniendo como referencia la lista mencionada. Las molestias 12, 13 y 14 no se incluyeron en la encuesta porque se considera que son menos importantes que las anteriores, pero de todas maneras han sido incluidas en el análisis de impacto, porque existen.

Tabla 30: Molestias que generan los residuos.

n°	Molestia
1.	Los residuos generan mal olor.
2.	Los residuos ocupan espacio.
3.	Los residuos son feos o desagradables a la vista.
4.	Los residuos son un foco de enfermedades.
5.	Los residuos atraen plagas (ratones, moscas, etc.).
6.	Los residuos provocan asco.
7.	Sacar la basura.
8.	Los animales escarban/juegan en la basura.
9.	La basura se cae y hay que recogerla.
10.	La basura está cerca de los niños.
11.	La bolsa de la basura se rompe.
12.	Los residuos ensucian
13.	Los residuos son peligrosos
14.	Los residuos cortan

Cada una de estas molestias fue asociada a residuos en particular. Se asignó, luego, un nivel de intensidad considerando presencia de la molestia en el residuo analizado y el puntaje asociado a

molestias, este último obtenido a partir de la encuesta (ver dichos puntajes en la Tabla 25). Finalmente, los resultados de intensidad se normalizaron para obtener un puntaje entre 0 y 1. Los resultados se muestran la Tabla 31, y la memoria de cálculo se encuentra en el Anexo D.4.

Tabla 31: Resultados del criterio de Molestia.

Indicador	Intensidad de la molestia				
	Plásticos	Orgánicos	Vidrios	Papeles y cartones	Metales
Intensidad de la molestia (I_m)	8,5	13,3	8,5	7,5	8,5
Puntaje normalizado I_m	0,17	1,00	0,17	0,00	0,17

Según este criterio, deben tratarse los residuos orgánicos, pues son los más molestos.

5.1.1.3 Residuos no tratados

Este criterio prioriza tratar aquel tipo de residuo que más se dispone en relleno sanitario (en otras palabras, el que menos se recicla). Según la ley, el reciclaje corresponde a una buena solución al problema de manejo de residuos, no así la disposición. Así, para estos últimos, la industria no posee una solución adecuada o no da abasto para tratarlo. Entonces, se pretende resolver el problema de los residuos que no poseen actualmente una solución apropiada.

Note el lector que un residuo con un alto impacto ambiental y social podría tener un gran flujo de residuos que se reciclan y un bajo flujo de residuos que se disponen. Así, este criterio no repite información de los criterios de impacto, sino que aporta nuevos datos.

A pesar de que la solución se enfoque en tratar los residuos que se disponen en relleno sanitario, de todas formas, un usuario que recicla sus residuos podría utilizar el equipo si esto le parece mejor.

Para cada residuo, se determina el flujo másico de la fracción que se dispone en relleno sanitario. Estos flujos se normalizan para obtener un puntaje entre 0 y 1. Los resultados se muestran en la Tabla 32. Los cálculos se presentan en el Anexo D.5

Tabla 32: Resultados del criterio de Residuos no tratados.

Indicador	Flujo de residuos no tratados [$\frac{g}{dia}$]				
	Plásticos	Orgánicos	Vidrios	Papeles y cartones	Metales
Residuos no tratados (F_{notrat})	78,5	727,6	303,3	77,7	75,1
Puntaje normalizado F_{notrat}	0,01	1,00	0,35	0,00	0,00

Según este criterio, los residuos orgánicos son los que deben ser tratado, pues presentan el mayor flujo de residuos que se disponen en relleno sanitario.

5.1.2 Análisis multicriterio

Un análisis multicriterio agrupa los diferentes criterios en una única evaluación. El objetivo es obtener un número que represente la urgencia de seleccionar cada residuo, donde el mayor valor haga referencia al peor residuo, aquel que debe ser tratado con urgencia, a partir de los 5 criterios considerados.

Se calcula un puntaje total para cada residuo a partir de los puntajes parciales obtenidos en cada criterio:

$$\begin{aligned} \text{Puntaje total residuo}_i & \qquad \qquad \qquad (2) \\ & = a \cdot (\text{Puntaje } I_a)_i + b \cdot (\text{Puntaje } I_{st})_i + c \cdot (\text{Puntaje } I_{stec})_i + \\ & \quad d \cdot (\text{Puntaje } I_m)_i + e \cdot (\text{Puntaje } F_{notrat})_i \end{aligned}$$

Donde a , b , c , d y e corresponden a ponderadores por determinar; y $i \in \{\text{plásticos, orgánicos, vidrios, papeles y cartones, metales}\}$.

A continuación, se explican en detalle cada uno de los términos de la fórmula para concluir el puntaje total de cada residuo.

5.1.2.1 Puntaje de los criterios

Los criterios de evaluación toman valores que se encuentran en diferentes rangos, y también poseen diferentes unidades. Por ejemplo, para los residuos estudiados, el impacto ambiental (I_a) toma valores desde 1 hasta 90 [UBP], aproximadamente; mientras que el flujo de residuos no tratados F_{notrat} desde 70 a 700 [$\frac{cm^3}{día}$]. Dichos valores no son comparables entre sí, y para la evaluación multicriterio es necesario que lo sean. Es por ello que los valores de los criterios se convierten en puntajes normalizados, que se encuentran todos en la misma escala y sin unidades.

Para cada criterio, se asigna un puntaje 1 al residuo que tome el mayor valor existente del criterio y 0 al que tome el menor, y el resto de los residuos toman un valor intermedio (de forma lineal). Los puntajes se muestran en las secciones anteriores, junto con los valores que toman los criterios (ver Tabla 27, Tabla 28, Tabla 29, Tabla 31 y Tabla 32).

5.1.2.2 Ponderadores

Los ponderadores responden a la importancia relativa que se le dé a cada uno de los criterios. Por ejemplo, para el diseñador podría ser más relevante tratar aquel residuo con mayor impacto ambiental que social, así que el ponderador a debería ser mayor al b .

La decisión de qué es más importante puede recaer en manos de diferentes actores importantes relacionados con el problema: se podría preguntar a personas de la RM su opinión o a expertos, por ejemplo. En el caso de este trabajo, la diseñadora decidirá la importancia de cada criterio.

Para calcular los ponderadores se realiza lo siguiente:

1. Definir importancia de cada criterio y confeccionar matriz de importancias relativas:

Se compara la importancia de cada criterio con el resto de los criterios, haciendo una evaluación de a pares, por ejemplo, se compara la importancia del criterio de impacto ambiental con el de impacto social del transporte, impacto ambiental con impacto social de la tecnología, etc., y se asigna un valor correspondiente que represente dicha importancia, según la escala de la Tabla 33.

Siguiendo con el ejemplo: si el impacto ambiental es mucho más importante que el impacto social del transporte, entonces se asigna un valor alto, por ejemplo 5. Sin embargo, si se compara el impacto social del transporte con el ambiental (solo se ha dado vuelta la comparación) se tiene que el primero es mucho menos importante que el segundo, y en ese caso el valor que se asigna es el inverso del impuesto en la comparación anterior, es decir, $1/5$. Entonces, note el lector que una misma comparación tiene dos valores distintos dependiendo de cuál es el criterio al que se está prestando atención.

Tabla 33: Valores que se asignan a los criterios según su importancia.

Valor importancia	Descripción
1	Igual importancia de ambas alternativas.
3	La importancia de la alternativa es moderada respecto a la otra. Experiencia y juicio inclinan levemente la balanza.
5	La importancia de la alternativa es significativa respecto a la otra. Experiencia y juicio inclinan de manera importante la balanza.
7	La importancia de la alternativa es fuerte respecto a la otra. El dominio de una alternativa está demostrado por la práctica.
9	La importancia de la alternativa es extrema respecto a la otra. El dominio de una alternativa es máximo y está demostrado por la práctica.

Para definir los valores de importancia de los criterios utilizados en este trabajo, se consideran tres ideas clave:

- Idea 1: Importa más el impacto ambiental que el social, porque el ambiental considera a todo el medio ambiente y no solo a las personas.
- Idea 2: El impacto social dentro de la casa (molestia) es levemente más importante que el impacto social fuera de esta, porque las molestias para los habitantes de una casa son más evidentes y directas que el impacto social en los habitantes de la ciudad.
- Idea 3: Los residuos no tratados redirigen la atención a los residuos que se disponen, siendo un complemento de los impactos, pero no es tan fundamental como el impacto ambiental.

Con lo anterior, se concluye la importancia relativa de cada criterio. El resultado se escribe en la siguiente matriz de importancias, donde los criterios que se encuentran en las filas se comparan con los que se encuentran en las columnas.

Tabla 34: Matriz de importancias de los criterios.

	Impacto ambiental	Impacto social del transporte	Impacto social de la tecnología	Residuos no tratados	Molestia
Impacto ambiental	1,00	5,00	5,00	3,00	3,00
Impacto social del transporte	0,20	1,00	1,00	0,50	0,50

Impacto social de la tecnología	0,20	1,00	1,00	0,50	0,50
Molestia	0,33	2,00	2,00	1,00	1,00
Residuos no tratados	0,33	2,00	2,00	1,00	1,00

2. Sumar y promediar filas y columnas

Se suman las filas de la matriz para cada columna de la Tabla 34, y se obtiene el resultado que muestra la Tabla 35.

Tabla 35: Matriz de importancia de los criterios, incluyendo la suma de las filas.

	Impacto ambiental	Impacto social del transporte	Impacto social de la tecnología	Residuos no tratados	Molestia
Impacto ambiental	1,00	5,00	5,00	3,00	3,00
Impacto social del transporte	0,20	1,00	1,00	0,50	0,50
Impacto social de la tecnología	0,20	1,00	1,00	0,50	0,50
Molestia	0,33	2,00	2,00	1,00	1,00
Residuos no tratados	0,33	2,00	2,00	1,00	1,00
Suma	2,1	11,0	11,0	6,0	6,0

Luego, los valores de cada fila se dividen por la suma de dicha columna, para normalizar. Los resultados de cada fila se promedian. En la Tabla 36 se muestran los valores finales.

Tabla 36: Matriz de importancia de los criterios, con valores normalizados y promedio.

	Impacto ambiental	Impacto social del transporte	Impacto social de la tecnología	Residuos no tratados	Molestia	Promedio
Impacto ambiental	0,48	0,45	0,45	0,50	0,50	0,48
Impacto social del transporte	0,10	0,09	0,09	0,08	0,08	0,09
Impacto social de la tecnología	0,16	0,18	0,09	0,17	0,17	0,17
Molestia	0,16	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17
Residuos no tratados	0,16	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17

Los valores promedios corresponden a los ponderadores respectivos de los criterios:

Tabla 37: Valores de los ponderadores.

Ponderador	Valor
<i>a</i>	0,48
<i>b</i>	0,09
<i>c</i>	0,17
<i>d</i>	0,17
<i>e</i>	0,17

5.1.2.3 Puntaje total de residuo

Teniendo claros los ponderadores y los puntajes de los criterios para residuo, es posible determinar el puntaje total de cada residuo según la Ecuación (2). Los resultados se muestran en la Tabla 38:

Tabla 38: Resultado final - Puntaje total para cada residuo.

	Residuos				
	Plásticos	Orgánicos	Vidrios	Papeles y cartones	Metales
Puntaje total	0,08	1,08	0,19	0,05	0,03

Los residuos orgánicos son los que presentan el mayor puntaje total, esto quiere decir que, según los criterios de impacto ambiental, impacto social y flujo de residuos no tratados, son los residuos que más generan problemas. Con esto, se concluye que se deben tratar los **residuos orgánicos**.

Este resultado es evidente, pues en todos los criterios el puntaje de los residuos orgánicos era el mayor. El mismo resultado se pudo haber concluido sin el análisis multicriterio. Se realizó de todas formas para que el lector lo tome como referencia y pueda aplicarlo en sus propios análisis.

Los cálculos detallados se encuentran en el Anexo D.

5.1.3 Reflexiones

Se ha concluido que deben tratarse los residuos orgánicos. Este residuo es interesante porque es un producto directo de la naturaleza.

Como recordará el lector, en el Capítulo 1 Introducción se planteó que un residuo es todo objeto que no es capaz de reintegrarse a un contexto ni aporta beneficios a las personas u otro ser vivo, sin requerir un tratamiento para lograrlo. El lector sabe que en la naturaleza no existen los residuos, pues todos los elementos se reincorporan a la naturaleza a través de ciclos. Lamentablemente, esos mismos elementos orgánicos pueden constituir residuos cuando se vuelven parte de la vida de los seres humanos, como los alimentos, pues ya no son capaces de reincorporarse a la naturaleza ni entregar sus beneficios a ella porque el contexto lo impide. ¡Incluso, pueden generar importantes impactos negativos, como los que se han descrito en este capítulo!

Entonces, cabe preguntarse: ¿se pueden diseñar mejores objetos orgánicos para que nunca constituyan residuos?, ¿o acaso es el contexto el que debería cambiar para permitir que estos elementos cumplan su rol natural? Se podría, con la ingeniería genética y otras disciplinas, adecuar la naturaleza a los deseos de la humanidad, sin embargo, la diseñadora se inclina por una solución que no implique alterar el contexto natural, sino que adaptar la conducta humana para convivir con

el resto de la naturaleza. Estas preguntas son más fáciles de responder para objetos que tienen un origen distinto, por ejemplo, los plásticos, que son producto de la actividad humana. En este caso, no causa dudas rediseñarlos para que siempre sean útiles (¿o será más pertinente dejar de producir objetos plásticos?).

Por supuesto, todo esto escapa de los límites del Trabajo de Título. Sin embargo, se invita al lector a reflexionar sobre el tema, pues son este tipo de interrogantes las que definirán el futuro del planeta.

Finalmente, en efecto, los restos de alimentos, poda y jardinería constituyen residuos. En este trabajo se abordará una solución para integrarlos al contexto a través de un tratamiento.

5.2 CASO BASE

El caso base corresponde al flujo másico de residuos orgánicos a tratar en el equipo.

El flujo se define a partir de cuántos residuos se desean tratar en cada vivienda, considerando que dicho flujo tendrá repercusiones en el tamaño del equipo y el tiempo de residencia de los residuos, que son aspectos claves en el diseño. Así, existen 3 variables a considerar para definir el caso base. Ponga atención el lector en la sincronía de los efectos de estas variables. Algunas serán deseables de aumentar para los usuarios; otras, de disminuir. Las variables son:

- (i) Flujo generado por vivienda: idealmente, se desea que todos los residuos orgánicos generados en una vivienda sean tratados con el equipo. Así, a mayor caso base, más residuos pueden tratarse.
- (ii) Tamaño del equipo: debe ser pequeño para poder ser instalado en viviendas con espacio reducido, como los departamentos. Para un tiempo de residencia fijo, al aumentar el caso base, el tamaño del equipo crece, pues debe contener más masa de residuos.
- (iii) Tiempo de residencia: corresponde al tiempo en que los residuos permanecen dentro del equipo siendo tratados. Este tiempo se determina a partir de la tecnología utilizada para tratar a los residuos. Por ejemplo, incinerar toma un par de horas, mientras que compostar decenas de días. Para un volumen de equipo fijo, si se aumenta el caso base, el tiempo de residencia de los residuos se reduce.

A continuación, se deduce y explica la metodología seguida para definir el caso base.

5.2.1 Metodología para la determinación del caso base

Para definir el caso base, se debe tener presente que el flujo generado por vivienda varía de sector en sector. Si bien se tiene un promedio regional, este podría estar subestimado o exagerado para algún sector. Así, si se escoge como caso base el promedio, en las viviendas de algunos sectores no se podrían tratar todos los residuos y en otros el equipo estaría sobredimensionado, funcionando a una baja capacidad.

Por otro lado, si se escoge como caso base el mayor flujo de residuos existente, el equipo funcionaría a baja capacidad en la mayoría de los sectores. Si bien en este caso se podría tratar siempre todos los residuos generados, el equipo sería grande, lo que podrían ser perjudicial.

Otra opción es que el equipo ajuste su caso base según el contexto y evitar los problemas anteriores. Esto puede lograrse si el equipo es modular: el equipo es pequeño y tiene un caso base reducido, y pueden acoplarse varios equipos entre sí para lograr tratar un flujo mayor. Esta alternativa provoca que en las viviendas donde exista un bajo flujo de residuos, el espacio ocupado por los equipos sea bajo; mientras que en las viviendas donde sea alto, el espacio ocupado por los equipos sea mayor. Se opta por esta alternativa pues es más flexible que las anteriores, y se buscará minimizar el volumen ocupado por los equipos.

Se evaluará el caso en que los sectores con un flujo de residuos orgánicos por vivienda en el menor 20% de la RM tengan un equipo por vivienda y los demás sectores tengan 2 o más equipos; también se evaluará un caso análogo, pero con un corte en el 40%, es decir, asignando un equipo a aquellos sectores con un flujo de residuos por vivienda en el menor 40% de la Región. Cabe señalar que el mencionado 20% corresponde a un sector; y el 40%, a dos.

Respecto al tiempo de residencia, el lector tendrá que adelantarse al futuro para conocer su valor. En capítulos posteriores se decide que la tecnología para tratar residuos es la digestión anaeróbica, cuyos tiempos de residencia rodean los 30 días. Así, se impone un tiempo de residencia al menos de 30 días. En el dimensionamiento se definirá con mayor precisión el tiempo, por el momento se asumirá el valor mencionado como cota.

Para definir el caso base, entonces, se evaluarán diferentes magnitudes de flujo para lograr el número de equipos deseados y minimizar el volumen ocupado por estos, asumiendo el tiempo de residencia mencionado anteriormente. Los pasos son los siguientes:

1. Imponer un flujo másico como caso base:

Este flujo debe ser tal que el número de equipos utilizados sea 1 en el sector que menos residuos genera o que sea 1 en los dos sectores que menos residuos generan.

Para determinar el número de equipos de cada sector, se divide el flujo promedio de residuos generados del sector por el caso base.

2. Definir volumen del equipo:

Se define el volumen del equipo para permitir que el tiempo de residencia sea de 30 días o más.

Para determinar el tiempo de residencia, se divide el volumen del equipo por el flujo volumétrico de residuos del caso base.

3. Obtener volumen ocupado en cada sector:

Para obtener el volumen utilizado por los equipos en cada sector, se multiplica el número de equipos por el volumen del equipo. Este resultado se guarda para compararlo con los próximos resultados.

4. Repetir pasos del 1 al 3, para un nuevo flujo másico (caso base).

5. Comparar los resultados obtenidos:

Los resultados obtenidos se comparan entre sí y se escoge aquel caso que permita minimizar el volumen utilizado por los equipos. Los volúmenes del caso escogido deben ser razonables pensando en las viviendas en que serán instalados los equipos, si no, será necesario cambiar la estrategia.

5.2.1.1 *Flujos de residuos a considerar*

Los datos de flujo que deben ser utilizados para realizar los cálculos descritos en la metodología fueron obtenidos a partir de una encuesta y se estima que tienen un error del 30% (ver sección 3.2.3.1 Residuos generados), es decir, los valores reales podrían ser un 30% superiores a lo calculado o un 30% inferiores.

Si se utilizan los datos puros para determinar el caso base, se pueden presentar dos problemas excluyentes en el dimensionamiento:

- (i) Los flujos reales son un 30% mayores a los flujos puros. En consecuencia, el dimensionamiento del equipo ha subestimado el flujo de residuos a tratar. Con esto, parte de los residuos deben ser descartados. La solución es calcular el caso base con los datos aumentados un 30%.
- (ii) Los flujos reales son un 30% menores a los flujos puros. En consecuencia, el dimensionamiento del equipo ha sobreestimado el flujo de residuos a tratar. Con esto, el equipo es más grande que lo necesario. La solución es calcular el caso base con los datos reducidos un 30%.

No es posible saber qué problema se presentará, pero se considera más grave el primero, pues se ha definido como mínimo tratar los residuos habitualmente generado en las viviendas (ver la sección 4.3 Idealidad Tolerable). Así, los datos de flujo utilizados (desde ahora, denominados flujos del peor caso), corresponderán al 130% de los flujos de los datos puros, para dar abasto al peor caso.

Además de lo anterior, se debe tener en cuenta que los flujos del peor caso representan la generación habitual de residuos en los sectores. Sin embargo, podrían existir eventos donde se generen más residuos de lo normal. Sobre lo anterior, se puede escoger alguna de las siguientes alternativas:

- (i) Incluir un rango de seguridad en los datos, es decir, exagerar los datos de flujo generado. Un rango común es del 20%. En este caso, el equipo podría tratar todos los residuos generados, incluso en eventos que se salgan del promedio, sin que ningún residuo sea descartado al relleno sanitario. La desventaja es que el equipo aumentaría su tamaño.
- (ii) No incluir rango de seguridad. En este caso, los residuos generados en eventos que se salen del promedio no podrían ser tratados, así que deberían descartarse al relleno sanitario. La ventaja, sin embargo, es que el equipo es más pequeño que en el caso anterior.

Idealmente, se desean tratar todos los residuos orgánicos generados, sin embargo, el contexto es restrictivo en espacio, por lo que un equipo grande podría imposibilitar su instalación en algunas

viviendas. ¿Es aceptable el aumento de volumen para tratar los residuos en eventos esporádicos? Considerando la conducta habitual de la población, se asumirá como hipótesis que resulta más grave para las personas utilizar más espacio que no tratar todos sus residuos en algunos eventos esporádicos. Así, se opta por no incluir rango de seguridad.

Este tipo de decisiones pertenecen a este siglo, cuando el uso extra de recursos tiene una importancia especial. La lógica del peor caso o de la cobertura total no necesariamente está bien adaptada a todas las decisiones de ingeniería. Así, en el s. XXI es razonable, en algunos casos, comprometer cobertura por uso eficiente de recursos.

De todas formas, para que el lector note el aumento de volumen del equipo, se aplicará la metodología en dos escenarios:

- (i) Escenario 1: con inclusión de rango de seguridad en los datos.
- (ii) Escenario 2: sin inclusión de rango de seguridad en los datos.

5.2.2 Resultados

En la Tabla 39 se muestran los resultados obtenidos para el escenario en el que se utilizaron datos con inclusión de rango de seguridad; y en la Tabla 40, los resultados para el escenario sin datos de seguridad. En ambos escenarios, los casos 1 y 2 permiten que el sector con menor flujo de generación de residuos (sector 6) tenga solo un equipo, mientras que el caso 3 permite que los dos sectores con menor generación (sector 3 y sector 6) tengan un equipo, esta vez de mayor tamaño.

En cada escenario, es decir, con y sin rango de seguridad, se han comparado los casos evaluados: para cada sector en los diferentes casos se determinó el tiempo de residencia, es decir, el volumen del equipo dividido en el flujo específico del sector. El valor óptimo es 30 días, y cualquier valor mayor indica que existe capacidad ociosa. Se ha concluido que el mejor caso corresponde al primero en ambos escenarios, pues presentan los mínimos tiempos de residencia.

El caso 1 del escenario 1 presenta un volumen 25% superior al caso 1 del escenario 2, presentándose una diferencia de tiempos de residencia de 2 días aproximadamente.

Considerando lo anterior, el caso 1 del escenario 2 define el caso base y también los valores máximos de volumen y tiempo de residencia. Se concluye que este caso es factible, pues los volúmenes totales de equipo son aceptables para cada sector:

Se consultó a los encuestados que viven en departamento si aceptarían un equipo de 80 [l] y a todos les pareció posible tener un equipo de tales dimensiones en sus viviendas. También se preguntó a las personas que viven en casas si un equipo de 200[l] podría ser instalado en sus viviendas, y les pareció posible.

Considere el lector que los sectores 2 y 3 están representados por casas y departamentos, y el volumen total de equipos corresponde a 80 [l]. Los sectores 4 y 5: están representados por casas, y el volumen total es de 200 y 160 [l], respectivamente. El sector 6 está representado por departamentos y casas, y el volumen total es de 40 [l].

En resumen, el caso base queda definido por un flujo del peor caso de $600 \left[\frac{g}{día} \right]$. Además, el volumen máximo del equipo es de 40[l] y el tiempo de residencia máximo es 30,4 [días].

Tabla 39: Resultados del escenario 1 (datos con rangos se seguridad).

	Valores impuestos			
	Volumen equipo (externo) [L]	Flujo de residuo [$\frac{g}{día}$]		Tiempo de residencia [días]
		Del peor caso	De seguridad	
Caso 1	50	580	696	32,8
Caso 2	58	680	816	32,4
Caso 3	65	780	936	31,7

	Resultados: Volumen total de equipos [L]						Resultados: Tiempo de residencia [días]					
	Sector						Sector					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Caso 1	0	100	100	250	200	50	0	57,57	63,37	43,2	44,4	43,3
Caso 2	0	116	116	290	232	58	0	66,78	73,51	50,1	51,5	50,3
Caso 3	0	130	65	260	195	65	0	74,84	41,19	44,9	43,3	56,3

Tabla 40: Resultados del escenario 2 (datos sin rango de seguridad).

	Valores impuestos			
	Volumen equipo (externo) [L]	Flujo de residuo [$\frac{g}{día}$]		Tiempo de residencia [días]
		Del peor caso		
Caso 1	40	600		30,4
Caso 2	50	700		32,6
Caso 3	55	780		32,2

	Resultados: Volumen total de equipos [L]						Resultados: Tiempo de residencia [días]					
	Sector						Sector					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
Caso 1	0	80	80	200	160	40	0	55,3	60,8	41,5	42,6	41,6
Caso 2	0	100	100	200	200	50	0	69,1	76,0	41,5	53,2	52,0
Caso 3	0	110	55	220	165	55	0	76,0	41,8	45,6	43,9	57,2

5.3 REFLEXIONES FINALES SOBRE LA ELECCIÓN DE RESIDUO Y CASO BASE

En este capítulo se ha definido el residuo a tratar y el caso base.

Luego de un análisis multicriterio de los impactos ambiental y social, considerando el flujo de residuos que se dispone en relleno sanitario, se ha concluido que deben ser tratados los residuos orgánicos, constituidos por residuos de alimento y restos de poda y jardín.

Se ha decidido el caso base a partir de los flujos de residuos generados en las viviendas, el tamaño del equipo y el tiempo de residencia de los residuos en el mismo. Se determinó un flujo de $600 \left[\frac{g}{día} \right]$ a tratar. Además, se pudo definir límites máximos para el tamaño del equipo y tiempo de residencia de 40 [l] y 30,4 [días], respectivamente.

Los resultados obtenidos podrían diferir si el análisis es realizado en otro tiempo: posiblemente hace 50 años, los flujos de residuos generados eran menores y su contenido de plásticos menor, debido al estilo de vida la población. Así, se espera que en el futuro las características de los residuos cambien respecto a la actualidad. Por lo tanto, para que el equipo se encuentre bien adaptado a la realidad debería realizarse un nuevo análisis del contexto para concluir la información correcta cada cierto tiempo. Se propone cada 10 años.

Capítulo 6

BENEFICIO PRINCIPAL

En este capítulo se define el beneficio principal del equipo: el producto generado. Además, se determina el tipo de tratamiento a utilizar para obtener dicho producto.

En el Capítulo 5 Elección de Residuo y Caso Base se ha concluido que la materia prima a tratar corresponde a residuos orgánicos, compuestos por restos de alimentos y residuos de poda y jardín. En la siguiente sección se explican los productos que se pueden obtener con el procesamiento de los sustratos mencionados, y luego se concluye el producto y tratamiento más adecuados al contexto.

6.1 PRODUCTOS Y PROCESOS

De los residuos orgánicos se pueden obtener productos energéticos y materiales, por ejemplo, calor con la combustión de la materia prima y compost de su degradación biológica, respectivamente. La energía se obtiene a partir de procesos de valorización energética; y los materiales, mediante reciclaje, principalmente.

El lector, siguiendo la jerarquía de manejo de residuos, se preguntará porqué se ha dejado fuera la reutilización de la materia orgánica, es decir, aprovecharla directamente sin previo tratamiento o procesamiento. La razón es que se descompone rápidamente, lo que dificulta su reutilización. El lector se habrá dado cuenta de que los restos de comida, luego de un par de días, comienza un proceso de putrefacción, generando olores molestos y atrayendo plagas; dicha descomposición ocurrirá siempre de forma natural, a menos que se intervenga el proceso. Imagine que rellena botellas plásticas para hacer ecoladrillos, emulando lo que se puede hacer para reutilizar residuos plásticos en una pequeña escala: inevitablemente la materia orgánica se descompondrá biológicamente de forma anaeróbica, generando gases, lo que podría provocar que la botella explote. Una solución puede ser secar los residuos para reducir la degradación, pero esto ya no constituiría una acción de reutilización, pues los residuos se han procesado.

Lo anterior podría no aplicar para residuos de poda y jardín, como ramas y hojas, ya que estas se degradan en años, es decir, más lento que los alimentos que se degradan en días o meses. En el tiempo que les toma degradarse, las ramas y hojas podrían ser aprovechadas, por ejemplo, como adornos o juguetes. Estas opciones no se analizan, pues su impacto y utilidad se consideran menores a las que provee el reciclaje y valorización energética. Además, su confección corresponde a una manualidad más que a un proceso, alejándose de los objetivos del Trabajo de Título.

Entonces, las opciones de proceso a analizar son el reciclaje y valorización energética. A continuación, se explican los productos energéticos y materiales que pueden obtenerse mediante dichos procesos, y las características de estos.

6.1.1 Energía

La materia orgánica contiene energía química almacenada en sus moléculas orgánicas y enlaces, que puede ser liberada en forma de calor por la ruptura de enlaces. Generalmente, el uso de este sustrato no es directo, sino que se transforma en otro tipo de combustible más afín con el contexto. En la materia orgánica existen moléculas inorgánicas (agua, minerales, metales, inertes, etc.) que no aportan energéticamente, por lo que son retiradas del producto final [30].

Las alternativas de transformación de la biomasa se pueden clasificar en dos grandes grupos: bioquímicas y termoquímicas. Cada camino tiene diferentes procesos asociados que varían según el tipo de materia orgánica que reciben y el producto obtenido, como se muestra en la Figura 10.

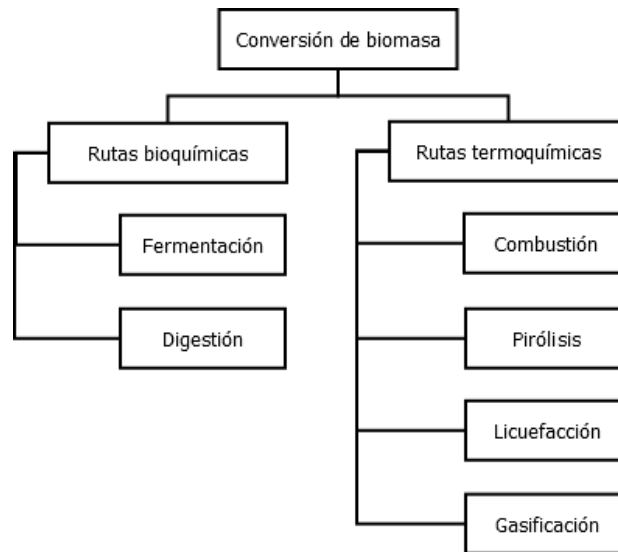


Figura 10: Rutas de conversión de biomasa y sus procesos. Elaboración propia con información de [30].

En el caso de las conversiones bioquímicas, las moléculas orgánicas de la biomasa son degradadas en partículas más pequeñas mediante la acción de microorganismos.

Por otro lado, en las rutas termoquímicas, los procesos de transformación por altas temperaturas (sobre los 200 [°C]) y no intervienen agentes vivos. La opción a altas temperaturas requiere un consumo energético para llevarse a cabo, pero las cinéticas de cambio son mucho más rápidas [30].

En la siguiente tabla comparativa se describen los procesos, las condiciones de operación, propiedades y las características de los productos obtenidos.

Tabla 41: Técnicas utilizadas para el tratamiento de materia orgánica con producción de energía [31].

Tratamiento	Descripción	Materia prima	Condiciones de operación	Productos	Poder calorífico y rendimiento	Usos posibles de productos
Combustión	Oxidación completa del contenido de carbono e hidrógeno de un combustible. Proceso exotérmico. La energía térmica se obtiene directamente de la materia prima.	Residuos vegetales, estiércol de animales y madera, siendo este último el más utilizado.	Presencia de oxígeno.	Gas: H ₂ O, CO ₂ y, si existen impurezas en la biomasa, NO _x y SO _x . Sólido: Cenizas (sustancias inorgánicas no combustibles). Calor: producto principal.	Madera: 20 MJ/kg Orgánicos sin secar: 13,2 MJ/kg [5] Rendimiento: 100%.	Sólido: fertilizante. Calor: climatización de ambientes, generación eléctrica.
Pirólisis a alta temperatura	Degradación de la materia orgánica, mediante el calentamiento de esta, para generar combustibles. Proceso endotérmico.	Residuos vegetales, caucho y materiales leñosos, siendo estos últimos los más estudiados.	Ausencia de oxígeno. Temperatura: 400 – 1000 [°C]. Presión: 0,1 – 1 [bar]. Tiempo de residencia < 0,5 [s] hasta días. Humedad de materia prima < 15%	Gas: CO, CO ₂ , CH ₄ , H ₂ (< 70% de masa total). Aceite: hidrocarburos, ác. orgánicos, H ₂ O, impurezas. (<80% de masa total). Sólido (Charcoal): hidrocarburos y ceniza. (< 35% de masa total) . Las proporciones varían según condiciones de operación.	Gas: 2 – 20 $\left[\frac{MJ}{nm^3}\right]$ Líquido: 10 – 23 $\left[\frac{MJ}{kg}\right]$ Sólido: 30 $\left[\frac{MJ}{kg}\right]$ Rendimiento: 80% – 90% Rendimiento (si se requiere producir solo gas): 70%.	Gas: combustión, generación eléctrica Líquido: combustión, uso en motores adaptados, se puede gasificar. Sólido: combustión, generación eléctrica.
Pirólisis a baja temperatura	Degradación de la materia orgánica, mediante el calentamiento de esta, para generar combustibles.	Residuos vegetales, caucho y materiales leñosos, siendo estos últimos los más estudiados.	Ausencia de oxígeno. Temperatura: 100 – 300 [°C].	Gas: impurezas y agua. (86% de masa total). Sólido: hidrocarburos, cenizas. (14% de masa total).	Sólido: 20 $\left[\frac{MJ}{kg}\right]$ Rendimiento: 80% – 90%	Sólido: combustión, generación eléctrica.

	Proceso endotérmico. La tecnología de producción de gases incipiente.		Humedad de materia prima < 15%			
Licuefacción	Degradación de biomasa e hidrogenación, para generar un combustible. Proceso endotérmico. Tecnología incipiente.	Residuos urbanos, agrícolas, pecuarios y forestales.	Ausencia de oxígeno. Vapor de agua y CO ₂ . Temperatura: 250 – 450 [°C]. Presión: 120 – 180 [bar]. Requiere catalizador. Tiempo de residencia: minutos.	Gas hidrocarbonado, que se condensa para formar un líquido .	Líquido: 33,5 $\left[\frac{MJ}{kg}\right]$ Rendimiento: 50% – 55%	Líquido: combustión.
Gasificación	Proceso termoquímico que transforma la materia orgánica en un gas combustible, mediante un conjunto de reacciones con agua y/u oxígeno. Proceso exotérmico y autógeno.	Residuos orgánicos urbanos, vegetales, cauchos, materiales leñosos, siendo estos últimos los más estudiados.	Requiere de un agente gasificante, que puede ser agua y/u oxígeno. Humedad de la materia: 10% – 15% . Temperatura: 600 – 1200°[C].	Dependiendo del agente gasificante, se obtienen diferentes tipos de gases; con aire se obtiene gas de bajo poder calorífico, mientras que con vapor de agua y oxígeno se obtiene syngas: Gas pobre: 11 – 30% de CO, 6 – 16% de CO ₂ , 10 – 20% de H ₂ , 1 – 15% de CH ₄ y 50% de N ₂ .	Gas pobre: 4 – 7 $\left[\frac{MJ}{nm^3}\right]$ Syngas (vapor de agua): 10 – 18 $\left[\frac{MJ}{nm^3}\right]$ Syngas (oxígeno): 12 – 28 $\left[\frac{MJ}{nm^3}\right]$ Rendimiento 70 – 80%	Syngas: Sustituto gas natural, combustible para generadores de electricidad.

				Syngas: 40 – 50% de CO, 10 – 20% de CO ₂ , 25 – 80% de H ₂ y 4 – 8% de CH ₄ .		
Gasificación con metanación	Producción de metano (combustible) mediante el uso de catalizadores.	Corriente gaseosa rica en CO ₂ , CO y H ₂ .	Temperatura entre 200 y 500 [°C] . Presión de 19 atm, aproximadamente	Gas: Metano, H ₂ O	Metano: 55,4 $\left[\frac{MJ}{kg}\right]$ Rendimiento: conversión del 90% o superiores	Gas: combustible de generadores.
Fermentación	Degradación de la materia orgánica a partir de enzimas y levaduras, para generar un combustible.	Materia orgánica rica en azúcares (glucosa)	Presión atmosférica y temperatura óptima de funcionamiento del microorganismo (22 – 29 [°C])	Líquido: Etanol, microorganismos Gas: CO ₂	Líquido: 26,7 – 29,8 $\left[\frac{MJ}{kg}\right]$ Rendimiento no estandarizado.	Líquido: combustible de generadores.
Digestión anaeróbica	Descomposición de materia orgánica por medio de bacterias anaeróbicas, para generar un combustible.	Residuos orgánicos como verduras, pastos, desechos animales.	Temperatura de 25 – 42 [°C]. Valor de pH de 5,2 a 6,3. Ausencia de oxígeno.	Biogás: formado principalmente de metano (71%) y CO ₂ (29%). Lodo: materia orgánica estabilizada	Biogás: 21,6 $\left[\frac{MJ}{m^3}\right]$	Biogás: combustible de generadores, sustituto del gas natural Lodo: propiedades de fertilizante

6.1.2 Materiales

De los residuos orgánicos se pueden obtener materiales para distintos fines. En la Tabla 42 se muestran los productos posibles de generar y su descripción, la materia prima y el proceso de producción.

Tabla 42: Productos materiales obtenidos del procesamiento de materia orgánica.

Material (producto)	Descripción	Materia prima	Proceso
Tejidos de hojas de piña [32]	Tejidos que pueden ser utilizados para elaborar ropa y calzado. Idea desarrollada por Piñatex.	Hojas de piña.	Las hojas se cortan y se forman fibras, que luego son procesadas para generar textiles.
Cuero vegetal [33]	Material que reemplaza al cuero de origen animal. Se utiliza para elaborar zapatos, bolsos, entre otros. Esta idea ha sido desarrollada por Fruitleather Rotterdam.	Residuos de frutas.	Se genera a partir de la maceración, cocción y secado de residuos de fruta.
Almidón termoplástico [34]	Bioplástico que se utiliza para la elaboración de bolsas, material de empaque y envases para alimentos.	Almidón, usualmente de maíz o papa.	Se genera a partir de la plastificación del almidón, resultado del proceso de extrusión (proceso mecánico de moldeado) y la acción de plastificantes (glicerina, sorbitol, xilitol, entre otros). Con un proceso similar se puede producir bioplástico de celulosa, caseína y gluten.
Ácido poliláctico (PLA) [34]	Bioplástico poliéster utilizado para la elaboración de vasos, copas y envases de alimentos.	Almidón, usualmente de maíz o papa.	Se obtiene por la polimerización del ácido láctico resultante de la fermentación microbiana de azúcares.
Poli-hidroxicanoatos (PHA): Poli-hidroxi-butilato (PHB) [34]	El PHA es un bioplástico poliéster alifático, utilizado para la elaboración de contenedores de productos cosméticos, en productos higiénicos femeninos, utensilios, productos de embalaje y bolsas. Un PHA muy utilizado es el PHB, que es un sustituto del polipropileno.	Para generar PHB se pueden utilizar residuos de la industria láctea y del azúcar.	El bioplástico se sintetiza y se almacena en el citoplasma de la célula como reserva de carbono y energía en forma de cuerpos insolubles. Las bacterias que generan PHB se alimentan de azúcares, principalmente sacarosa, fructosa y glucosa.

Extractos [35]	Los extractos de materia orgánica tienen diferentes fines. Por ejemplo, se pueden extraer nutrientes para suplementos alimenticios [35]; sustancias tóxicas para su utilización como pesticidas o plagas [36]; y pigmentos coloreados para cosméticos [35].	Frutas, verduras, hojas y flores.	Depende de la sustancia que se desea extraer.
Compost [31]	Abono natural que es benéfico para el crecimiento de las plantas, que provee a la tierra restauración de carbono y formación de humus.	Frutas, verduras, ramas, hojas, etc.	Se genera de la descomposición de materia orgánica por medio de bacterias aeróbicas. Este proceso se denomina compostaje y es parte del ciclo del carbono.

6.2 CRITERIOS DE SELECCIÓN

Para decidir el producto a generar y tipo de tratamiento se consideran 3 criterios: la utilidad del producto, el impacto ambiental asociado y la factibilidad del tratamiento. Cabe mencionar que se analiza solo la utilidad de producto y no el impacto social porque se han definido criterios que deben cumplirse para no perjudicar el contexto social (ver sección 4.2.2.2 Conducta de generación), independiente del tipo de solución.

6.2.1 Utilidad

Generar energía podría ser conveniente para los usuarios, pues permitiría reducir sus cuentas de energía. Considere el lector que en Chile existe pobreza energética: muchos hogares son incapaces de pagar sus servicios de energía para la satisfacción de sus necesidades domésticas y/o se ven obligados a destinar una parte excesiva de sus ingresos a pagar la factura energética de su vivienda. Esto se debe a los altos costos de la energía en el país y los bajos ingresos de los hogares pobres [37]. Como referencia, en el año 2016 el precio de la electricidad para los hogares en Chile fue de $\$124 \left[\frac{US}{MWh} \right]$, $\$24 \left[\frac{US}{MWh} \right]$ sobre el promedio de los países de la OCDE [38], y es el país con el precio más alto en América Latina [39]. Por otro lado, Chile es el país de la OCDE con mayor desigualdad de ingreso (coeficiente de Gini); los ingresos del 10% más rico en Chile son 26 veces más altos que los del 10% más pobre [40].

Cabe recalcar que la energía es una necesidad transversal para las personas pues se requiere para cocinar, calefaccionar ambientes y calentar agua, por lo tanto, si el equipo genera energía sería útil para la mayoría de los usuarios.

Los residuos orgánicos pueden ser utilizados directamente como combustibles sólidos, o bien pueden transformarse en combustibles gaseosos, líquidos u otros sólidos. Los combustibles gaseosos usualmente presentan una composición más homogénea que líquidos y sólidos, pues la red de reacciones involucradas en la producción de estos últimos es más compleja que la de gases, generando más variedad de productos moleculares; una excepción a lo anterior es la fermentación con producción de etanol (líquido), ya que es un sistema biológico específico cuyo producto principal

es el etanol. Por lo tanto, el poder calorífico del gas es más homogéneo comparado con líquidos y sólidos. Como consecuencia, el rendimiento es más estable.

Por otro lado, la eficiencia de los combustibles gaseosos es mayor porque el contacto entre combustible y comburentes es más íntimo, debido a la menor resistencia a la transferencia de masa en estos sistemas.

Es conveniente que el combustible tenga un rendimiento estable y una alta eficiencia, asegurando con ello que la quema del combustible genere el calor máximo posible de forma constante, sin variaciones en la potencia.

Así, es más provechoso generar un producto gaseoso. Por lo tanto, los procesos más atractivos según utilidad son: pirólisis de alta temperatura, fermentación, digestión anaeróbica y gasificación (con y sin metanación).

Los productos materiales podrían ser útiles dependiendo del contexto. Por ejemplo, para algunos usuarios podría ser poco beneficioso generar textiles para confeccionar ropa o paños, pues no son artículos que requiera renovar continuamente y que signifiquen un costo importante; o producir pigmentos coloreados podría ser inútil para usuarios que no usen cosméticos. Situaciones análogas ocurren para los cueros vegetales, bioplásticos y extractos en general.

Para analizar el compost, es momento de que el lector recuerde que la utilidad ha sido definida en este trabajo (ver sección 1.1.1 Conceptos) como el beneficio generado por un producto a una persona u **otro ser vivo**. El compost es altamente útil para la naturaleza, pues es rico en humus y tiene valiosos nutrientes para las plantas, mejora la tierra para la agricultura, el paisajismo y aplicaciones hortícolas. Mejora las características físicas, químicas y biológicas de la tierra donde es aplicado y permite la degradación de contaminantes basados en petróleo y reduce la biodisponibilidad de metales pesados. El compostaje es parte del ciclo del carbono: todo elemento orgánico debe ser reincorporado a la tierra para nutrir a otros seres. Por lo tanto, producir compost aporta en el equilibrio de carbono en el planeta.

Si bien el compost resulta ser útil para la naturaleza, para algunos usuarios esto podría no ser importante, pues no tienen plantas o cultivos donde utilizarlos y, por lo tanto, podrían no querer generar compost con el equipo. Es absolutamente necesario que el usuario esté de acuerdo con el producto generado para que el proyecto sea implementable. Así, en este caso el problema recae en sensibilizar al usuario respecto al beneficio del compost; en este caso no es necesario que el usuario cuente con plantas, sino que puede regalarlo a otras personas o cederlo a los municipios para los parques y plazas.

En conclusión, el compost y combustibles gaseosos presentan altos atractivos según utilidad.

6.2.2 Impacto ambiental

Por regla general, el impacto ambiental del reciclaje es menor que el de la valorización energética; así también lo prefiere la jerarquía del manejo de residuos.

Un análisis somero de la termodinámica permite concluir que el ciclo de vida del compost, textiles y cueros vegetales generan un menor impacto ambiental que el de los bioplásticos y extractos. Un sistema que se aleja termodinámicamente del planeta Tierra previo a la industrialización genera

impacto ambiental negativo; la producción y uso de bioplásticos y extractos requieren procesos de purificación, polimerización, entre otros, que reducen la entropía alejándose del sistema basal. Por otro lado, se espera que la producción y uso del compost, los textiles y los cueros tengan un menor impacto, pues el primero siempre se ha generado naturalmente, siendo fundamental en el ciclo del carbono, y los últimos tienen asociados procesos sencillos en comparación con la producción de bioplástico y extractos. Estos últimos son significativamente diferentes a la Tierra y sus procesos de producción.

Respecto a los procesos de valorización energética, cabe destacar que, entre ellos, la digestión anaeróbica podría ser la alternativa que genera menor impacto ambiental negativo, debido a que: (i) ocurre de forma natural; (ii) requiere de condiciones menos exigentes que el resto; y (iii) la combustión del producto generado (gas metano) es más eficiente que la combustión de un sólido (por ejemplo, combustión directa de residuos) o líquido (por ejemplo, combustión de etanol) o un gas de mayor peso molecular (por ejemplo, combustión de hidrocarburos de cadena larga), aunque genera mayor impacto que la combustión de H_2 (producto de la gasificación).

La digestión anaeróbica podría tener menor impacto que la generación de bioplásticos y extractos por las mismas razones (i) y (ii), pero un mayor impacto debido a que genera un producto combustible. Así, es incierto el impacto relativo entre los procesos mencionados.

Entonces, como conclusión, resulta más conveniente compostar la materia prima, producir textiles y cueros vegetales, y en menor medida generar bioplásticos, extractos y realizar digestión anaeróbica.

6.2.3 Factibilidad del tratamiento

La producción de bioplásticos y extractos requieren condiciones de operación muy distintas al ambiente normal. Específicamente, mantener la esterilidad podría ser difícil de lograr en un contexto domiciliario; en este caso, el equipo debería ser completamente hermético y considerar etapas de purificación de la materia prima. Para lo anterior sería necesario un proceso intensivo en operación o en control, ambos complicados para un usuario común y un contexto independiente de la matriz energética.

Por otro lado, la producción de compost, textiles y cueros vegetales no necesitan condiciones exigentes. Es más, el proceso de compostaje podría ocurrir de manera espontánea en condiciones atmosféricas.

Cabe mencionar que la producción de bioplástico, cueros vegetales y textiles utilizan solo una fracción de la materia prima, produciendo descartes. Por ejemplo, solo es útil el almidón para generar algunos bioplásticos; moléculas o sustancias específicas para los extractos; hojas para los textiles; y los restos de frutas para los cueros vegetales. El destino de dichos descartes, idealmente, no debería ser el relleno sanitario y, en el mejor de los casos podría ser el compostaje que es capaz de degradar cualquier tipo de orgánico. En este último caso, el equipo debería estar compuesto por una serie de etapas para generar el producto de interés y tratar los descartes, lo que complejiza el diseño y la operación. Con todo lo anterior, la mejor opción es realizar compostaje directamente.

La pirólisis de alta y baja temperatura, la gasificación con y sin metanación, la fermentación, la pirólisis a baja y alta temperatura, y la licuefacción requieren condiciones de temperatura y presión

exigentes en comparación con los procesos anteriores y, además, representan un riesgo para el usuario. Tales condiciones de operación están desintonizadas de un contexto domiciliario, considerando al usuario y la independencia de la matriz energética.

La digestión anaeróbica tiene condiciones menos extremas que los procesos anteriores: requiere ausencia de aire y temperaturas menores a 60°C. Mantener la estabilidad de la temperatura podría ser complejo, pero un fallo de esta variable no hace el proceso infactible, por otro lado, mantener la concentración de oxígeno en el nivel deseado es crítico para el sistema.

En contraste, la combustión solo requiere de oxígeno que se encuentra en el aire y energía inicial, fáciles de obtener en cualquier lugar, representando la opción más sencilla.

En conclusión, las opciones mejor adaptadas corresponden a producción de compost y combustión, y en menor medida, la digestión anaeróbica.

6.2.4 Selección de producto y proceso

En las secciones anteriores se han abordado tres criterios que sostendrán la elección del mejor producto y proceso para el contexto domiciliario de este trabajo.

El proceso más atractivo es el compostaje, pues ha sido bien evaluado bajo todos los criterios. La siguiente alternativa mejor evaluada corresponde a la digestión anaeróbica con producción de biogás.

Lamentablemente, como se mencionó en 6.2.1 Utilidad, el compostaje es difícil de implementar si el usuario no tiene significativo interés en obtener compost. Para solucionar el problema se podrían hacer campañas masivas de sensibilización y esperar que las personas cambien de opinión respecto al tema, pero esto se escapa de los objetivos del Trabajo (ver Introducción). Se asume, entonces, que no habrá campaña y, por lo tanto, muchas personas no utilizarían el equipo si genera compost. ¿Qué hacer, entonces?

Para que el equipo sea utilizado por los usuarios, es necesario que el producto sea útil para ellos. La digestión anaeróbica con producción de biogás, que corresponde a la segunda mejor opción, tiene una alta utilidad, en particular para las personas, porque genera un combustible gaseoso.

Entonces, existen dos situaciones posibles: (i) el equipo genera compost, pero no es utilizado por todos los usuarios, así que la mayoría de los residuos orgánicos generados terminan en el relleno sanitario generando impacto ambiental, social y económico negativo, o (ii) el equipo genera biogás y es utilizado por la mayoría de los usuarios, pero se genera un mayor impacto negativo en el ambiente que el generado por el compostaje, aunque menor al del relleno sanitario.

El lector se preguntará cómo escoger entre los dos productos preseleccionados: biogás y compost. Considerando las situaciones descritas, al parecer lo menos dañino es generar biogás, sin embargo, se pierde la oportunidad de que las personas interesadas en generar compost puedan hacerlo. En este contexto cabe preguntarse: ¿es necesario escoger solo un producto a generar? una respuesta TRIZ diría que no; el equipo podría generar compost o biogás según las preferencias del usuario y, en consecuencia, la operación del equipo debería ser flexible.

Un equipo híbrido tendría una ventaja interesante: adaptación al cambio cultural de las personas. Se espera que, a corto plazo, los usuarios prefieran generar biogás y que, a largo plazo, prime la opción de compostaje, debido a la internalización de impactos ambientales en la población, tan propia de estos tiempos. En otras palabras, en vez de hacer una campaña, se puede esperar a que las personas vivan el cambio cultural que está emergiendo hacia la sustentabilidad y el cuidado del medioambiente. Así, las dos situaciones descritas anteriormente se darían, pero se dejaría la posibilidad de que los usuarios representados en la situación i) puedan cambiar de decisión en un futuro y escoger producir compost.

Con todo lo anterior, se podría decidir diseñar un equipo con doble función: producir compost o biogás. Los procesos involucrados, entonces, serían digestión anaeróbica y compostaje.

Sin embargo, lo anterior no es factible técnicamente: luego de un análisis sobre los fundamentos y estudio del estado del arte de los procesos de digestión anaeróbica y compostaje, se concluye que ambos requieren condiciones muy distintas para ser llevadas a cabo, que influyen en las características que debe poseer el equipo. Se destacan las principales: hermetismo del equipo, pues en el compostaje se requiere oxígeno, mientras que la digestión anaeróbica no puede ocurrir en presencia de esta molécula; y el tiempo que dura el proceso difiere, en el compostaje es del orden de meses, mientras que para la digestión, del orden de días o semanas, lo que provoca que el tamaño del equipo requerido en un caso u otro difiera. Por estas razones ambos procesos no son fácilmente compatibles y se resuelve elegir solo uno de ellos para llevar a cabo en el equipo.

Dado lo anterior y la comparación sobre utilidad de las alternativas, se decide diseñar un equipo para la **producción de biogás, a partir del proceso de digestión anaeróbica.**

Cabe mencionar que el estudio de fundamentos y estado del arte de la digestión anaeróbica se presentan en capítulos posteriores; y para el compostaje se encuentra en el Anexo E.

En la sección 5.1.1.1 Impacto ambiental se ha mencionado que, para mejorar el escenario ambiental de la RM, el tratamiento escogido debería generar un impacto ambiental menor que las soluciones actuales, esto es, disposición en relleno sanitario y reciclaje (compostaje) de materia orgánica. Considerando la jerarquía del manejo de residuos y el análisis realizado en la sección 6.2.2 Impacto ambiental, la digestión anaeróbica tiene un impacto ambiental menor que la disposición en relleno sanitario; y mayor que el compostaje. De esta manera, es conveniente utilizar el equipo cuando se aprovechan residuos que originalmente iban a ser destinados al relleno sanitario. Por otro lado, no se recomienda utilizar el equipo para tratar residuos que tienen actualmente un tratamiento de compostaje. Ahora bien, solo un 0,7% de las viviendas realizan hoy reciclaje de sus residuos orgánicos (ver datos en la sección 3.2.1.1 Residuos generados). En consecuencia, el equipo ofrece una mejor alternativa de tratamiento en la mayoría de los casos. Así, considerando el contexto donde se implementará la solución, la digestión anaeróbica continúa siendo una alternativa atractiva.

Se asume como supuesto que las personas utilizarían el biogás, dados los argumentos expuestos en la sección 6.2.1 Utilidad sobre los combustibles gaseosos. Es importante destacar que en las viviendas se requiere combustible para cocinar, climatizar espacios y calentar agua, según la sección 3.1.2.1.2 Bienes materiales, por lo que el biogás generado podría utilizarse para realizar dichas actividades. A continuación, se discute sobre la utilidad que se le podría dar al biogás.

6.2.4.1 *Utilidad del producto generado en la vivienda*

Como se ha mencionado en la sección 3.1.2.1.2 Bienes materiales, una solución que sea adaptable a todas las viviendas de la RM debería proveer del equipamiento necesario para utilizar el biogás, puesto que no todas las viviendas cuentan con infraestructura adecuada. Se decide, entonces, que el equipo incluirá la infraestructura para realizar la actividad requerida. Así, si se desea que el biogás sea utilizado para cocinar, el diseño del equipo incluirá una cocina; si se desea para climatizar espacios, se incluirá un climatizador, como un calefactor; y, finalmente, si se desea para calentar agua sanitaria, se incluirá un calentador de agua, como un calefón.

Las tres actividades mencionadas (cocinar, climatizar espacios y calentar agua sanitaria) podrían ser parte de la solución, lo que requeriría un diseño que permita al equipo adaptarse al uso que se le dará al combustible y, además, se debería incluir el diseño de la infraestructura necesaria. Tomando en cuenta la extensión que esto podría provocar en el trabajo, se decide abordar solo una de las actividades en la solución, y no las tres. Naturalmente, futuras versiones del equipo diseñado podrán abordar más de una aplicación.

Se desea incluir la actividad que sea más importante para los usuarios y así asegurar que el biogás sea útil para ellos. La importancia relativa entre una actividad y otra podría verse reflejada en el número de viviendas que realizan dichas actividades: aquella actividad más realizada podría ser la más importante. Sin embargo, solo la actividad de cocinar cuenta con información sistematizada en la literatura (censos), haciendo necesaria otra estrategia para comparar con las actividades de climatizar espacios y calentar agua sanitaria.

Para resolver cuál actividad es más importante, se responderá a las siguientes preguntas: ¿por qué se realizan las actividades?, ¿qué necesidades suplen? y ¿es posible suplir la necesidad con otra acción?

Cocinar se relaciona con la necesidad de alimentación; mientras que climatizar espacios y calentar agua, con la de abrigo. Se asumirá que el agua sanitaria se usa para higiene, pero la calefacción de la misma se considera una necesidad de abrigo durante el acto de higiene personal. Tanto la alimentación como el abrigo son necesidades básicas, pues responden a requerimientos fisiológicos, no obstante, presentan algunas diferencias:

La necesidad de alimentación se encuentra presente todo el año, y puede ser satisfecha a partir de la actividad de cocinar o comprar comida preparada. Ahora bien, cocinar es una acción transversal en la población (solo en un 0,48% de las viviendas de la RM no se cocina). Por otro lado, la necesidad de abrigo dentro de una vivienda se presenta principalmente en invierno, y puede ser suplida climatizando espacios o utilizando ropa abrigadora, siendo esta última alternativa la más simple, pues se trata de la solución que las personas adoptan para abrigarse fuera de sus viviendas. Así, si una vivienda no cuenta con climatización, el abrigo podría satisfacerse de otra manera sencilla y asequible. Respecto a la necesidad de abrigo al momento de la higiene personal, no es claro que sea imprescindible para toda la población, y no se observa otra forma común de suplirla más que utilizar agua caliente. Sumado a lo anterior, el abrigo durante la higiene es una necesidad moderna en comparación con la alimentación.

Se considera más importante cocinar porque: (i) la alimentación es una necesidad de todo el año; y (ii) esta actividad es más esencial que climatizar espacios y calentar agua. Por lo tanto, se opera por **utilizar el biogás generado en el equipo para cocinar.**

6.3 REFLEXIONES FINALES SOBRE EL BENEFICIO PRINCIPAL

En este capítulo se ha decidido el producto que generará el equipo y el tipo de tratamiento para lograrlo. Se ha buscado tomar esta decisión de la forma más responsable posible, considerando los posibles impactos, la factibilidad y utilidad del producto.

Note el lector que no se ha escogido la opción que podría ser más barata, ni la más rentable. El análisis económico llegará mucho más adelante, cuando se hayan asegurado los aspectos más relevantes del diseño: adaptación al contexto humano y natural. Es importante considerar la factibilidad económica de la solución, pero se recuerda al lector que la estrategia de diseño propuesta en este trabajo no considera estas evaluaciones al principio, sino que al final del proceso. Considerar la factibilidad económica al principio provoca, según la metodología Upcycle, que las personas pierdan de vista nuevas ideas y mejores adaptaciones al medio. Las soluciones obtenidas a partir de principios de diseño sustentable han demostrado, en otros contextos, dar mejores soluciones en un sentido económico, ambiental y social.

Según el análisis, el mejor producto a generar es el compost, pero dado que el usuario podría no desearlo, se escoge la segunda mejor opción, que resulta ser altamente útil para las personas. Así, se ha decidido que el equipo genere biogás a través de la digestión anaeróbica, que será utilizado para cocinar.

Capítulo 7

FUNDAMENTOS

En este capítulo se abordan los fundamentos fisicoquímicos y biológicos del proceso de digestión anaeróbica, que sustentarán las operaciones unitarias, dimensionamiento y diseño del equipo. También, se cubren las ecuaciones que permiten describir los pasos fenomenológicos que componen el proceso mencionado.

Los datos de digestión anaeróbica se han obtenido de [41] y [42].

Cabe mencionar que en el Anexo E.1 Fundamentos del compostaje se encuentran los fundamentos de este proceso que han permitido, en el Capítulo 6 Beneficio Principal, concluir que no es factible técnicamente que el equipo realice compostaje, además de digestión anaeróbica.

7.1 FUNDAMENTOS FISICOQUÍMICOS Y BIOLÓGICOS

La digestión anaeróbica corresponde a la descomposición bacteriana de materia orgánica bajo condiciones anaeróbicas (sin O_2), que produce biogás y digestato.

El biogás es un combustible, pues está compuesto principalmente de metano, una sustancia inflamable. Es utilizado para generar electricidad o ser directamente combustionado para producir calor, siendo esta última la función de interés en este trabajo. El digestato corresponde al efluente húmedo que se obtiene del proceso, que suele ser utilizado como fertilizante de suelos.

A continuación, se detallan las características de la materia prima utilizada, el proceso de degradación y sus condiciones, y las características del producto generado.

7.1.1 Materia prima

La biomasa que se utiliza para producir biogás puede tener origen agrícola (estiércol de animales, residuos vegetales, cultivos), industrial (residuos orgánicos, residuos de agroindustrias, lodos de industrias de procesos, subproductos orgánicos de las biorrefinerías) y municipal (residuos domésticos, lodos de aguas residuales, residuos de alimentos).

La materia que será digerida en el equipo corresponde a residuos orgánicos domiciliarios, que están constituidos por residuos de alimentos, poda y jardín.

Las características de la materia prima que influirán en el proceso de digestión son:

- Humedad: el agua es fundamental en el proceso, tanto como medio para el transporte de sustancias como reactante en las reacciones involucradas.
- Acidez (pH): la acidez puede tener efectos inhibidores sobre los microorganismos.
- Contenido de sólidos: los sólidos secos corresponden a moléculas orgánicas (proteínas, lípidos y carbohidratos) e inorgánicas (cenizas o inertes) sin considerar el agua. La materia

orgánica se denomina sólidos volátiles (SV). En la práctica, no toda la materia orgánica es degradable anaeróbicamente porque no es accesible a los microorganismos, aquellos que son degradables se definen como sólidos volátiles degradables. Usualmente los sólidos volátiles son determinados a partir de la demanda química de oxígeno (DQO).

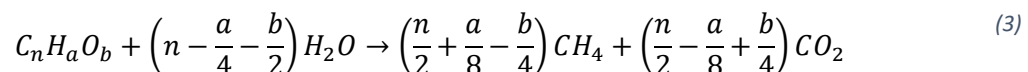
- Contenido de macronutrientes (carbono, nitrógeno, fósforo y azufre): Los nutrientes son esenciales en el crecimiento de los microorganismos, por lo que la materia prima debe proveer de ellos. Cabe mencionar que el carbono es el macronutriente principal, pues de su degradación se genera metano.
- Contenido de micronutrientes: la materia prima también debe asegurar contenido de trazas esenciales, como Ni, Zn, Cu, Mn, etc.
- Sustancias inhibitorias o tóxicas: en general los metales micronutrientes suelen tener efectos negativos en el crecimiento de los microorganismos a concentraciones muy altas.
- Rendimiento de metano: dependiendo del contenido de sólidos se puede deducir el volumen o masa de metano que se generará con la digestión.

En la siguiente tabla se muestran características de algunas materias primas.

Tabla 43: Características de algunas materias primas para la producción de biogás. Elaboración propia con datos de [41].

Tipo de materia prima	Contenido de orgánicos	Prop. C:N	Materia seca [%]	Sólidos volátiles [% de materia seca]	Rendimiento de metano [$m^3 CH_4 / kg SV$]
Residuos de jardín	Carbohidratos, lípidos	125	[60; 70]	90	[0,20; 0,50]
Pasto	Carbohidratos, lípidos	18	[20; 25]	90	[0,30; 55]
Residuos de fruta	Carbohidratos, lípidos	35	[15; 20]	75	[0,25; 0,50]
Residuos de alimentos	-	-	10	80	[0,5; 0,60]

El rendimiento de metano puede ser calculado teóricamente con la fórmula de Buswell (Ecuación (3)) y el contenido de sólidos secos (lípidos, proteínas y carbohidratos); los resultados suelen ser optimistas porque se asume que todos los sólidos serán descompuestos cuando en realidad solo parte de ellos puede ser degradado, y porque se considera que la energía generada por el sistema se utiliza solamente para generar metano, siendo que los microorganismos tienen otras demandas energéticas que deben ser cubiertas.



En la siguiente tabla se muestra el rendimiento de metano según la Ecuación (3) para las moléculas que conforman los sólidos:

Tabla 44: Rendimiento teórico de biogás y composición de biogás teórica considerando la producción a partir de carbohidratos, lípidos y proteínas. Elaboración propia con datos de [41].

Sustrato	Rendimiento de biogás $\left[\frac{NI}{kg \text{ de VS}}\right]$	CH ₄ [%]	CO ₂ [%]	Fórmula elemental utilizada para el cálculo de Buswell
Carbohidratos	746	50	50	(CH ₂ O) _n ^a
Lípidos	1.390	72	28	C ₁₆ H ₃₂ O ₂ ^b
Proteínas	800	60	40	C ₁₃ H ₂₅ O ₇ (N ₃ S) ^c

^a Se ha utilizado la fórmula elemental de azúcar soluble (glucosa). Sería más realista utilizar la fórmula del almidón o celulosa.

^b Se ha utilizado la fórmula elemental del ácido palmítico.

^c La fórmula elemental de las proteínas puede variar considerablemente.

El rendimiento de metano también puede ser determinado de forma experimental con el análisis Potencial Bioquímico de Metano (PBM), que considera la materia orgánica que efectivamente puede degradarse y el consumo de energía de los microorganismos, en un proceso batch. Este análisis se realiza bajo condiciones muy favorables de agitación, temperatura, pH, etc. por lo que tales rendimientos no se alcanzan en aplicaciones industriales. En la Figura 11 y Figura 12 se muestran resultados del test PBM para distintos sustratos. Los residuos de alimentos son los que más metano generan y más rápido llegan a estado estacionario de producción. Los elementos fibrosos como los papeles presentan una tasa inicial de conversión lenta que se asocia con la hidrólisis de las largas cadenas de polímeros.

Las curvas se han aproximado a ecuaciones cinéticas, que se encuentran en la sección 7.2 Cinética del Proceso.

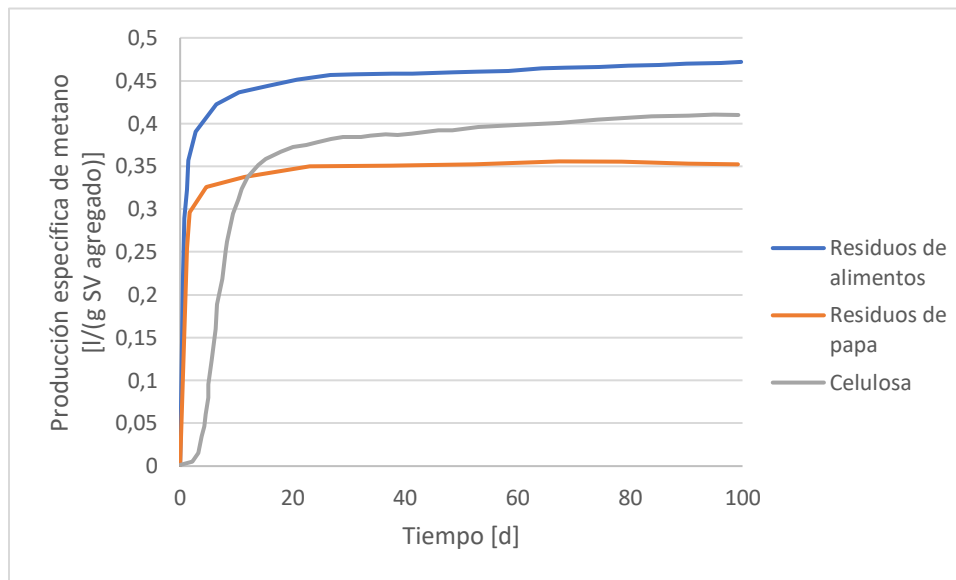


Figura 11: Gráfico de los resultados del test PBM para tres sustratos, por 100 días. Elaboración propia con datos de [41].

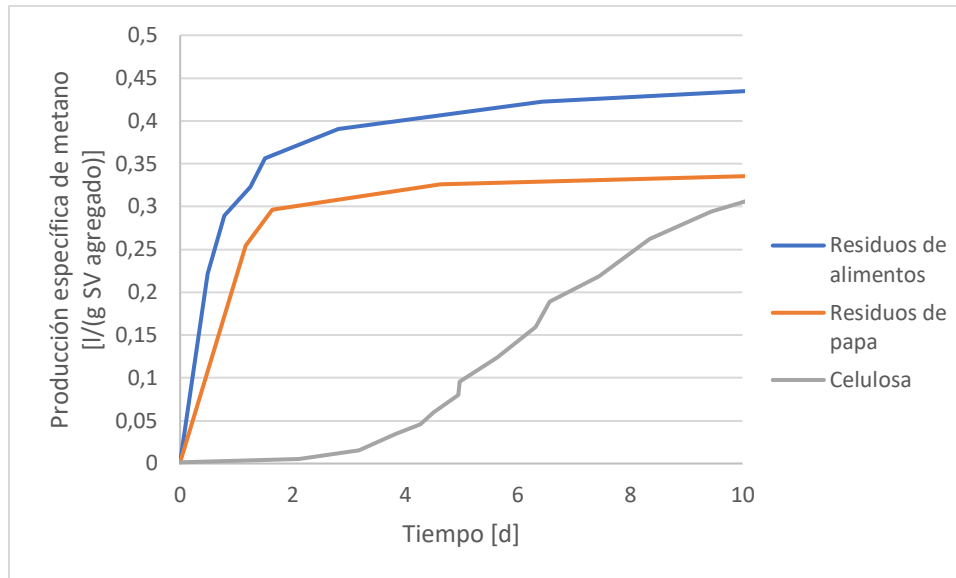


Figura 12: Gráfico de los resultados del test PBM para tres sustratos, primeros 10 días de los 100 días. Elaboración propia con datos de [41].

Existen algunos compuestos que son difíciles de digerir, como la lignocelulosa, constituida por celulosa, hemicelulosa y lignina, que conforma la pared celular de las células vegetales. Los carbohidratos de bajo peso molecular, los ácidos grasos volátiles y alcoholes son digeridos en horas en condiciones óptimas; mientras que las proteínas, hemicelulosa y lípidos en días; y la celulosa varios días. Los aceites y grasas tienen un alto potencial de generación de metano, pero requieren de largos tiempos de retención.

7.1.2 Pretratamiento

En el pretratamiento se eliminan materiales indeseados (contaminantes) como vidrio, plástico, metales, etc., que no son degradables anaeróbicamente.

También, la materia prima es pretratada para incrementar la disponibilidad de átomos de carbono para los microorganismos y enzimas, pues con esto aumentan las posibilidades de que el sustrato sea degradado. Esto es especialmente importante para materiales lignocelulósicos, pues son difíciles de degradar, como la madera. La lignocelulosa está compuesta por polímeros de celulosa, hemicelulosa y lignina; posiblemente el entramado de estas cadenas impide la exposición de carbono al medio y, al ser cadenas largas, son más estables y no reaccionan fácilmente. Esta reactividad podría estar justificada por la disponibilidad de átomos de carbono que se encuentran en los extremos de las cadenas, entonces, si un sustrato está compuesto por carbohidratos de cadena corta, existen muchos más carbonos reactivos que en el caso de sustratos lignocelulósicos.

7.1.2.1 Pretratamiento físico

La literatura presenta las siguientes alternativas de pretratamiento físico.

Pretratamiento mecánico

Se reduce el tamaño de partícula del sustrato y con ello aumenta el área superficial expuesta al ataque microbiano. Se utilizan equipos de conminución, como molinos de cuchillos o de martillos.

Se recomienda un tamaño de partícula de 1 – 2 [mm] para una efectiva hidrólisis del sustrato.

Pretratamiento térmico

Las células que componen la materia prima son fragmentadas a nivel molecular, aumentando así los átomos de carbono expuestos al medio y los átomos reactivos. En este pretratamiento el sustrato es calentado hasta un máximo de 220 [°C] a baja presión y luego enfriado, lo que altera los enlaces de hidrógeno que mantienen la forma cristalina de la celulosa, hemicelulosa y compuestos estructurales.

Tratamiento ultrasónico

Se destruye la biomasa microbiana, pero no la materia prima, por lo que no es apropiado como pretratamiento sino como post tratamiento del digestato. La frecuencia de ultrasonido debe encontrarse sobre 20 [kHz].

Desintegración electrocinética

Esta tecnología es utilizada para tratar lodos de plantas de tratamiento de agua, pues se agrupan en flóculos y agregados que impiden una buena digestión anaeróbica. Los flóculos están compuestos por moléculas cargadas y microorganismos del proceso de tratamiento de agua, y son destruidos aplicando voltaje para cambiar su carga.

7.1.2.2 Pretratamiento químico

Tratamiento alcalino: Remueve grupos acetatos de la hemicelulosa, haciéndola más accesible a las enzimas hidrolíticas. La lignina es solubilizada lo que permite mejor acceso de enzimas a la celulosa y hemicelulosa. Para esto se agregan diferentes concentraciones de arcilla, NaOH y KOH.

7.1.2.3 Pretratamiento biológico

Pretratamiento microbiológico

También es conocido como pre-acidificación o fermentación multietapas. Las fases de hidrólisis y acidogénesis ocurren en un reactor y están separadas de la acetogénesis y metanogénesis que ocurren en otro reactor (ver fases de la digestión anaeróbica en la sección 7.1.3.1 Microorganismos). Esto permite crear un ambiente óptimo para la hidrólisis, independiente de las últimas dos fases; el PH óptimo se encuentra entre 4 y 6, valores que inhiben la producción de metano y propician la acumulación de VFAs (ácidos grasos volátiles). Entonces, el propósito de este pretratamiento es mejorar las condiciones para promover la degradación hidrolítica.

Adición de enzimas

Se fragmentan polímeros, especialmente celulosa, hemicelulosa y lignina, a partir de la acción de enzimas. El principio de este pretratamiento es aumentar la concentración de enzimas, factibilizando la degradación.

7.1.2.4 Procesos combinados

Explosión de vapor

Se fragmenta la pared de las células que componen el sustrato. Para esto, se impone una temperatura de las células entre 160 – 220°C, causando un aumento en la presión, y luego se baja

abruptamente la presión, lo que provoca que el agua intracelular se evapore rompiendo la pared celular. Este proceso genera elementos inhibidores.

Extrusión

Las células que componen el sustrato se rompen. La materia prima entra en un tubo con alta presión y temperatura, lo que rompe células y fibras vegetales, posteriormente se baja la presión provocando una explosión de vapor.

Pretratamiento termoquímico

Se combinan efectos químicos y térmicos. Se utilizan ácidos, bases y/o solventes, junto con cambios en la temperatura.

7.1.3 Etapa central: Digestión Anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso complejo que cuenta con una serie de pasos, que serán explicadas a continuación. Se recomienda al lector seguir la explicación usando la Figura 13 como guía.

Suponga el lector que la materia prima está lista para ser digerida en un ambiente anaeróbico, como se muestra en (a). Naturalmente, en la materia existen microorganismos que se fijan al sustrato sólido y, dadas las condiciones anaeróbicas, podrán proliferar aquellas que no requieran O_2 . En (b) se muestra un acercamiento a la materia prima, donde se observan microorganismos.

El proceso de digestión inicia cuando las enzimas hidrolíticas son liberadas por las bacterias hidrolíticas, y viajan a través del agua hasta el sustrato sólido que es degradado y solubilizado (ver (c)). Estos sustratos solubles son transportados por el líquido hasta la superficie celular de las bacterias e ingresan a ellas, y ahí son metabolizados (ver (d)). Esta etapa involucra el consumo de sustratos (nutrientes) que permite a los microorganismos crecer y generar productos que luego son secretados por las células al medio. Estos productos son múltiples, dependiendo del tipo de célula: moléculas como VFAs, H_2 y ácido acético, luego de ser secretadas, son transportadas hacia otras células donde vuelven a reaccionar; por otro lado, productos finales como CH_4 y CO_2 viajan por el fluido hasta la superficie en contacto con la fase gas y se evaporan debido al equilibrio líquido-gas que debe existir en el sistema, pasando a ser parte de la fase gaseosa (biogás) (ver (e)). Lo mismo ocurre con el agua presente en el medio fluido, provocando que el sustrato se seque.

El proceso se puede dividir en dos pasos generales: la metabolización microbiana, que genera los cambios en la materia prima y el crecimiento de microorganismos; y la transferencia de masa, pues sin ella las moléculas no estarían disponibles para los microorganismos.

Los pasos anteriores ocurrirán si existen condiciones favorables en el medio. Para fortalecer la metabolización se debe asegurar que existen microorganismos, un ambiente anaeróbico, pH y temperatura adecuados, nutrientes y tiempo para que ocurran los cambios, y considerar que en el ambiente pueden existir sustancias inhibidoras o tóxicas. Por otro lado, para que la transferencia de masa ocurra, se debe asegurar una humedad favorable, temperatura y tiempo. Mezclar el medio fortalece los pasos descritos. Por ejemplo, el movimiento permite que la transferencia ocurra más rápida y evita gradientes de temperatura que son perjudiciales para los microorganismos.

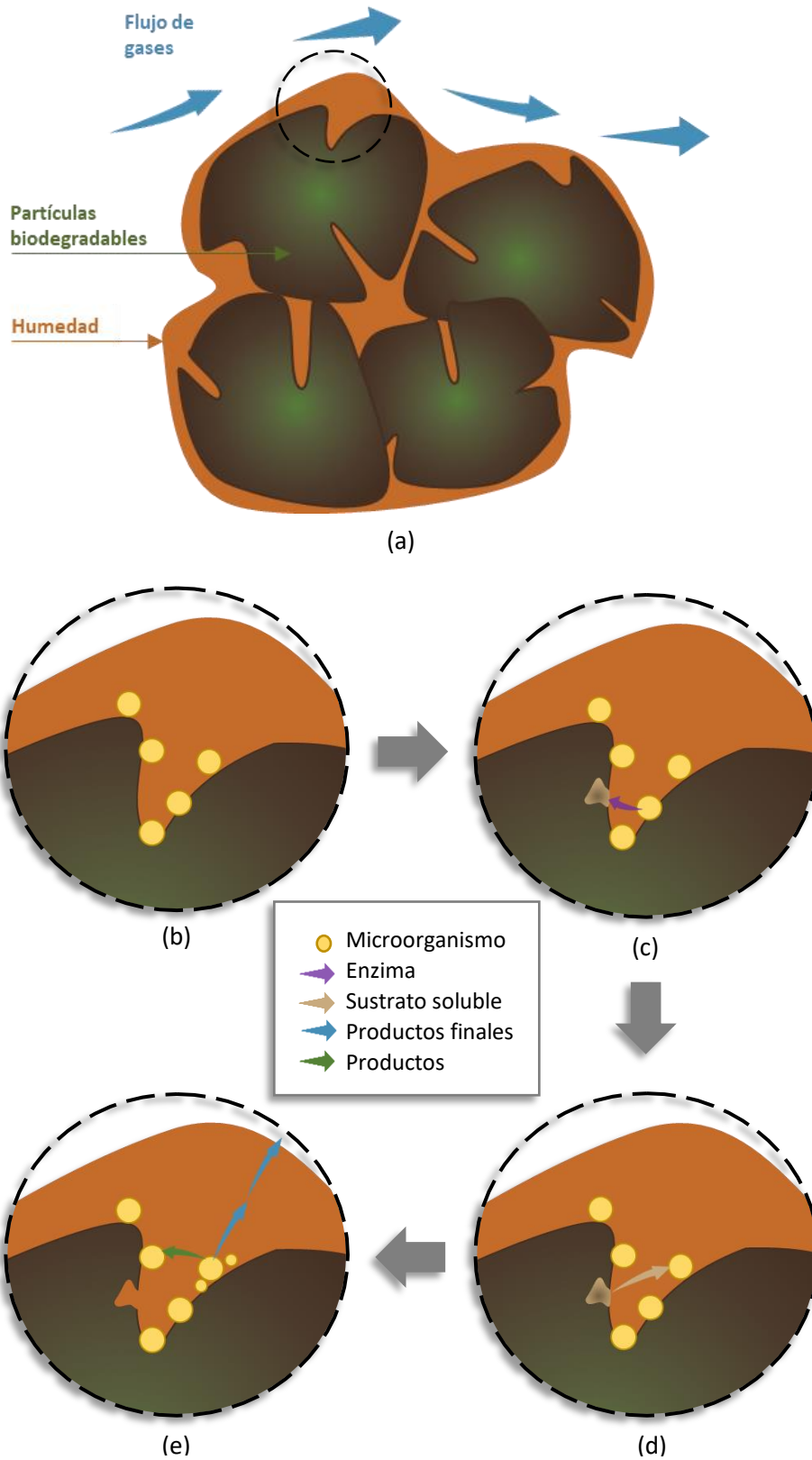


Figura 13: Diagrama de los pasos involucrados en la digestión anaeróbica. (a) Esquema general basado en [42]; (b), (c), (d) y (e) Zoom del área punteada con progresión de pasos. Elaboración propia.

Cabe mencionar que el pretratamiento, cuyo objetivo es aumentar la disponibilidad de moléculas de carbono, aumenta la probabilidad de que las enzimas hidrolíticas cuenten con superficie activa del sustrato, es decir, se fortalece la transferencia de masa.

En la sección 7.1.3.1 Microorganismos se explican las reacciones de la metabolización y los microorganismos involucrados. En la sección 7.1.3.2 Ambiente microbiano se detallan las condiciones expuestas anteriormente; y en la sección 7.2 Cinética del Proceso, las ecuaciones que describen las cinéticas involucradas de las reacciones y transferencias.

Más adelante, en el Capítulo 8 Estado del Arte, el lector se familiarizará con tipos de digestores, cuya lógica de diseño tiene por objetivo lograr las condiciones aquí descritas y potenciarlas para que el proceso ocurra.

7.1.3.1 *Microorganismos*

En el proceso participan microorganismos aeróbicos y facultativos, principalmente bacterias, protozoos y hongos, siendo las primeras las más importantes.

El proceso se divide en las siguientes fases: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. En la Figura 14 se muestra el proceso dividido en etapas y las bacterias participantes. La función de cada tipo de bacteria en este proceso es explicada a continuación:

Bacterias acidogénicas

Bacterias hidrolíticas: Secretan enzimas que rompen los polímeros que componen el sustrato (proteínas y polisacáridos), produciendo monómeros solubles (azúcares, aminoácidos, péptidos). Además, se podría generar amoníaco (NH_3) e ión sulfato de la hidrólisis de proteínas.

Bacterias fermentativas: Fermentan monómeros generando una variedad de productos, entre ellos, ácido acético, H_2 , CO_2 y ácidos grasos volátiles (VFAs), como propionato, butirato y alcoholes.

Bacterias acetogénicas

Las bacterias acetogénicas protón reductoras (OPR) convierten los VFAs en H_2 , CO_2 , ácido acético y compuestos monocarbonados, que corresponden a sustratos para la metanogénesis. El H_2 es tóxico para las bacterias metanogénicas, por lo que requieren de otros microorganismos para que lo consuman. Así, estos microorganismos no pueden crecer en un cultivo puro.

Bacterias metanogénicas

Bacterias metanogénicas hidrogenotróficas: consumen H_2 y CO_2 generado por las OPR y producen metano.

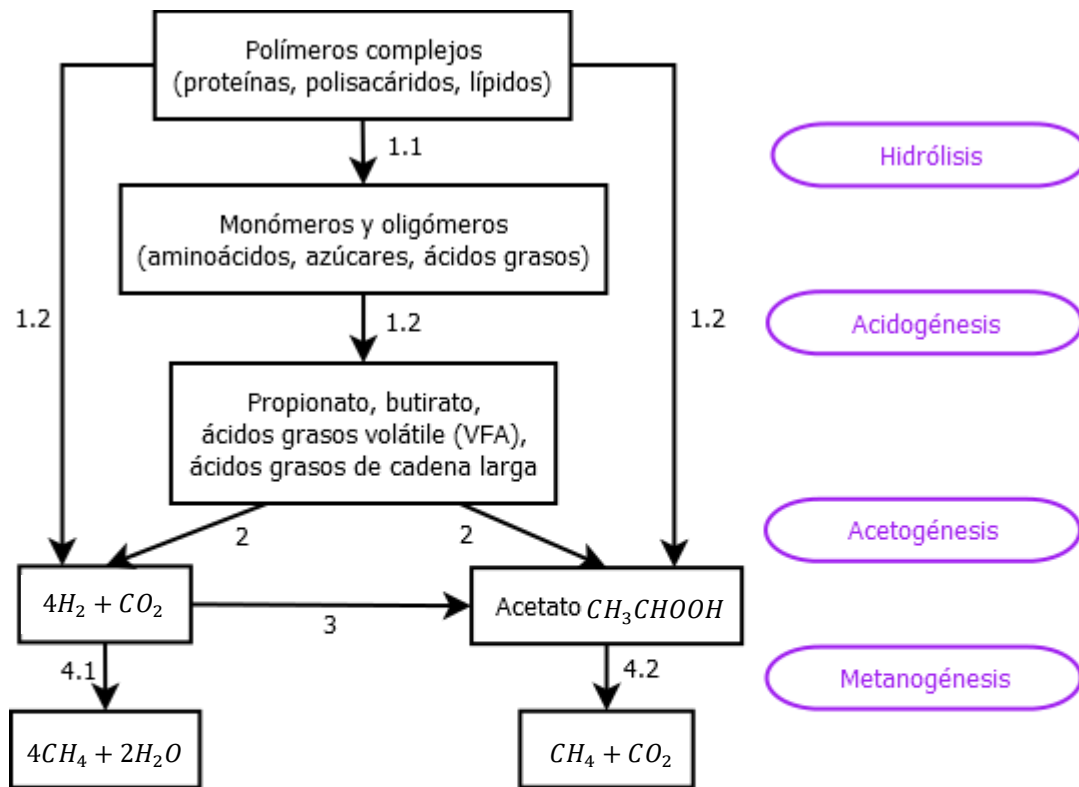
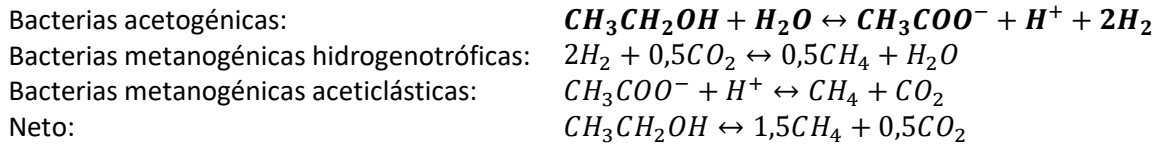
Bacterias metanogénicas acetoclásticas: Los géneros *Methanosarcina* y *Methanotherix* generan metano a partir de ácido acético. Estos microorganismos son lentos e ineficientes.

Bacterias homoacetogénicas

Consumen H_2 y generan acetato. Por lo tanto, en el medio se mantiene una baja presión parcial de H_2 y una alta concentración de acetato.

Además de las bacterias presentadas anteriormente, existen las **bacterias sulfato reductoras (SBR)**, que consumen sustratos de la metanogénesis, es decir, CO_2 , H_2 y acetato. En presencia de sulfato, las SBR metabolizan los sustratos más efectivamente que las metanogénicas, produciendo ácido sulfhídrico que afecta negativamente la digestión.

A modo de ejemplo de las reacciones involucradas en la formación de metano, considere el lector la digestión de etanol (CH_3CH_2OH) para producir acetato (CH_3COOH) e hidrógeno (H_2), donde participan bacterias acetogénicas y metanogénicas; las bacterias hidrolíticas no se incluyen, pues el etanol ya es una molécula soluble. Las reacciones son las siguientes:



- 1 Bacteria acidogénica
 - 1.1 Bacteria hidrolítica
 - 1.2 Bacteria fermentativa
- 2 Bacteria acetogénica
- 3 Bacteria homoacetogénica
- 4 Bacteria metanogénica
 - 4.1 Bacteria metanogénica hidrogenotrófica
 - 4.2 Bacteria metanogénica acetilclástica

Figura 14: Diagrama de las fases de la digestión anaeróbica. En óvalos se indican los nombres de las etapas y los números indican las bacterias involucradas. Elaboración propia basada en [41] y [42].

Finalmente, en la digestión anaeróbica existe una red de reacciones con participación de microorganismos, y será necesario cuidar las condiciones para que sea garantizado un crecimiento sano de la comunidad de bacterias enlazadas con esta red.

7.1.3.2 *Ambiente microbiano*

En esta sección se caracteriza el ambiente que debe existir en el digester para que la digestión ocurra, y se mencionan condiciones óptimas para maximizar la degradación de materia orgánica y generación de metano.

Medio anaeróbico

El oxígeno es un átomo aceptor de electrones (electronegativo) por excelencia, por lo que puede formar enlaces con átomos de hidrógeno. En la digestión anaeróbica el O_2 está ausente (ambiente reductor) provocando una escasez de átomos de oxígeno. Bajo estas condiciones, el segundo átomo más electronegativo comienza a aceptar electrones; este átomo es el carbono.

El enlace entre carbono e hidrógeno no libera tanta energía como el enlace entre oxígeno e hidrógeno. Así, la energía liberada en el proceso anaeróbico es menor que en un proceso aeróbico. Por lo tanto, las bacterias anaeróbicas requieren procesar más sustrato que las aeróbicas para obtener la misma energía. Esta energía es utilizada para la mantención y crecimiento de los microorganismos.

Por todo lo anterior, se puede concluir que en la digestión anaeróbica el crecimiento microbiano es más lento y con ello también el consumo de sustrato, siempre en comparación con el proceso aeróbico. La tasa de crecimiento de los microorganismos anaeróbicos es un 10% de la tasa de los aeróbicos, aproximadamente.

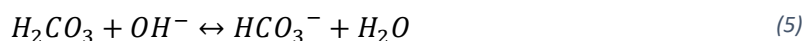
Los sulfatos, nitritos y nitratos, al estar compuestos por átomos de oxígeno, inhiben la digestión anaeróbica.

pH

El pH del proceso normalmente es 7 (neutro) gracias a la capacidad buffer del sistema. Sin embargo, el pH óptimo para la hidrólisis se encuentra entre 4 y 6, y para la metanogénesis entre 6,5 y 7,2. Se pueden lograr condiciones óptimas de pH para cada reacción siempre y cuando se realice una fermentación multietapa (ver Pretratamiento microbiológico en la sección 7.1.2.3 Pretratamiento biológico), permitiendo con ello separar la digestión en dos ambientes.

La acumulación de VFAs acidifican el medio (baja el pH). Un $pH < 6$ inhibe a las bacterias metanogénicas y un $pH < 5$ podría matarlas, aumentando la acumulación de VFAs y agudizando la acidificación del medio.

El sistema ácido base del carbonato funciona como buffer, controlando el pH del sistema. A continuación, se muestran las reacciones involucradas, en fase acuosa:



Según las reacciones anteriores, si aumenta la concentración de H^+ (mayor acidez), el sistema se desplaza hacia la generación de bicarbonato, mientras que un aumento en la concentración de OH^- desplaza el sistema a la generación de ion bicarbonato, evitando en ambos casos cambios bruscos de pH. Cabe mencionar que a menor temperatura existe más CO_2 en solución y se forma más ión bicarbonato.

El NH_3 , proveniente de la degradación de proteínas, se disuelve como muestra la Reacción (6), generando OH^- y NH_4^+ . El OH^- contrarresta la acidez del medio y, además, promueve la formación de ion bicarbonato.



Si la materia prima que se utiliza como alimentación está fuera de los rangos deseados de pH, puede neutralizarse en un paso anterior a la digestión, y si se acidifica durante la digestión se pueden agregar bases como $NaOH$, $Ca(OH)_2$ y Na_2CO_3 .

Macronutrientes y micronutrientes

La composición de la masa microbiana anaeróbica puede ser estimada como 50% C , 20% O , 10% H , 11% N , 2% P y 1% S (porcentajes máxicos). La demanda mínima de **macronutrientes** seguiría la proporción 1000:5:1:1 ($COD_{degradable} : N : P : S$) si el sustrato está completamente hidrolizado y disponible para la metanogénesis. Si hay compuestos que hidrolizar entonces la demanda es 350:5:1:1 ($COD_{degradable} : N : P : S$). Si se quisiera potenciar el crecimiento de las bacterias hidrolíticas, la proporción de nutrientes requerida es la primera mencionada, por otro lado, si se desea favorecer el crecimiento de las metanogénicas, se requiere la segunda proporción de nutrientes. La decisión de cuál bacteria potenciar debería estar relacionada con aquella que posea una cinética más lenta.

Cabe destacar que se habló de $COD_{degradable}$, que incluye la masa de carbono, nitrógeno, fósforo, etc. Considerando solo el carbono necesario, se recomienda una proporción de $C : N$ entre 16: 1 y 45: 1. Otros autores recomiendan una proporción $C : N$ entre 10: 1 y 45: 1 para la etapa hidrolítica; y entre 20: 1 y 30: 1 para la metanogénica. A mayores concentraciones de N de todas formas ocurre la digestión, pero el N no es consumido totalmente y se acumula como NH_3 . A menores concentraciones de N existen restricciones en el crecimiento de los microorganismos y reducción de la capacidad metabólica, por lo que la digestión de los sustratos decrece.

Se recomienda mantener una proporción $C : P$ de 120: 1, y $C : S$ de 600: 1.

En general se asume que hay suficiente N y P disponible en la alimentación, excepto en casos donde solo se alimenta un tipo de sustrato (como lodos provenientes del tratamiento de agua).

Para alimentar proporciones óptimas de C , N , P y S , se pueden mezclar sustratos específicos para lograr dichas relaciones.

Los **micronutrientes** requeridos por las bacterias metanogénicas son Ni , Co , Mo , Fe , Se y Wo , y las necesarias para las bacterias hidrolíticas Zn , Cu y Mn . Usualmente, la materia prima provee de suficientes micronutrientes cuando se alimentan más de un tipo de sustrato.

Los micronutrientes forman precipitados insolubles con H_2S , carbonato y fosfato, y no pueden ser aprovechados por los microorganismos de esta forma.

Inhibición y toxicidad de la alimentación

Existen algunos elementos de la materia prima que pueden afectar negativamente el crecimiento microbiano. La inhibición causa reducción en el crecimiento de los microorganismos, mientras que la toxicidad provoca la muerte.

La digestión anaeróbica suele ser más vulnerable a la toxicidad e inhibición que la degradación aeróbica, pues presenta procesos en serie donde cada uno depende del anterior, mientras que los procesos aeróbicos ocurren en paralelo siendo más independientes entre sí. El microorganismo que más se ve afectado por el medio son las bacterias metanogénicas, pero tienen la capacidad de adaptarse y reponerse.

La forma no disociada del amoníaco en solución ($NH_3(aq)$) causa inhibición. La presencia de esta molécula no es medida directamente, sino que se mide su ion (NH_4^+), pues es más sencillo. La inhibición comienza a concentraciones de NH_4^+ mayores a $1,5 - 3,0 \left[\frac{g \text{ de } N}{l} \right]$ (cabe destacar que se mide la masa del átomo de nitrógeno, y no la molécula completa).

El ácido sulfhídrico también inhibe en su forma no disociada, desde una concentración de $30 \left[\frac{mg H_2S}{l} \right]$. En su forma disociada el S^{2-} precipita iones metálicos afectando la disponibilidad de los nutrientes. Cabe mencionar que el H_2S y el NH_3 tienen efectos sinérgicos negativos.

A baja y media concentraciones los iones de metales no inhiben. A muy altas concentraciones, los iones de los metales livianos: Na, K, Mg, Ca y Al, inhiben. Por otro lado, los iones de metales pesados a altas concentraciones son tóxicos, afortunadamente suelen precipitar con H_2S y carbonato; los mínimos límites a las que se ha reportado efectos negativos son: Cu ($40 \left[\frac{mg}{l} \right]$), Cd ($20 \left[\frac{mg}{l} \right]$), Zn ($150 \left[\frac{mg}{l} \right]$), Ni ($10 \left[\frac{mg}{l} \right]$), Pb ($340 \left[\frac{mg}{l} \right]$) y Cr ($100 \left[\frac{mg}{l} \right]$).

Finalmente, los antibióticos y desinfectantes presentes en residuos de alimentos y estiércol de animales, respectivamente, inhiben o son tóxicos para los microorganismos, pues han sido creados con este fin.

Humedad

El agua es el medio por el que el sustrato, las enzimas y los productos son transportados, y donde crecen los microorganismos. También, es un sustrato para la reacción de hidrólisis. Por lo tanto, un déficit de agua provoca limitaciones en las transferencias y reacciones. Así, en sustratos secos, la primera etapa de la digestión ocurrirá con dificultad, es decir, existirán limitaciones en la hidrólisis y consecuentemente todo el proceso se verá alterado. Los sustratos húmedos no tendrán este problema.

El sustrato puede entrar seco o puede secarse durante el proceso, pues se evapora agua. En ambos casos se debe agregar agua para obtener la humedad requerida, que se encuentra sobre 55%, para que la digestión sea completa y eficiente.

Recuerde el lector que la concentración de agua en la fase líquida y en la gaseosa deben encontrarse en equilibrio. En la digestión el agua se evapora para cumplir con este equilibrio, tomando calor del medio para abastecer el cambio de fase. Por esta razón, el sustrato se seca.

Temperatura

La temperatura tiene un importante efecto en los parámetros cinéticos del sistema, incluyendo las tasas de crecimiento y muerte de microorganismos, y transferencias de masa.

La digestión anaeróbica suele ocurrir en los siguientes rangos de temperatura:

- Termofílico: 55 – 60°C
- Mesofílico: 35 – 40°C
- Psicofílico: < 20°C

En un sistema mesofílico la producción de gas decrece a los 43°C y la temperatura comienza a inhibir a los microorganismos. En un sistema termofílico ocurre lo mismo a 63°C. Se recomienda no variar más de 1°C la temperatura dentro del digestor, pues esto desajusta el metabolismo de la comunidad microbiana, especialmente en el rango termofílico.

Las bacterias metanogénicas son las más sensibles a la temperatura. Su temperatura óptima oscila entre 35 – 40°C (rango mesofílico) y 55°C (dentro del rango termofílico), y se suelen obtener mejores tasas de generación de metano en el rango termofílico.

Generalmente, si el sistema no cuenta con control de temperatura, este se encuentra en un rango de temperatura psicofílica. Para tener un sistema con temperaturas termofílicas se requiere suministrar calor, sin embargo, si se considera la energía requerida y la generada como metano, la energía neta aprovechable es menor que en un sistema mesofílico. Este último suele ser el sistema más utilizado.

Cabe destacar que a altas temperatura se produce más amoníaco, que es inhibidor del crecimiento microbiano. Las altas temperaturas, además, favorecen la transferencia de masa, incluyendo la evaporación, debido a que aumenta el coeficiente de transporte global de masa (difusividad, D) y las moléculas pueden cambiar de fase fácilmente, tomando calor del medio.

Con el fin de asegurar una temperatura constante en el digestor, este puede ser aislado para evitar pérdidas de calor. El aislamiento puede ser un recubrimiento interno o externo del digestor con un aislante como lana mineral, vidrio, espuma de plástico, algodón, etc. También es posible suministrar calor para compensar pérdidas de calor por la pared o debido a la evaporación de agua; usualmente se utilizan intercambiadores de calor dentro del digestor.

Mezcla

Generalmente, se realiza mezcla dentro de los digestores para:

- (i) Homogeneizar el sistema, porque esto permite que todo el volumen tenga las mismas condiciones que, idealmente, serían las óptimas. Y así cumplir las hipótesis de dimensionamiento usuales.
- (ii) Evitar gradientes de temperatura para no alterar el metabolismo de los microorganismos que son sensibles a cambios de temperatura.

- (iii) Evitar la formación de capas que bloquean el transporte de nutrientes.
- (iv) Mantener los sólidos en suspensión y evitar su deposición, garantizando su disponibilidad para el consumo.
- (v) Mejorar la velocidad de la transferencia molecular.
- (vi) Mejorar la reacción, porque se aumenta la probabilidad de contacto entre sustrato y enzimas, y entre sustrato soluble y microorganismos.
- (vii) Diluir las sustancias inhibidoras y, con ello, la posibilidad de muerte de la biomasa microbiana.

La mezcla se logra agitando el sistema de forma mecánica, con paletas o hélices que giran sobre un eje; de forma hidráulica, utilizando un flujo de reciclo que cae sobre el digestor, que lo mezcla; o de forma neumática, utilizando inyección de gas por la parte inferior del reactor para generar burbujas que suban provocando la mezcla.

Tiempo de residencia

Para que todas las etapas del proceso ocurran, debe asegurarse un tiempo mínimo. Este tiempo se denomina tiempo de retención o residencia del sólido, y debe determinarse considerando la etapa limitante dentro del sistema, es decir, aquella que resulta más lenta.

Por ejemplo, en el análisis PMB (materia prima), dado que las condiciones ambientales son óptimas (pH, temperatura, agitación, etc.), el paso limitante es la cinética microbiana (metabolismo interno). Según la Figura 11, un tiempo de 20 días podría bastar para digerir los residuos de alimentos.

Usualmente, reactores industriales tienen un tiempo de retención entre 14 y 40 días.

Inoculación

Los microorganismos involucrados en la digestión crecen naturalmente en la materia prima si se expone a condiciones anaeróbicas. El crecimiento de las bacterias es lento inicialmente (fase lag del crecimiento), pues estas deben adaptarse al medio, lo que provoca que el consumo de sustrato sea lento. Para reducir el tiempo invertido en la fase lag, la materia prima se inocula con bacterias que ya se encuentran en una fase posterior de crecimiento (exponencial o estacionario). Así, el consumo de sustrato será rápido.

En los digestores suele existir lixiviado (en la industria se le suele llamar *percolado*), que corresponde a la fracción líquida del digestato que se acumula en el fondo del digestor. La salida de lixiviado de la matriz sólida provoca que esta se vaya secando y perdiendo microorganismos. Para solucionar este problema, la materia se vuelve a inocular.

La inoculación más usual corresponde a realizar un reciclo del digestato o solo su fracción líquida, pues contienen microorganismos del proceso. Lo anterior se puede realizar en reactores flujo pistón y batch. En CSTR no es necesario, pues internamente ya existe una mezcla del digestato con el sustrato, de forma continua.

7.1.4 Producto y post tratamiento

7.1.4.1 Biogás

El biogás está compuesto principalmente por metano (50 – 80%) y dióxido de carbono (15 – 50%). Además, hay impurezas que pueden causar problemas de corrosión y que pueden convertirse en emisiones no deseadas, por lo que se recomienda limpiar el gas.

7.1.4.1.1 Composición

En la Tabla 45 se muestra la composición típica del biogás:

Tabla 45: Composición del biogás obtenido de un digestor anaeróbico, y también del gas obtenido de rellenos sanitarios. Elaboración propia con datos de [41].

Compuesto	Unidad	Gas de rellenos sanitarios	Gas de digestor anaeróbico
Metano	[% mol]	[30; 60]	[50; 80]
Dióxido de Carbono	[% mol]	[15; 40]	[15; 50]
Nitrógeno	[% mol]	[0; 50]	[0; 5]
Oxígeno	[% mol]	[0; 10]	[0; 1]
Ácido sulfhídrico	$\frac{mg}{m^3}$	[0; 1000]	[100; 10000]
Amoníaco	$\frac{mg}{m^3}$	[0; 5]	[0; 100]
Cloro total	$\frac{mg}{m^3}$	[0; 800]	[0; 100]
Flúor total	$\frac{mg}{m^3}$	[0; 800]	[0; 100]
Siloxanos	$\frac{mg}{m^3}$	[0; 50]	–

Algunos contaminantes son parte del sustrato y en el reactor se evaporan, como los siloxanos. Esta evaporación depende de la volatilidad de los compuestos y la temperatura del reactor. Otros se generan en la digestión, como el H_2S y H_2 que, si se evaporan, se encontrarán en el biogás. Hay otros compuestos que ingresan al proceso, como O_2 y N_2 provenientes del aire.

La siguiente lista incluye los principales contaminantes del biogás:

- **CO_2 :**

Es formado en diferentes pasos del proceso y su generación reduce la energía del biogás en forma de CH_4 , pues el átomo de carbono ya no puede ser utilizado para formar metano y porque aumenta el volumen de biogás bajando la concentración de metano. El CO_2 y el agua que condensa pueden reaccionar para formar ácido carbónico.

- **H_2O :**

Parte del agua contenida en la biomasa se evapora y el biogás sale saturado con agua. El contenido de agua en el gas está determinado por la presión y temperatura dentro del reactor. El agua causa corrosión al reaccionar con otros compuestos, como CO_2 . El agua, además, baja la energía contenido en el biogás debido a que aumenta su volumen.

El vapor de agua también se forma cuando el biogás es combustionado.

- **H_2S :**

Es formado por bacterias sulfato reductoras. El sulfato se encuentra presente en derivados de la industria del papel y en las microalgas; se genera, además, cuando las proteínas que contienen azufre son digeridas. En combinación con agua (ya sea el agua evaporada en el proceso o la que se genera en la combustión), el ácido sulfhídrico forma ácido sulfúrico (H_2SO_4), siendo ambos corrosivos.

El H_2S es muy tóxico y causa daños a la salud.

- **N_2 y O_2 :**

Se encuentran presentes si entra aire al reactor. El O_2 es consumido dentro del sistema, mientras que el N_2 no. Se debe tener precaución porque el O_2 y el CH_4 pueden formar mezclas explosivas.

- **NH_3 :**

Se produce en la hidrólisis de proteínas. En la combustión, el amoníaco podría dar origen a moléculas de NO_x .

- **Compuestos orgánicos volátiles (COV):**

Estos son alcanos, siloxanos e hidrocarburos halogenados. Los siloxanos (R_2SiO) se encuentran presentes en la materia orgánica y se evaporan; en la combustión genera óxidos de siloxano que se depositan (son insolubles) causando daños en la maquinaria. Los hidrocarburos halogenados con Cl , Br o F se volatilizan; cuando combustionan forman ácidos que causan corrosión.

- **Partículas:**

Existen partículas que son suspendidas por el biogás. Tienen propiedades abrasivas y el agua condensa sobre ellas.

7.1.4.1.2 Técnicas de limpieza

A continuación, se describen las técnicas de remoción de compuestos indeseados en el biogás.

- **CO_2 :**

La remoción de CO_2 , denominada upgrading, se realiza para aumentar la energía por unidad de volumen del biogás y así poder utilizar este último en la red de gas natural o directamente como combustible de vehículos. Esto no es necesario si el gas se utiliza para generar calor o en unidades combinadas de calor y potencia.

Previo a la remoción de CO_2 el biogás se debe secar (remoción de humedad) y desulfurar para no afectar las siguientes etapas.

Las tecnologías para remover el CO_2 son:

➤ Adsorción:

Se utiliza la adsorción con ciclos de presión (PSA), con adsorbentes sólidos como carbón activado, zeolitas o tamiz molecular de carbono. Se aumenta la presión y reduce la temperatura para promover la adsorción del CO_2 en el sólido; luego, el gas sale del equipo y el sólido es desorbido reduciendo la presión dentro del equipo. Esta técnica también remueve H_2S , H_2O y NH_3 .

➤ Absorción:

Esta puede ser física o química. La **absorción en agua** es física, y se ven afectados el CO_2 , especies ácidas como el H_2S y básicas como el NH_3 ; el gas de salida tiene una fracción molar de metano sobre el 96% y el líquido de salida es procesado en un desorbedor. La **absorción física en solventes orgánicos** también es utilizada para remover CO_2 , siendo absorbidas en paralelo moléculas de H_2S y H_2O ; el NH_3 también podría ser absorbido, pero regularmente se evita su absorción porque genera reacciones paralelas indeseadas con el solvente orgánicos. Un ejemplo de absorbente es el tetraetilenglicol-dimetil-éter. La **absorción química en solventes orgánicos**, comúnmente denominada absorción en aminas, remueve CO_2 y también H_2S , debido a que estas moléculas generan enlaces con un solvente orgánico, que puede ser Monoetanolamina (MEA), Dietanolamina (DEA) o Metildietanolamina (MDEA).

➤ Permeación:

Se utilizan membranas de separación de alta o baja presión. La permeabilidad de los diferentes gases variará de una membrana a otra, estableciendo con ello la selectividad a una especie u otra.

Las membranas de acetato de celulosa y poliimidas aromáticas tienen una permeabilidad alta a CO_2 , H_2O , NH_3 y H_2S en comparación con CH_4 . Al igual que el CH_4 , las permeabilidades de N_2 y O_2 son bajas. Así, se pueden remover aquellas moléculas con permeabilidad alta.

➤ Upgrading criogénico:

En esta operación son aprovechados los puntos de ebullición del CH_4 ($-161^\circ C$) y de sublimación del CO_2 ($-78,48^\circ C$). La temperatura es reducida hasta $6^\circ C$ para adsorber H_2S y siloxanos en sólidos. Luego, el gas es comprimido a $18 - 25 [bar]$ y se reduce la temperatura a $-25^\circ C$. A esta temperatura se separa H_2O (solidificado) y los siloxanos remanentes (condensados). Se realiza un proceso de desulfurización con alguna de las técnicas disponibles. Y, finalmente, se reduce la temperatura a $-50^\circ C$ o $-59^\circ C$, causando la licuefacción y posterior separación del CO_2 .

• H_2O :

La concentración de agua puede ser reducida cambiando su equilibrio en el gas por medio de variaciones en la presión y la temperatura con compresores y enfriadores, respectivamente. También, puede ser absorbida en soluciones de glicol o sales higroscópicas (la sal se disuelve en

el agua y no se puede volver a regenerar); o adsorbida en sílica, óxido de aluminio, óxido de magnesio, carbón activado o zeolitas, elementos que pueden ser regenerados.

Aquellas partículas que se disuelven en agua, como partículas y siloxanos, son removidas en conjunto con el agua.

- **H_2S :**

Se puede remover de forma biológica con microorganismos que oxidan H_2S con O_2 (requiere inyección de aire), generando azufre elemental (precipita) y dióxido de azufre. Se suelen instalar estructuras en la parte superior del digestor para que estas bacterias crezcan. También puede utilizarse un filtro biológico luego del reactor y, en este caso, el azufre que se genera queda en la parte líquida del filtro. Se debe tener precaución al inyectar O_2 , pues puede afectar el proceso anaeróbico y formar mezclas explosivas con el metano.

También es factible remover físicamente absorbiéndolo en agua, por ejemplo, utilizando un scrubber con solución acuosa de $NaOH$, $FeCl_2$ o $Fe(OH)_3$. La solución puede ser regenerada con microorganismos oxidantes. Otra opción es absorber en solventes orgánicos con mayor solubilidad que el agua, que usualmente se regeneran con el aire, produciendo azufre elemental. También puede adsorberse en carbón activado, utilizando KI o H_2SO_4 como catalizadores. Otra alternativa es condensar el CO_2 del biogás, y utilizar este líquido para disolver el ácido.

Se puede remover químicamente agregando al digestor $FeCl_2$, $FeCl_3$ o $FeSO_4$, con el objetivo de que los iones generados Fe^{2+} y Fe^{3+} reaccionen con el ácido para formar FeS (insoluble) que precipita.

- **N_2 y O_2 :**

Se pueden remover por adsorción con carbón activado. Son separados también en la desulfurización y upgrading.

- **NH_3 :**

Se disuelve en agua, por lo que es separado cuando el gas se seca. También se remueve en el upgrading.

- **Siloxanos:**

Se absorbe con solventes orgánicos, ácidos fuertes o bases fuertes; también por adsorción en carbón activado.

- **Partículas:**

Se remueve cuando el gas se seca. También con ciclones y filtros.

- **Hidrocarburos halogenados:**

Se remueve adsorbiendo con carbón activado y con el upgrading.

7.1.4.2 Digestato

El digestato es el efluente sólido y líquido digerido de la producción de biogás. Tiene un alto valor como fertilizante y para utilizarlo como tal, debe tener una alta calidad y, estar libre de patógenos y contaminantes.

7.1.4.2.1 Calidad del digestato

Las características del digestato dependen del tipo de materia prima y las condiciones del proceso de digestión anaeróbica. Para ser utilizado como fertilizante debe cumplir con lo siguiente:

- Pureza: debe estar libre de impurezas físicas, como plástico, piedras, vidrio, material no digerible, etc.
- Higiene o sanitización: debe estar libre de patógenos y de todo contenido biológico indeseado.
- Seguridad: debe ser seguro por los organismos vivos y el medio ambiente, libre de contaminantes químicos.

Los límites permitidos de contaminantes químicos por país se muestran la Tabla 46 y Tabla 47.

Tabla 46: Límites de contaminantes químicos aceptados en diferentes países para el digestato. Elaboración propia con datos de [41].

País	Contaminante $\left[\frac{mg}{kg \text{ materia seca}}\right]$						
	Cd	Pb	Hg	Ni	Zn	Cu	Cr
Austria ^a	3(10)	100(600)	1(10)	100(400)	– (3.000)	–(700)	100
Canadá	3	150	0,6	62	500	100	210
Dinamarca	0,8	120	0,8	30	4.000	1000	100
Finlandia	1,5	100	1	100	150	600	300
Francia	20	800	10	200	3.000	1000	3.000
Alemania	10	900	8	200	2.500	800	900
Irlanda	20	750	16	300	2.500	1000	1.000
Noruega	2	80	3	50	800	650	100
Suecia ^b	1	100	1	50	800	600	100
Suiza ^c	0,7	45	0,4	25	200	70	na
Países Bajos	1,25	100	0,75	30	300	75	75
Reino Unido ^d	1,5	200	1	50	400	200	100

^a Valores entre paréntesis expresan límites de carga por un período de 2 años, en gramos por hectárea.

^b Certificación sueca del digestato.

^c Guía Suiza para la utilización de compost y digestato. Se muestran solo valores para el digestato.

^d Estándar disponibles públicamente 110.

Tabla 47: Ejemplos de valores límite de contaminantes orgánicos en productos derivados de residuos utilizados como fertilizantes. Elaboración propia con datos de [41].

Contaminante orgánico	País		
	Austria	Dinamarca	Suiza
PAHs (Hidrocarburos aromáticos policíclicos)	6 $\left[\frac{mg}{kg \text{ mat. seca}} \right]$	3 $\left[\frac{mg}{kg \text{ mat. seca}} \right]$	4 $\left[\frac{mg}{kg \text{ mat. seca}} \right]$
PCDD/F (Dioxinas y furanos)	20 $\left[\frac{ng \text{ TEQ}}{kg \text{ mat. seca}} \right]^a$		20 $\left[\frac{ng \text{ ITEC}}{kg \text{ mat. seca}} \right]^b$
Pesticidas clorados	0,5 $\left[\frac{mg}{kg \text{ producto}} \right]$		
PCB (Bifenilos policlorados)	0,2 $\left[\frac{mg}{kg \text{ mat. seca}} \right]$		
AOX (Compuestos orgánicos halogenados)	500 $\left[\frac{mg}{kg \text{ mat. seca}} \right]$		
LAS (Sulfonato de alquilbenzeno lineal)		1.300 $\left[\frac{mg}{kg \text{ mat. seca}} \right]$	
NPE (nonilfenoles)		10 $\left[\frac{mg}{kg \text{ mat. seca}} \right]$	
DEPH (di-2- (etilhexil) - ftalato)		50 $\left[\frac{mg}{kg \text{ mat. seca}} \right]$	

^a TEQ: Equivalente de toxicidad.

^b ITEC: Equivalente internacional de toxicidad.

Se destaca que Suiza cuenta con los más bajos límites de contaminantes permitidos.

Los patógenos, como bacterias, virus, esporas, parásitos intestinales y semillas, suelen ser efectivamente inactivados por el proceso de digestión anaeróbica, debido a la temperatura y el tiempo que la materia prima se encuentra a dicha temperatura (tiempo de retención). Los patógenos provenientes de plantas y semillas, son significativamente o totalmente destruidos en la digestión a temperatura mesofílica, por ejemplo, los nematodos de patata *Globoderar ostochiensis* y *G. pallida* son destruidos en un par de días a 35°C; *Fusarium oxysporum*, que afecta al maíz y a los cereales, son inactivados en un día a temperatura termofílica; y *Plasmodiaphora brassicae*, que es muy difícil de inactivar, no sobrevive luego de 14 días a 55°C. El poder de germinación de las plantas también se reduce considerablemente. En general, se asume que los patógenos son inactivados en digestiones anaeróbicas a temperatura termofílica.

Además, en el digestato podrían existir patógenos provenientes de animales si la materia prima utilizada corresponde a estiércol de animales. Este caso no se estudia porque no es atingente a la materia prima utilizada en el trabajo (residuos de alimentos y poda). Cabe mencionar que no se encontraron normas del digestato referentes a patógenos de plantas, pero sí de animales.

7.1.4.2.2 Procesamiento del digestato

El digestato puede ser utilizado sin requerir otro tratamiento. Sin embargo, podrían existir aspectos a resolver, pues su transporte y manejo son costosos considerando su alto volumen y bajo contenido de sólidos, además, en algunos países está regulado el nitrógeno que puede ser aplicado por unidad de tierra, así que la utilización del digestato está regulada.

Debido a los problemas anteriores, este subproducto suele procesarse para: (i) ser acondicionado con el fin de producir un fertilizante estandarizado y así mejorar su calidad y comerciabilidad; y (ii) remover nutrientes y materia orgánica del digestato, y biodisponer este último en una planta de tratamiento de aguas.

En la Figura 15 se muestra la composición de las fracciones del digestato: la fracción sólida contiene principalmente fósforo; y la líquida, nitrógeno y potasio.

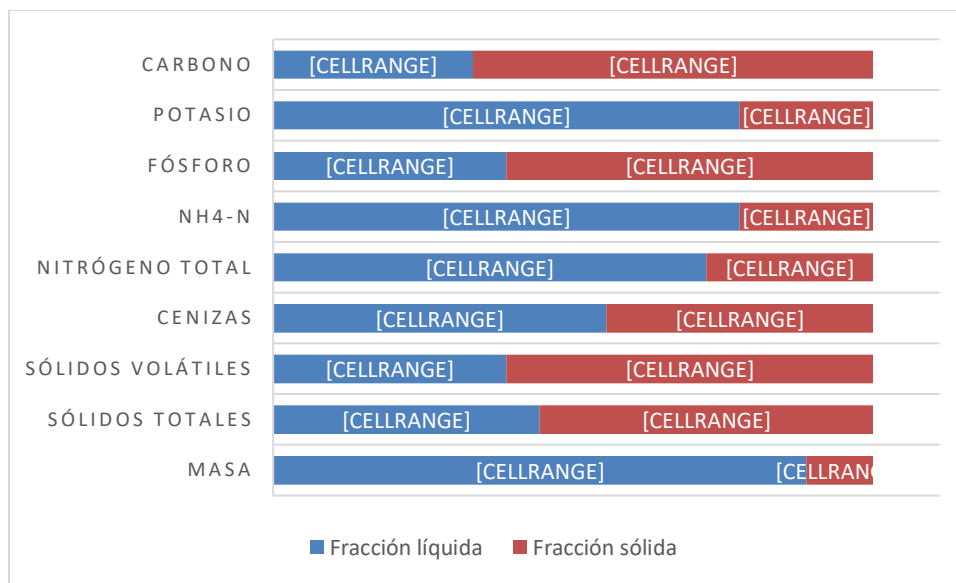


Figura 15: Composición de la fracción líquida y fracción sólida del digestato. Elaboración propia con datos de [41].

Existen diferentes opciones de procesamiento, que se muestran en la Figura 16. Si solo se desea recuperar el sólido, una opción es evaporar el líquido. Si se desea recuperar tanto la fracción líquida como la sólida, es conveniente realizar una separación sólido – líquido, pues esto permite utilizar y transportar de forma diferenciada ambos productos, dependiendo de sus características.

El digestato sólido (fracción sólida) puede ser utilizado como fertilizante, compostado o incluso incinerado; mientras que la fracción líquida, puede ser utilizada como fertilizante líquido o ser descartada. También, la fracción sólida suele ser reutilizada, mezclándola con materia prima para alimentar el digestor, y así aumentar el contenido de materia seca o inocular con microorganismos. Por otro lado, la fracción líquida suele ser reciclada al digestor por su alto contenido de nutrientes y microorganismos, en este caso el líquido corresponde a lixiviado, denominado *percolado* en la industria.

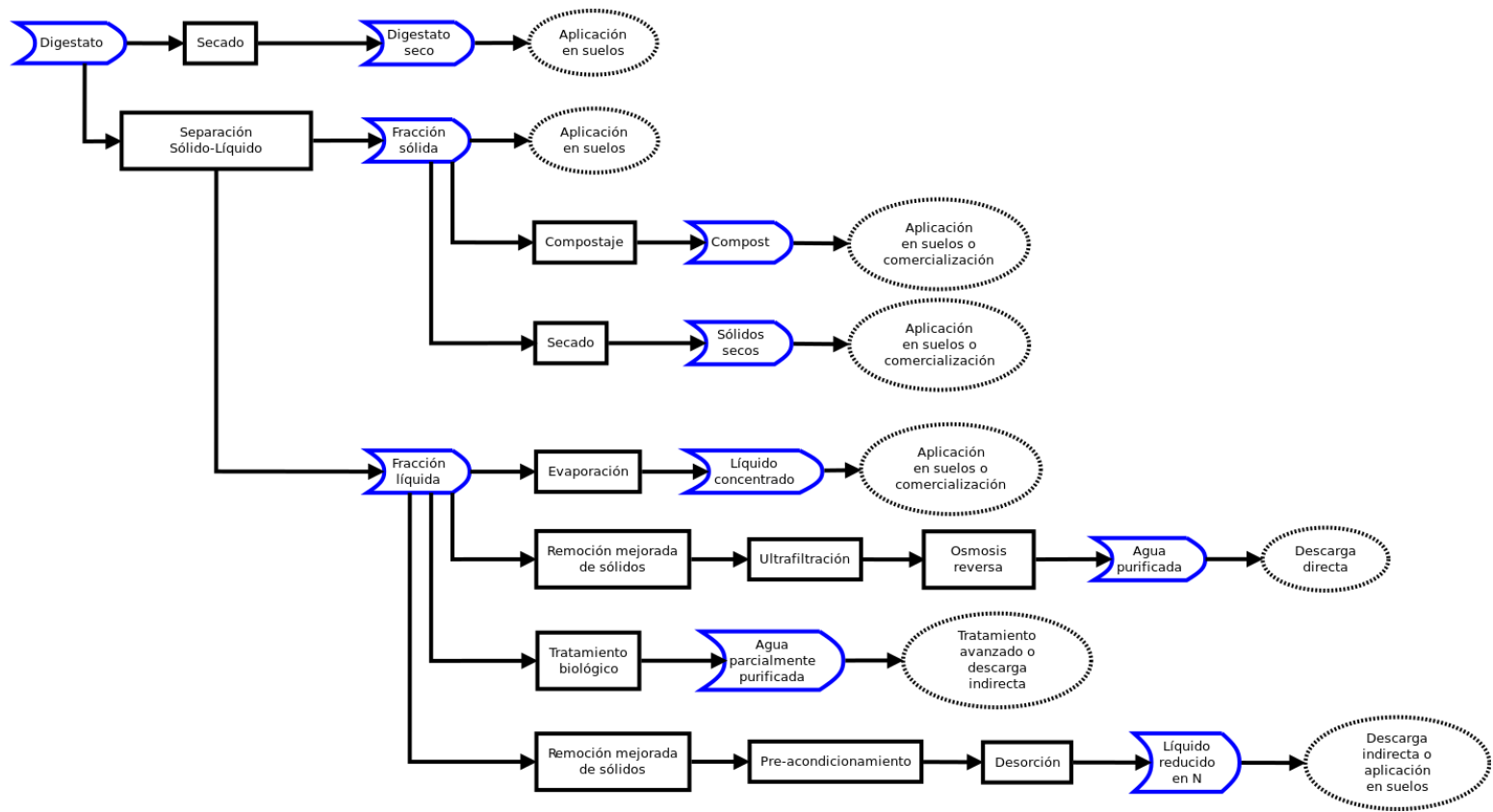


Figura 16: Diferentes opciones para el procesamiento de digestato. Basado en [41].

7.1.4.2.3 Usos del digestato

El reciclaje del digestato como fertilizante mejorador de suelos es la utilización más sustentable para este producto, pues permite restituir nutrientes a la tierra, formando parte del ciclo del carbono.

Los países europeos han adoptado una aplicación máxima de $170 \left[\frac{kg}{ha} \right]$ al año, con prohibición de utilizarlo el período de invierno, según la norma.

Los problemas que podría traer la aplicación en la tierra es pérdida de nitrógeno por evaporación de amoníaco y lixiviación de nitrato. Para evitar esto, las prácticas recomendadas son:

- El digestato puede ser aplicado al inicio del crecimiento de la planta (en primavera).
- La condición óptima de aplicación del mismo es alta humedad, pero no excesiva lluvia ni viento.
- Los climas secos, soleados y ventosos incrementan la evaporación y reducen el contenido de nitrógeno.
- Se recomienda mezclar moderadamente el digestato antes de la aplicación.
- Es preferible aplicar solo en frío.
- Incorporar el digestato en el suelo, mezclando bajo tierra y no esparciendo superficialmente.

7.1.5 Reflexiones

A continuación, se concluye lo más importante de la sección 7.1 Fundamentos Físicoquímicos y Biológicos, incluyendo reflexiones al respecto, que aportarán al diseño del equipo.

Sobre la materia prima:

La materia prima que será procesada en el equipo es variada, contiene diferentes tipos de sustratos: residuos de poda, jardín, frutas y alimentos en general. Estos materiales tienen características distintas de humedad, contenido de sólidos, nutrientes, sustancias inhibidoras y rendimiento de metano, que son los aspectos clave en el proceso de digestión anaeróbica.

Se tienen datos sobre algunas características mencionadas para cada tipo de sustrato, pero se desconoce su proporción en la materia prima. Se sabe, sin embargo, que los residuos de alimentos son los más abundantes, por lo que, si se tuviese que escoger solo un sustrato a analizar, serían elegidos como representantes. De no ser este tipo de residuos, serían escogidos los residuos de frutas, pues tienen características similares.

Se debe determinar aún el contenido de algunos nutrientes y sustancias inhibidoras. Respecto al rendimiento de metano, existen 3 formas de calcularlo. Cabe destacar que el rendimiento puede ser utilizado para formular el modelo fenomenológico que permitirá dimensionar y diseñar el equipo, o bien para validarlo.

Los residuos de alimentos son los que más metano generan, posiblemente porque su contenido de lípidos, moléculas con alto rendimiento, son más altas que para el resto de los sustratos. Además, el contenido de lignocelulosa es reducido, lo que favorece la degradación.

Sobre al pretratamiento:

Considerando el tamaño de partícula requerido, se debe reducir las dimensiones de la materia prima. De las opciones disponibles, el pretratamiento mecánico es el más adecuado debido a que su complejidad es abordable en el contexto en el que se implementará la solución (una vivienda).

El pretratamiento biológico podría ser complementario al anterior para mejorar la conversión de la materia prima. Sin embargo, esta mejora posiblemente no sea tan importante porque los residuos de alimentos son fáciles de digerir, así que su cinética es alta, en comparación con otros residuos.

Sobre la etapa central de Digestión Anaeróbica:

Para el diseño del equipo se desarrollará un modelo fenomenológico de la digestión anaeróbica, que se sostendrá en los pasos mencionados del proceso. También será necesario tener presentes de las condiciones detalladas a lo largo de las secciones anteriores. En la Tabla 48 se muestra un resumen de las condiciones más importantes.

La digestión anaeróbica se divide en 4 fases, donde se suelen destacar la primera y la última: hidrólisis y metanogénesis. El proceso ocurre gracias a 5 tipos de bacterias, cada una con su rol y cinética particulares. Las bacterias metanogénicas son las más sensibles a cambios en el medio, así que posiblemente presentan la cinética más lenta.

El pH del sistema de digestión se autorregula, característica que representa una ventaja de trabajar con un proceso natural.

Los nutrientes *N* y *P* suelen ser suficientes para la digestión si la materia prima corresponde a una mezcla de sustratos, así también los micronutrientes. Dado que la alimentación del equipo será una mezcla de residuos orgánicos, no será necesario tener un cuidado especial en la adición de estos nutrientes. Particularmente el *N* deberá suministrarse de forma adecuada por su gran importancia en el proceso. También, se debe asegurar suficiente *C* y *S*. El suministro de las especies mencionadas se puede lograr mezclando residuos de forma específica para contrarrestar el déficit de dichos nutrientes.

El contenido de agua de los residuos también es importante para el proceso. Se requiere una humedad sobre el 55%, condición que generalmente cumplen los residuos de alimentos, pero dada su importancia, se debe especial cuidado con suministrar lo requerido.

Antibióticos y desinfectantes podrían ser dañinos, pero no se han reportado niveles críticos ni tratamientos, así que se deduce que su efecto no es importante para el sistema considerado.

El rango de temperatura que presenta mayores ventajas es el mesofílico. Para cumplir con los requerimientos térmicos se necesitan medidas, que consiste en, al menos, aislación. El rango termofílico presenta la ventaja de mejorar la transferencia de masa, sin embargo, este efecto también podría lograrse con agitación. Así, una alta temperatura no es fundamental.

La agitación y mezcla tiene muchos efectos positivos para las cinéticas y condiciones del sistema, así que es preferirle contar con ellas.

El tiempo de residencia depende de la etapa limitante, es decir, aquel paso que resulta más lento. Es fundamental determinar este tiempo para el diseño del equipo.

Inocular permite mejorar la cinética inicial de los microorganismos, y se puede lograr reciclando digestato o solo su fracción líquida. Por lo tanto, sería conveniente incluir reciclos en el equipo.

Tabla 48: Resumen condiciones ideales para la digestión anaeróbica.

Condiciones		Unidad	Valores ideales		Valor típico
			Hidrólisis	Metanogénesis	
Tamaño de partícula		[mm]	1 – 2		
pH			4 – 6	6,5 – 7,2	7
Proporción de macronutrientes	COD _{deg} : N: P: S		1000: 5: 1: 1	350: 5: 1: 1	
	C: N		10: 1 – 45: 1	20: 1 – 30: 1	
	C: P			120: 1	
	C: S			600: 1	
Concentración de inhibidores o sustancias tóxicas	O ₂	$\left[\frac{mg}{l}\right]$		0	
	NH ₃	$\left[\frac{gN}{l}\right]$ de NH ₄ ⁺		< 1,5	
	H ₂ S	$\left[\frac{mg}{l}\right]$		< 30	
	Cu	$\left[\frac{mg}{l}\right]$		< 40	
	Cd	$\left[\frac{mg}{l}\right]$		< 20	
	Zn	$\left[\frac{mg}{l}\right]$		< 150	
	Ni	$\left[\frac{mg}{l}\right]$		< 10	
	Pb	$\left[\frac{mg}{l}\right]$		< 340	
	Cr	$\left[\frac{mg}{l}\right]$		< 100	
Humedad		[% peso]		> 55	
Temperatura	Mesofílica	[°C]		35 – 40	
	Termofílica	[°C]		55 – 60	
Tiempo de residencia		[días]			14 – 40

Sobre el producto y el post tratamiento:

Respecto al biogás, se debe prestar especial atención en remover el H₂S, porque es peligroso para el ambiente y las personas. También, se debe evitar la entrada de O₂ al equipo, porque además de hacer inviable el proceso anaeróbico, puede provocar explosiones en presencia de CH₄.

Para remover H₂S, las técnicas más pertinentes, considerando el contexto domiciliario, son: tratamiento biológico, absorción y adsorción. Se destaca que el carbón activado es capaz de remover la mayoría de los compuestos indeseados, a saber: H₂S, NH₃, entre otros.

Respecto al digestato, los problemas que este presenta pueden ser evitados en un proceso a pequeña escala si la aplicación en el suelo es cercana al equipo, reduciendo con ello el transporte y manipulación. Bajo este contexto, no es necesario realizar un post tratamiento.

Para utilizar el digestato, se deben tener presentes los límites de contaminantes químicos permitidos. Los límites impuestos por Suiza son los más exigentes y mejor documentados, y serán tomados como referencia en este trabajo. Los patógenos suelen ser inactivados con el proceso.

Existe una serie de recomendaciones para una correcta aplicación del digestato en el suelo, que es conveniente tener en consideración en la implementación de la solución. En particular, se debe evitar su uso en invierno, pues no es una época de crecimiento de plantas.

7.2 CINÉTICA DEL PROCESO

En esta sección se describen las ecuaciones que representan las cinéticas de diferentes procesos que se dan en la digestión anaeróbica. Cabe señalar que muchas de las cinéticas aquí presentadas son excluyentes, pues representan a diferentes pasos limitantes posibles en el proceso. El planteamiento de una cinética será materia del Capítulo 11 Dimensionamiento.

7.2.1 Reacciones

Las cinéticas de reacciones dependen de constantes, que son obtenidas experimentalmente en condiciones óptimas de reacción. Por lo tanto, estos valores pueden ser utilizados en el diseño de equipos, siempre y cuando las condiciones que afectan la cinética sean las mismas que la de los experimentos.

7.2.1.1 Solubilización

La generación de un sustrato soluble se encuentra dada por la cinética de la Ecuación (7):

$$r_{s1} = \frac{(k \cdot A_v \cdot X)}{K_x + X} \quad (7)$$

Donde:

r_{s1} = la velocidad generación de sustrato soluble, $\left[\frac{\text{masa}}{\text{tiempo} \cdot \text{volumen}} \right]$.

X = concentración de microorganismos, $\left[\frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \right]$.

A_v = superficie expuesta por unidad de área, $[\text{área}]$.

k = velocidad máxima con la que se puede degradar el sustrato, $\left[\frac{m}{s} \right]$.

K_x = la concentración de microorganismos para cuando la velocidad es $\frac{k}{2}$, $\left[\frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \right]$.

7.2.1.2 Consumo de sustrato

El consumo del sustrato soluble por parte de los microorganismos queda descrito por la ecuación de Monod (Ecuación (8)). La ecuación asume que el transporte de las moléculas a través de la pared de las células y el transporte interno en ellas no limita el proceso, sino que solo representa la velocidad de consumo a partir de las reacciones involucradas.

$$-r_{s2} = -\frac{(k_m \cdot S \cdot X)}{K_s + S} \quad (8)$$

Donde:

$-r_{s2}$ = velocidad del consumo de sustrato soluble por parte de los microorganismos, $\left[\frac{\text{masa}}{\text{tiempo} \cdot \text{volumen}} \right]$.

S = concentración de sustrato soluble (S), $\left[\frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \right]$.

k_m = velocidad máxima de consumo, $\left[\frac{m}{s} \right]$.

K_s = concentración de microorganismos cuando la velocidad es $\frac{k_m}{2}$, $\left[\frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \right]$.

El crecimiento microbiano queda descrito por la Ecuación (9):

$$r_m = Y_m \cdot (-r_{s2}) - k_e \cdot X \quad (9)$$

r_m = velocidad de crecimiento o generación de microorganismos, $\left[\frac{\text{masa}}{\text{volumen} \cdot \text{tiempo}} \right]$.

Y_m = coeficiente de rendimiento del crecimiento, $\left[\frac{\text{masa de microorganismos crecidos}}{\text{masa de sustrato utilizado}} \right]$.

K_e = coeficiente de respiración endógena que representa la muerte celular si no hay sustrato, $\left[\frac{1}{\text{tiempo}} \right]$

7.2.1.3 Generación de metano

Se tiene información sobre la cinética de generación de metano, que se ha obtenido de forma experimental con el análisis Potencial Bioquímico de Metano (PBM). Dicho análisis se realiza en condiciones muy favorables, por lo que los rendimientos que se alcanzan son mejores a lo que puede lograrse a nivel industrial. Posiblemente, dada las buenas condiciones, el proceso está limitado por reacciones y no transferencias de masa o calor.

En la sección 7.1.1 Materia prima se muestran resultados de dicho análisis de rendimiento de metano para diferentes sustratos. Las curvas obtenidas pueden ser modeladas según la siguiente fórmula, que puede utilizarse para predecir la generación de metano:

$$Y = Y_{max} [1 - P \cdot e^{-k_1 t} - (1 - P) e^{k_2 t}] \quad (10)$$

Donde:

Y = rendimiento acumulativo de metano en el tiempo t , $\left[\frac{\text{volumen}}{\text{masa}} \right]$.

t = tiempo en el que se evalúa el rendimiento, $[\text{tiempo}]$.

Y_{max} = rendimiento máximo, $\left[\frac{\text{volumen}}{\text{masa}} \right]$.

k_1 = tasa de degradación de la materia orgánica rápida de degradar.

k_2 = tasa de degradación de la materia orgánica lenta de degradar.

P = proporción entre materia orgánica rápida y lenta de degradar.

En la siguiente tabla se muestran los parámetros anteriores para diferentes materias primas:

Tabla 49: Parámetros cinéticos de la modelación del Potencial de Metano Bioquímico (BMP) para diferentes materias primas. Elaboración propia con datos de [43].

Parámetro	Residuos de alimentos	Maíz descartado de silos	Residuos de ganadería caprina
$Y_{max} \left[\frac{l CH_4}{g SV agregado} \right]$	0,470	0,345	0,260
P	0,88	0,6	0,33
k o k_1	1,02	1,50	0,50
k_2	0,06	0,07	0,05
R^2	0,998	0,9987	0,9978

7.2.2 Transferencias

Como se ha mencionado en la sección 7.1.3 Etapa central: Digestión Anaeróbica, diferentes moléculas viajan a través del fluido (agua) y el sólido (sustrato), y en algunos casos son transferidos a la fase gaseosa.

Estudiar la transferencia en el medio líquido y en el sólido, por separado, podría ser complicado porque el agua se encuentra en los poros del sólido y alrededor de él. Así, es más fácil analizar la transferencia que ocurre en los medios de forma conjunta.

Para representar la digestión anaeróbica puede utilizarse como base un modelo existente para procesos de compostaje (ver Anexo E.1).

Se asume que la fase líquida donde ocurre la digestión está compuesta por muchas matrices separadas por agua. Estas matrices están compuestas por partículas sólida de sustrato, microorganismos y agua en los poros del sustrato. La fase gaseosa se encuentra en la superficie de la fase líquida. En Figura 17 se muestra un esquema del modelo mencionado, que incluye el sólido y sus poros, y el agua rodeando la partícula y llenando los poros. Note el lector que el sistema está compuesto por cuatro matrices.

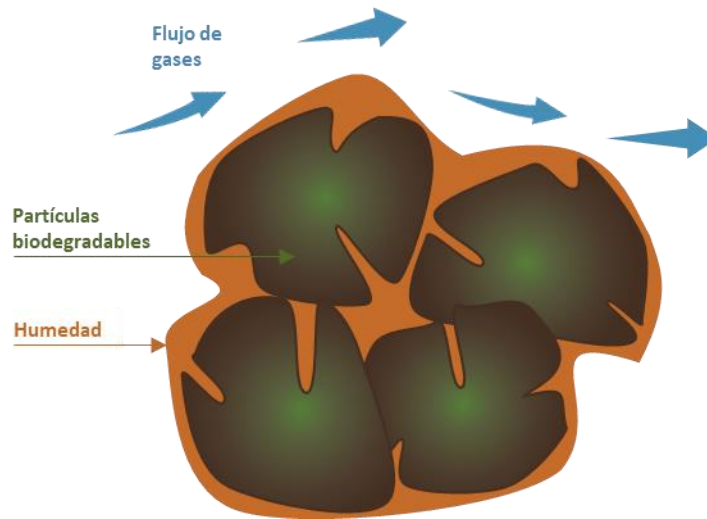


Figura 17: Esquema general de la mezcla de digestión anaeróbica. Basado en [42][41].

En este caso, dentro de la matriz, la transferencia de moléculas (como CH_4 , CO_2 , etc.) se da solamente por difusión, pues difícilmente existe advección dentro de la matriz debido a su estructura interna (sólida y porosa). Puede existir transferencia entre matrices, incluyendo tanto microorganismos como sustrato soluble. Además, si hay agitación, es posible que el fluido alrededor de las partículas se mueva, por lo tanto, podría presentarse una transferencia advectiva y difusiva. Por otro lado, las moléculas que se transportan en la fase gas podrían verse afectadas por difusión y advección si es que existe un flujo de gases. A partir de lo anterior se concluye que, posiblemente, el fenómeno más lento corresponda a la difusión de moléculas dentro de la matriz, configurando el paso limitante.

A continuación, se describen las ecuaciones que representan las transferencias mencionadas.

1. La transferencia por difusión está dada por la ley de Fick, y podría describir la transferencia de masa en la matriz (medio sólido – líquido):

$$J_1 = -A \cdot D_{AB} \cdot \frac{dC}{dz} \quad (11)$$

Donde:

J_1 = flujo difusivo de masa de la molécula de interés en el medio, $\left[\frac{\text{masa}}{\text{tiempo}} \right]$.

A = área de transferencia, $[\text{longitud}^2]$.

D_{AB} = difusividad de la molécula en el medio, $\left[\frac{\text{longitud}^2}{\text{tiempo}} \right]$.

$\frac{dC}{dz}$ = variación de la concentración de la molécula en el espacio (dirección espacial z), $\left[\frac{\text{masa}}{\text{volumen} \cdot \text{longitud}} \right]$.

El término $\frac{dC}{dz}$ suele ser una curva, pero por simplicidad puede ser aproximado a una recta.

Considerando el supuesto anterior y que el medio de interés tiene una interfase, la Ecuación (11) puede ser escrita como:

$$J_1 = -A \cdot D_{AB} \cdot \left(\frac{C_i - C}{\delta_l} \right) \quad (12)$$

Donde:

C_i = concentración de la molécula en la interfase del medio, $\left[\frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \right]$.

C = concentración de la molécula en el seno del medio, $\left[\frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \right]$.

δ_l = ancho desde la interfase al seno de medio, $[\text{longitud}]$.

El coeficiente de difusividad puede aproximarse con la siguiente Ecuación (13).

$$D = \frac{7,4 \times 10^{-8} \cdot T_k \cdot (F \cdot M)^{0,5}}{\mu \cdot V_o^{0,6}} \quad (13)$$

Donde:

D = difusividad en el líquido, $\left[\frac{\text{longitud}^2}{\text{tiempo}} \right]$.

T_k = temperatura, $[K]$.

M = masa molar del líquido solvente, $\left[\frac{\text{masa}}{\text{mol}} \right]$.

F = factor de asociación para el solvente. Para el agua es 2,6.

μ = viscosidad del líquido, $[cP]$

V_o = volumen molal del soluto (molécula de interés) en el punto de ebullición, $\left[\frac{\text{longitud}^3}{\text{mol}} \right]$.

En el agua, se espera que la difusividad en las matrices sea menor a lo que establece la ecuación anterior, debido a que: (i) las moléculas deben rodear la partícula, por lo que su trayectoria recorrida aumenta; y (ii) las células secretan moléculas de polisacáridos que aumentan la viscosidad y, por lo tanto, la resistencia al transporte.

El flujo de masa transferido puede aumentar si el área de transferencia crece, ligada, en este caso, con el área superficial de la matriz. Esta puede aumentar si se incrementa la porosidad de las partículas. También, si una matriz se parte en dos, el área de cada una es menor a la original, sin embargo, el área total aumenta, así que el flujo total crece. La transferencia por difusión y advección está representada por la Ecuación (14), donde se ha considerado que el medio tiene interfase. Esta podría describir la transferencia en la fase gas o en la fase líquida entre matrices

$$J_2 = A \cdot k_c \cdot (C_i - C) \quad (14)$$

Donde:

J_2 = flujo de masa convectivo de la molécula de interés en el medio, $\left[\frac{\text{masa}}{\text{tiempo}} \right]$.

k_c = coeficiente global de transporte masa (de la molécula en el medio), $\left[\frac{\text{longitud}}{\text{tiempo}} \right]$.

Nótese que para aumentar el flujo de masa transferido se puede aumentar el área de las partículas de sustrato volviéndolas más porosas, reduciendo su tamaño y/o aumentar el valor de h agitando más el medio.

7.2.3 Reflexiones

La forma de la ley cinética dependerá de la etapa limitante. Esta característica del sistema cambiará con el diseño del equipo y la fisicoquímica intrínseca del sistema.

Se tiene información sobre la estructura de las ecuaciones que gobiernan las reacciones de solubilización y consumo de sustrato, y del crecimiento microbiano. Además, se cuenta con datos de generación de metano.

El proceso puede ser modelado considerando una matriz compuesta por una partícula sólida de sustratos, microorganismos y agua, rodeadas por agua. Posiblemente, de las transferencias existentes en el sistema, la transferencia de masa en la matriz sea la más lenta.

En el diseño, será importante determinar cuál es el paso limitante. En condiciones óptimas, es posible que limiten las reacciones; las transferencias pueden ser aceleradas reduciendo la resistencia de los medios, agitando, disminuyendo el tamaño de las partículas o aumentando el área de transferencia.

7.3 REFLEXIONES FINALES SOBRE LOS FUNDAMENTOS

En este capítulo se ha descrito el proceso de digestión anaeróbica y compostaje, considerando las características que debe tener la materia prima, el pretratamiento requerido, las etapas de los procesos, microorganismos involucrados, variables o condiciones, y el producto generado y su post tratamiento.

En este capítulo también se presentaron ecuaciones que permiten describir las cinéticas de transferencia de masa y reacciones.

Con la información de este capítulo, se podrán definir las etapas de los procesos, que permitirán configurar las operaciones unitarias del equipo. Además, los datos entregados serán utilizados para desarrollar modelos fenomenológicos con el fin de dimensionar y, más tarde, diseñar el equipo.

Capítulo 8

ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se realiza un estudio del estado del arte del compostaje y digestión anaeróbica. Se presentan los sistemas y equipos utilizados para realizar dichos procesos, que serán de utilidad en el diseño de la solución.

El proceso de digestión anaeróbica puede ser dividido en 3 etapas u operaciones unitarias, que han sido explicadas en el Capítulo 7 Fundamentos, y son resumidas en la Figura 18.

El pretratamiento consiste en una conminución para reducir el tamaño de partícula de la materia prima y/o separación de materiales indeseables de esta, como plástico, metales, vidrios, etc.

La etapa principal corresponde a la digestión anaeróbica: la materia prima se descompone generando biogás y un subproducto, digestato. Es importante que no exista presencia de oxígeno. Esta fase puede dividirse en dos y ocurrir en dos reactores en serie (fermentación multietapa), debido a las condiciones de operación requeridas en cada caso. En esta etapa puede utilizarse digestato como reciclo para proveer de microorganismos al proceso.

El post tratamiento incluye la eliminación o reducción de la concentración de algunos componentes indeseados en el biogás, principalmente H_2S , para que este gas pueda ser combustionado de forma segura. Por otro lado, el digestato puede ser tratado para reducir su humedad y contenido de otras sustancias, aunque puede ser aplicado directamente a la tierra como fertilizante.

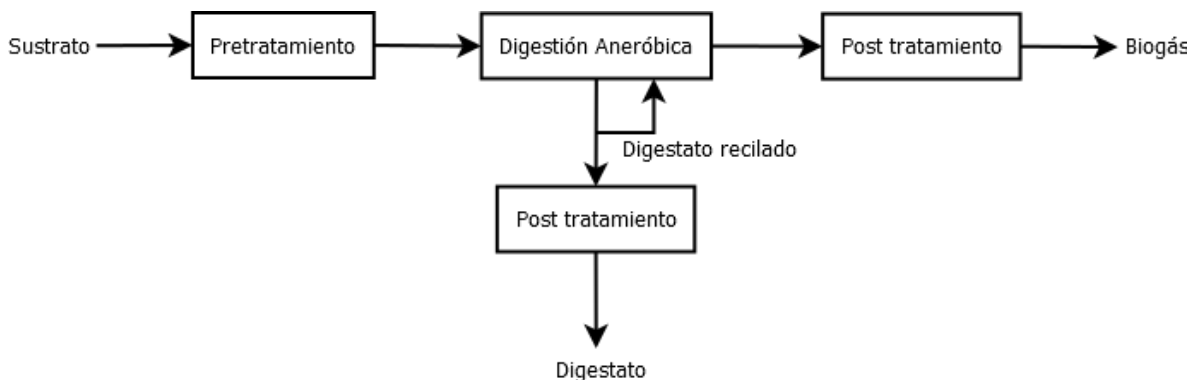


Figura 18: Diagrama de bloques del proceso de la digestión anaeróbica.

8.1 SISTEMAS DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA

En esta sección se abordan los tipos de sistemas de digestión anaeróbica, y las condiciones requeridas en el pre y post tratamiento.

Las tecnologías de digestión anaeróbica se clasifican según su contenido de sólidos en dos tipos: sistemas para materiales húmedos y materiales sólidos, donde este último se subdivide en sólidos apilables y lodos.

8.1.1 Sistemas de digestión para sólidos apilables

Se utiliza para tratar material con contenido de humedad menor al 60% en peso. La consistencia de la alimentación es de sólidos apilables. Este proceso suele ser utilizado para tratar residuos de alimentos y poda.

Se recomienda ver la Figura 19 para seguir la explicación del sistema en las siguientes secciones.

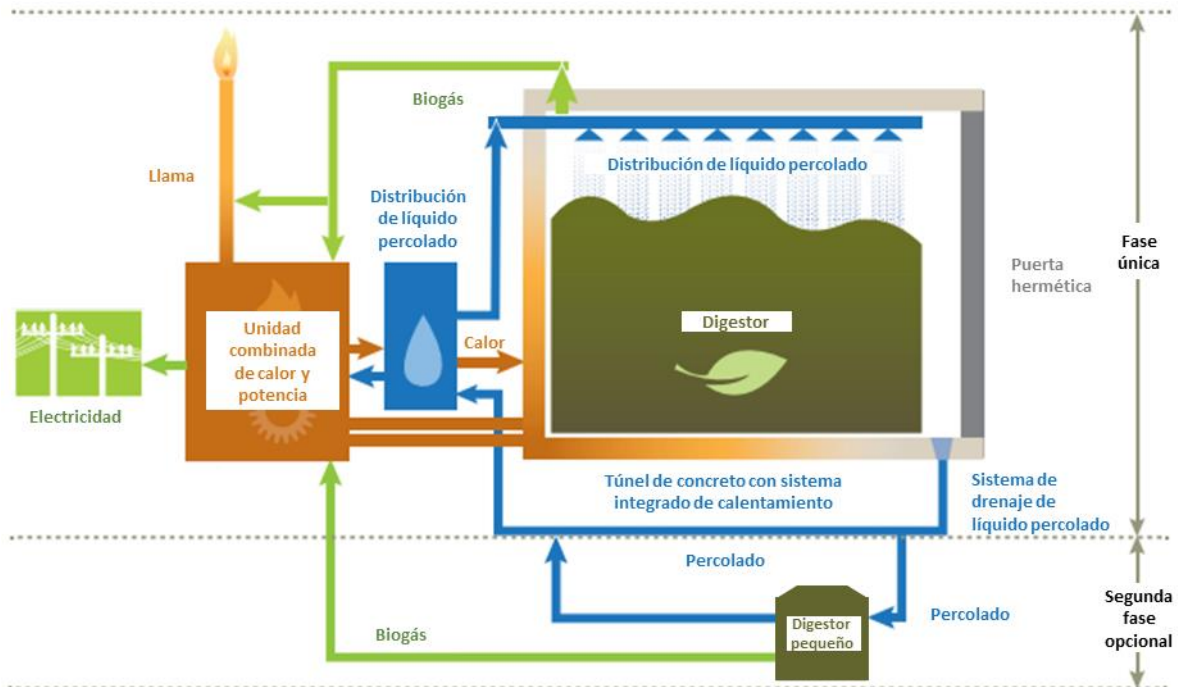


Figura 19: Diagrama de un sistema de digestión anaeróbica de una etapa para sólidos apilables (con una segunda etapa opcional). Basado en [42].

8.1.1.1 Pretratamiento

Si el material a tratar se encuentra en bolsas debe ser desembolsado y existen varias tecnologías para ello, como los tambores rotatorios con cuchillos. El tamaño de partícula máximo recomendado se encuentra entre los 13 y 20 [cm]. No se debe reducir más el tamaño de partícula porque podría generar un líquido (sólidos suspendidos). El pretratamiento considera cribar para eliminar materiales indeseados y mezclar la alimentación para que sea homogénea, además, los residuos de alimentos deben mezclarse con materiales estructurales para proveer de porosidad que facilite la lixiviación de líquidos.

8.1.1.2 Digestión Anaeróbica

La operación es batch. El reactor es un túnel de área transversal rectangular, usualmente de concreto. El material es cargado y posteriormente el reactor se cierra con una puerta hermética. Se drena agua del material (lixiviado), que contiene nutrientes y microorganismos, así que es

recirculado hacia unas boquillas que se encuentran en la parte superior del túnel y rocían el líquido sobre los residuos. El volumen de lixiviado es de $0,1 [m^3]$ por tonelada de residuo, aproximadamente.

Este proceso puede ser implementado en el rango termofílico o mesofílico, en una o dos etapas (fermentación multietapa). En sistemas de dos etapas, la materia prima se digiere primero en un reactor con un pH ácido, y luego entra al siguiente reactor que opera a un pH mayor. En este caso, el lixiviado es recirculado a los dos reactores y se recolecta el biogás generado de ambos, pero el segundo es el que más gas genera. La producción de gas no es continua: crece, llega a un máximo y luego decrece.

El biogás generado suele ser combustionado para generar electricidad con un generador. El agua de la chaqueta enfriadora del generador se calienta y suele ser utilizada para calentar el reactor.

Los residuos municipales orgánicos requieren poca adición de agua para llegar a la humedad deseada (menor al 60%), típicamente se agregan $0,05 [m^3]$ de agua por tonelada de material.

El tiempo de ciclo del proceso es de 14 a 30 días. La capacidad de operación se encuentra entre las 10.000 a 100.000 toneladas de residuos al año.

La desventaja de este sistema es que no maximiza la producción de metano debido a que no se intensifican las transferencias (no hay mezcla). Sin embargo, para un mismo sustrato, la energía neta generada (considerando la energía producida y consumida) es la más alta de los sistemas de digestión, pues requiere un bajo consumo eléctrico debido a la falta de agitación y bombeo, y bajo consumo de calor para llegar a la temperatura deseada pues existe poca agua (el agua también es calentada en este proceso).

Terminado el ciclo, se abre la puerta para retirar el digestato generado, que suele ser 0,85 toneladas por tonelada de residuo procesado. Esto podría generar emanación de olores.

8.1.1.3 *Post tratamiento*

El digestato tiene una humedad del 50 al 60%, y no requiere ser deshidratado. Puede ser compostado.

8.1.2 Sistema de digestión para lodos

Se utiliza para tratar material con contenido de humedad entre el 60 y 80%. La consistencia de la alimentación es de lodos (no líquidos). Este proceso suele ser utilizado para tratar una amplia gama de materiales, como residuos de alimentos de origen comercial y residencial.

Se recomienda ver la Figura 20 y la Figura 21 para seguir la explicación del sistema en las siguientes secciones.

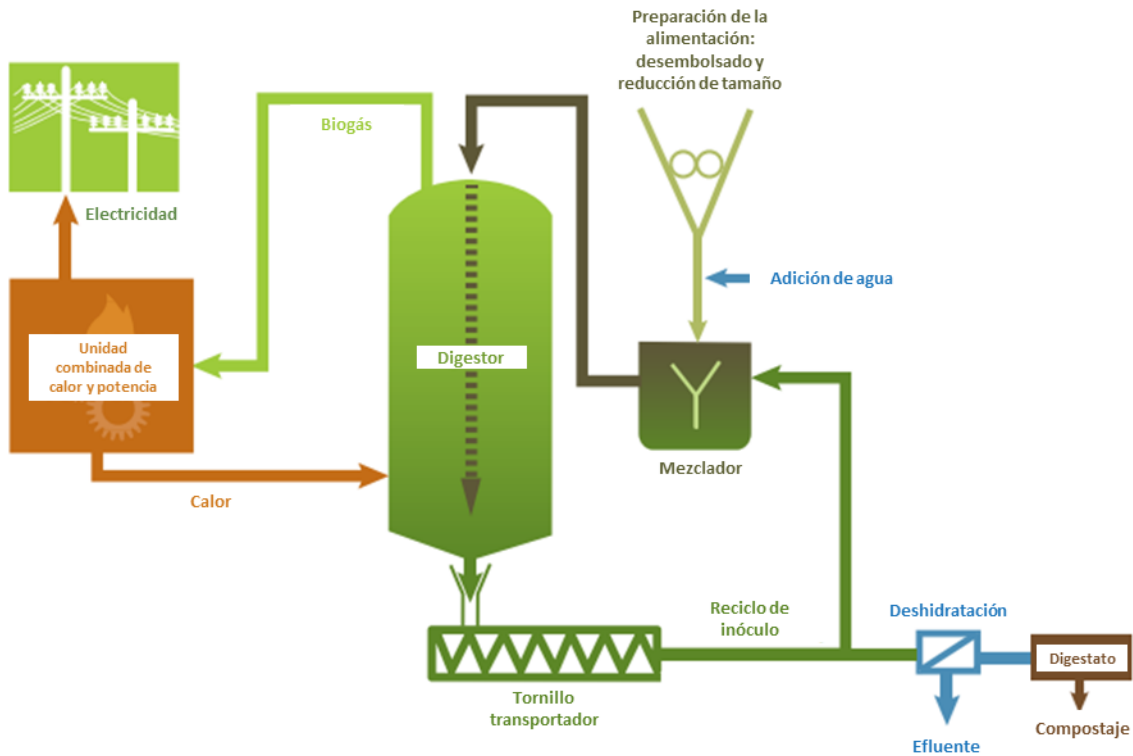


Figura 20: Diagrama de un sistema de digestión anaeróbica de una etapa, tipo silo vertical (PFR), para lodos con alto contenido de sólidos. Basado en [42].

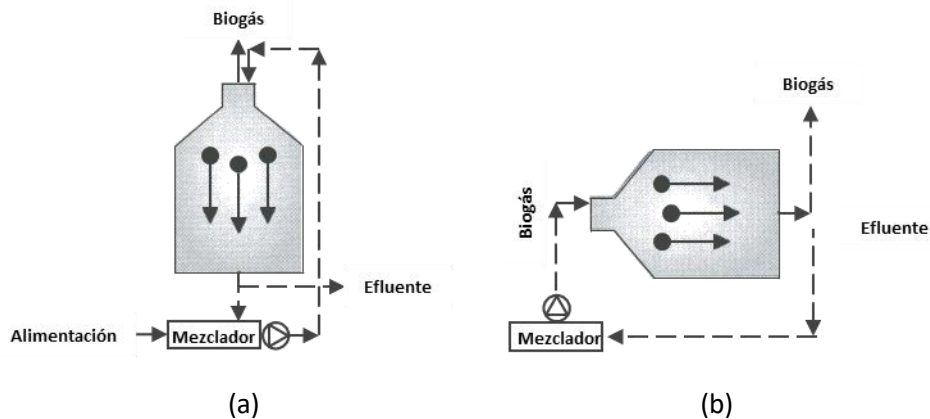


Figura 21: Digestor PFR: (a) vertical y (b) horizontal. Basado [41].

8.1.2.1 Pretratamiento

El pretratamiento requiere desembolsar y retirar elementos indeseados, reducir el tamaño de partícula del material y mezclar para homogeneizar. Algunos diseños incorporan métodos donde el tanque digestor remueve piezas de plástico y metales, que se hunden o flotan. La presencia de materiales no biodegradables, como piedras, metales y plásticos no afecta de forma importante al proceso. Tamaños de partícula de 5 [cm] o menos es considerada necesaria para el funcionamiento de las bombas. El almacenamiento de la materia prima debe ocurrir en una construcción cerrada equipada con control de olores.

8.1.2.2 *Digestión Anaeróbica*

El digestor puede operar de forma batch o continua. La generación de gas en un reactor batch no es contante, sino que crece y decrece, lo que podría ser un problema. Así, la operación continua es la más utilizada.

El reactor continuo puede ser un CSTR o PFR. Debido al alto contenido de sólidos, en un reactor continuamente agitado no se puede agitar el material con un sistema mecánico, así que se inyecta biogás para mezclar. Sin embargo, la mezcla completa no es posible de lograr, además la presencia de gas reduce el contacto entre sustrato y microorganismos, disminuyendo la conversión total. Los reactores flujo pistón son diseñados con un reciclo de digestato, que se mezcla con la materia prima a la entrada del reactor. En los PFR verticales, el material cae debido a la gravedad, mientras que en los horizontales se usan paletas externas que empujan al material para que avance (ver Figura 21).

La mayoría de estos digestores son diseñados para operar en el rango termofílico. Pocos sistemas así son configurados con dos etapas.

El biogás generado se almacena para luego ser quemado y generar electricidad. Parte del calor recuperado se utiliza para calentar al reactor.

Los residuos municipales orgánicos requieren adición de agua para alcanzar la humedad deseada (entre 60 y 80%), usualmente se agrega 0,1 [m³] de agua por tonelada de material.

Los tiempos de retención se encuentran entre 14 y 30 días. La capacidad de operación se encuentra entre las 3.000 y 250.000 toneladas de residuos al año.

Para un mismo sustrato, la energía generada es intermedia, respecto a los otros dos sistemas existentes: se consume mayor energía que en el sistema de digestión de sólidos, pues se requiere electricidad en el bombeo y mayor calor para aumentar la temperatura del reactor.

Se generan 0,85 toneladas de digestato seco por tonelada de residuo orgánico municipal procesado. Luego de terminado el ciclo, este es bombeado fuera del digestor.

8.1.2.3 *Post tratamiento*

El digestato sale del reactor con un contenido de humedad del 70% al 90% y suele ser deshidratado hasta un 50%. Se pueden utilizar para esto filtros o prensas de tornillos. Se puede compostar como si fuese humus, y requiere de un menor tiempo de compostaje, pues ya fue descompuesto en la digestión anaeróbica. También puede usarse como fertilizante, siempre y cuando contenga nutrientes adecuados sin sustancias dañinas para las plantas. El líquido que se obtiene de la deshidratación del digestato, tiene un volumen de 0,1 a 0,3 [m³] por tonelada de residuos, esta puede ser descargada como efluente.

8.1.3 *Sistema de digestión húmedo, con bajo contenido de sólidos*

Se utiliza para tratar material con contenido de humedad mayor al 80% en peso. La consistencia de la alimentación es líquida. Este proceso suele ser utilizado para tratar aguas negras y residuos de alimentos líquidos, como jugo o leche.

Este tipo de sistemas tienen instalaciones muy parecidas a los lodos, en la recepción, preprocesamiento, tanques de digestión y etapas de deshidratación.

Se recomienda ver la Figura 22 y Figura 23 para seguir la explicación del sistema en las siguientes secciones.

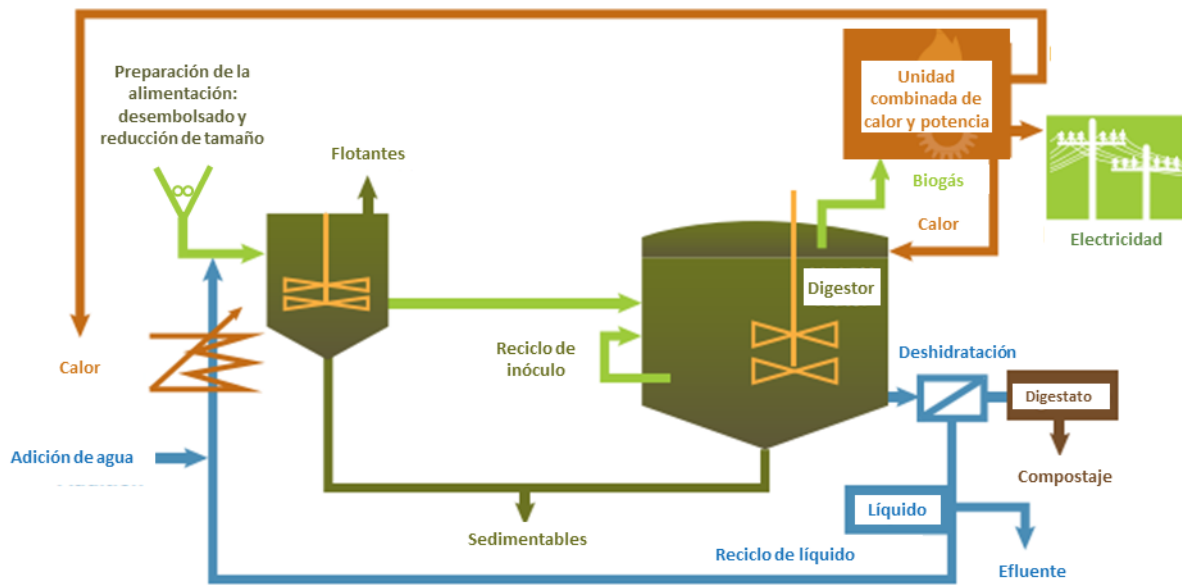


Figura 22: Diagrama de un sistema de digestión anaeróbica de una etapa, tipo CSTR, para líquidos con bajo contenido de sólidos.

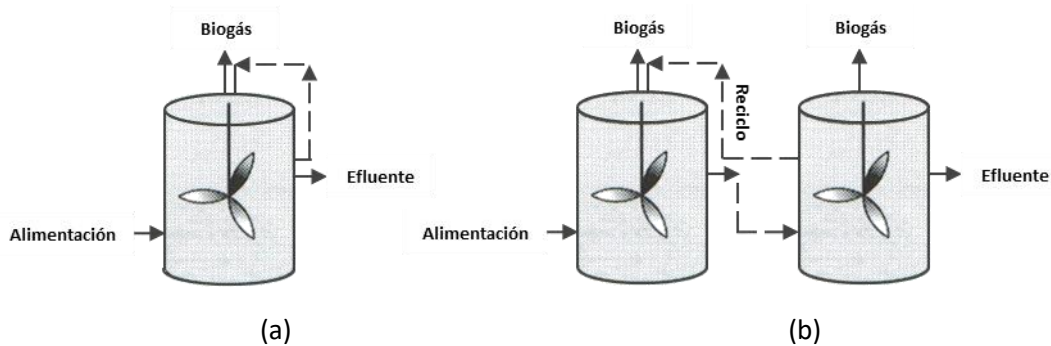


Figura 23: Digestor CSTR: (a) una etapa y (b) dos etapas. Basado en [41].

8.1.3.1 Pretratamiento

Estos sistemas se sostienen en un pretratamiento más intensivo que los otros. El material se desembolsa y se retiran los elementos indeseables, que sedimentan o flotan. La alimentación para un CSTR debe ser pretratada para remover los materiales grandes y fibrosos, que puedan quedar atrapadas en el sistema de agitación mecánica. También se reduce el tamaño de partícula a 5 [cm] o menos para que el material pueda ser bombeado. Existe mezcla para homogeneizar la alimentación.

8.1.3.2 Digestión Anaeróbica

La operación es continua, se utilizan digestores CSTR. Cabe destacar que no es necesario reciclar el digestato al reactor, pues se está mezclando continuamente todo el material al interior del reactor, parte del efluente se recicla en la mezcla inicial de la materia prima, previo al digestor. Los diseños son similares a los digestores de biosólidos de aguas servidas.

Pueden ser operados en rangos mesofílicos o termofílicos, en una, dos o más etapas. El biogás generado suele ser combustionado para generar electricidad con un generador. Se recupera calor para calentar el digestor.

Los residuos orgánicos municipales requieren adición de agua para llegar a la humedad deseada (mayor al 80%), típicamente se agrega 0,5 [m³] de agua por tonelada de residuo. En estos sistemas los sólidos orgánicos son diluidos hasta un 80% o más para permitir la agitación continua y la mezcla completa para mejorar las transferencias.

El tiempo de retención es de 14 a 40 días. La capacidad de operación se encuentra entre las 3.000 a 250.000 toneladas de residuos al año.

La energía neta generada, considerando la energía producida y consumida, es menor a los otros sistemas pues se consume más electricidad para bombear y agitar, y mayor calor para aumentar la temperatura del reactor debido al alto contenido de agua.

Se generan 0,85 toneladas de digestato (seco) por tonelada de residuo orgánico municipal. Luego de terminado el ciclo, este es bombeado fuera del digestor.

8.1.3.3 *Post tratamiento*

El digestato tiene una humedad del 70% al 90%, y suele ser deshidratado hasta un 50% de humedad. Al igual que en el caso de los sistemas de digestión para lodos, se pueden utilizar filtros o prensas de tornillos. El material puede ser compostado o utilizado directamente como fertilizante. El líquido que se obtiene de la deshidratación del digestato tiene un volumen de 0,4 a 0,7 [m³] por tonelada de residuos, esta puede ser descargada como efluente.

8.2 ALMACENAMIENTO DE GAS

Las fluctuaciones de producción de gas son comunes, y una forma de amortiguar dichas variaciones es almacenar el gas. Esto se realiza principalmente para que la entrada de biogás al equipo generador de electricidad sea constante. Las instalaciones de almacenamiento deben ser herméticas y resistentes a presión, radiación UV, variación de la temperatura y condiciones climáticas adversas como granizos. También es conveniente que estén equipadas con sensores para detectar altas o bajas presiones.

Usualmente, el volumen del almacenamiento se escoge en función del espacio disponible y presupuesto. Muchas plantas de biogás funcionan con una capacidad de almacenamiento de 2 a 3 horas.

A continuación, se explican los tipos de almacenamiento de gas.

8.2.1 Almacenamiento interno

El biogás se almacena sobre el digestor. Se instala una membrana sobre el reactor que funciona como techo y como volumen de almacenamiento. Cuando el gas se acumula, la membrana se extiende. Para evitar el contacto entre la membrana y la materia prima, se instala una estructura horizontal en la parte superior del reactor. Ver Figura 24.

Las membranas simples suelen ser de EPDM (terpolímero etileno propileno (diene)), un caucho que tiene una buena resistencia a la radiación UV y elasticidad. También existen las membranas dobles, compuestas de PVC. Entre las dos membranas se encuentra un soplador de aire que infla la membrana externa para proteger a la interna, esta a su vez se extiende o contrae según el volumen de gas.

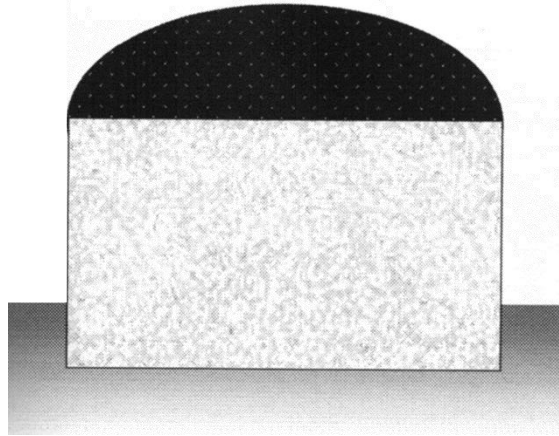


Figura 24: Almacenamiento interno de gas. Tomado de [41].

8.2.2 Almacenamiento externo

El lugar de almacenamiento está separado del digestor. Antes se utilizaban soportes de gas de techo flotante, que se sumergían en agua para sellar. Actualmente se prefieren estructuras flexibles, como membranas acolchadas que pueden encontrarse en dos configuraciones: protegidas en un refugio o doble membrana, como se muestra en la Figura 25 y Figura 26, respectivamente. Pueden ponerse en cualquier lugar, incluso sobre el digestor. Usualmente existe una baja presión en dichos contenedores, de aproximadamente $0,005 [bar]$. En ese caso, un $1 [Nm^3]$ de biogás, que contienen $6 [kWh]$, ocupa $0,95 [m^3]$. Presiones medias ($5 - 20 [bar]$) y altas ($200 - 300 [bar]$) son rara vez utilizadas pues requieren construcciones costosas y consumir energía para comprimir y descomprimir al gas. En dichos casos $1 [Nm^3]$ de biogás debe reducirse hasta menos de $0,41 [m^3]$.

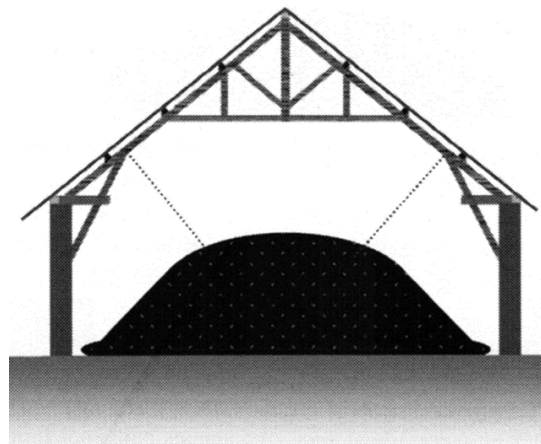


Figura 25: Almacenamiento externo de gas: membrana acolchada con refugio. Tomado de [41].

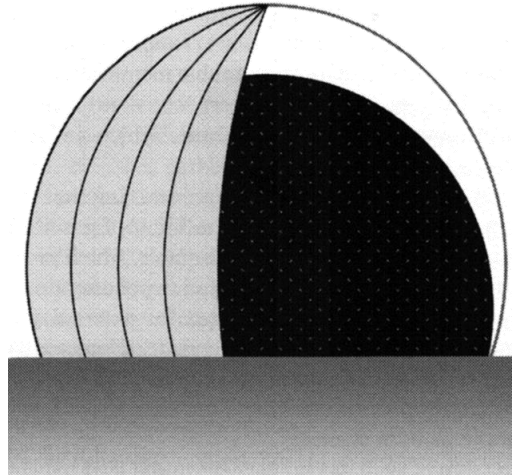


Figura 26: Almacenamiento externo de gas: membrana acolchada con doble membrana. Tomado de [41].

8.3 REFLEXIONES FINALES SOBRE EL ESTADO DEL ARTE

Los tres sistemas descritos se utilizan a gran escala, es decir, tratan residuos orgánicos de forma masiva, mientras que el equipo a diseñar procesará un bajo flujo de residuos. A continuación, se evaluará si dichos sistemas son aplicables a pequeña escala y si poseen características que podrían ser útiles para el diseño del equipo.

Usualmente, los residuos orgánicos tratados de forma industrial se encuentran separados en el origen, es decir, las personas que generan los residuos segregan los residuos orgánicos de los otros. Esta separación no es perfecta y quedan contaminantes, que luego son eliminados en el pretratamiento. En el caso de este proyecto, también se espera que los usuarios del equipo comenten errores separando sus residuos, sin embargo, se supone que este error será menor, pues las personas tendrán un mayor nivel de conexión con el proceso al tener el equipo en sus viviendas. Además, posiblemente, tendrán que retirar de todas formas el contaminante, ya sea del producto o del equipo, para descartarlo al relleno sanitario. En conclusión, el problema que se presenta en los sistemas de escala industrial se minimiza en la pequeña escala. Cabe mencionar que se espera que los materiales indeseados no afecten de forma importante el proceso de tratamiento, debido a su baja incidencia y porque son inofensivos para los microorganismos, aunque elementos como piedras podrían dañar componentes de agitación, si es que existen.

Los tres sistemas estudiados tratan residuos con tamaño de partícula del orden de centímetros, pero el óptimo es del orden de milímetros, pues permite una efectiva hidrólisis, según la literatura. Respecto al óptimo, la velocidad del proceso es menor en los sistemas mencionados y, posiblemente, limite la transferencia de masa y no la reacción de hidrólisis.

En sistemas continuos (CSTR y PFR), los sustratos con consistencia de lodo o líquido se bombean para ser transportados de un lugar a otro, lo que provoca costos. En el equipo, el transporte podría ser innecesario o mínimo, y se podría lograr con la operación del usuario o aprovechando la gravedad, sin incurrir en gastos. Cabe mencionar que los PFR también requieren movimiento del sustrato a lo largo del reactor, lo que podría ser facilitado en un equipo vertical que aproveche la gravedad.

¿Qué sistema sería más apropiado para configurar el equipo y tratar los residuos? Para responder esta pregunta, considere el lector los diferentes tiempos de residencia y el rol de la agitación:

La agitación es beneficiosa, porque permite que la concentración de microorganismos no se estratifique y que las transferencias sean más rápidas. Algunos digestores tienen agitación y otros no, dependiendo de la humedad del sustrato: cuando está seco o húmedo se prefiere no agitar, debido al alto consumo de energía (eléctrica) requerido, que se traduce en un alto costo de operación. Para cualquier tipo de sustrato, en el equipo, es posible realizar agitación sin incurrir en dichos costos: posiblemente la agitación sea manual, actividad factible pues no constituye un esfuerzo alto, ya que la masa tratada es reducida. Sin embargo, esta agitación no podría ser continua, sino que esporádica.

Cuando no es posible agitar, se recicla digestato o lixiviado. En el equipo, se presume podría ser más complicado reciclar que agitar manualmente, porque la primera acción involucra un movimiento de traslación; y la segunda de rotación.

Respecto a los tiempos de residencia, estos dependen del tipo de reactor y de las condiciones, en particular, del paso limitante que gobierne la cinética de cambio. Para las mismas condiciones y paso limitante, los sistemas CSTR suelen requerir un tiempo de residencia mayor que otros reactores para lograr la misma conversión, pues la cinética del proceso es más lenta. Esto último se da porque la constante mezcla de sustratos y productos provoca una baja concentración de reactante al interior del reactor en comparación con un reactor batch o PFR.

Entonces, poniendo atención en las ventajas de los sistemas:

- i) Conviene tener agitación, como en un CSTR, y esta es factible de realizar en el equipo.
- ii) Para el mismo paso limitante, se prefieren reactores batch o PFR, debido a sus menores tiempos de residencia, en comparación con un CSTR.

Siguiendo la lógica TRIZ, se desearía que las dos características mencionadas estuviesen presentes en el equipo. Así, el equipo podría ser un reactor batch con agitación o un PFR que cumpla con sus supuestos teóricos (mezcla completa radial, que podría lograrse con agitación radial, por ejemplo). Cabe destacar que la característica ii) es válida porque los sistemas mencionados deberían tener el mismo paso limitante que un CSTR: la agitación permite mejorar la transferencia de masa, por lo que debería limitar la reacción.

En sistemas industriales, el digestato requiere post tratamiento dependiendo de la humedad del sustrato. Considerando la información del Capítulo 7 Fundamentos, este post tratamiento es innecesario en ausencia de transporte y venta. Si se quisiera realizar un post tratamiento, asumiendo un 80% de humedad del sustrato, se necesitaría secar al digestato. Dado que se obtendrá una baja masa de digestato, el secado será mucho más sencillo que en sistemas industriales. Por ejemplo, podría bastar un secado solar.

Sobre el sistema de almacenamiento de biogás, se debe considerar que este podría estar dentro de una casa o fuera de ella, cercano a personas. Así, es necesario que sea resistente a las condiciones climáticas y al contacto con las personas. Los sistemas con refugio parecen ser más sencillos de implementar y más seguros a condiciones externas, por lo que se preferiría sobre las otras.

Para cerrar, se recata lo siguiente:

En este capítulo se ha estudiado el estado del arte de la digestión anaeróbica, rescatando aquellas ideas que podrían ser de utilidad para el diseño del equipo. Como conclusiones generales se tiene que:

- Se prevé que la separación de residuos orgánicos domiciliarios será mejor lograda en el proyecto, en comparación con procesos industriales a gran escala.
- La agitación es beneficiosa para la digestión anaeróbica, y puede ser lograda sin incurrir en costos operaciones, utilizando la energía humana. Esto es posible gracias a la pequeña escala del equipo.
- Los reactores más apropiados para llevar a cabo el proceso son: batch con agitación o un PFR.

PARTE II

RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA

Capítulo 9

OBJETIVOS, ESTRATEGIAS Y TÁCTICAS

La estrategia de diseño Upcycle cuenta con 7 pasos que deben ser realizados en orden. En el Capítulo 3 Análisis del Contexto se ha respondido al Paso 1: Situarse en el contexto natural y humano donde se implementará la solución, y en este capítulo se procede a cumplir con los pasos 2, 3, 4, 5 y 6. El paso 7: Medir eficiencia, no es posible de realizar, pues requiere implementación de la solución, y esto se escapa de los objetivos de este trabajo.

9.1 PASO 2: DEFINIR VALORES HUMANOS

Se aceptan los valores humanos propuestos por Upcycle: diseñar un estilo de vida y producción que permita hacer sostenible el bienestar humano y del planeta, con seguridad, excelencia, trabajo en equipo e integridad.

9.2 PASO 3: INTEGRAR LOS PRINCIPIOS DE HANNOVER

Se acepta incluir en el diseño 7 de los principios de Hannover, dejando 2 fuera. A continuación, se menciona cómo podrían ser incluidos en el diseño los principios, y las razones de dejar algunos fuera.

9.2.1 Insistir en el derecho de la humanidad y la naturaleza de coexistir

El equipo pretende ser una solución sustentable, que no afecte de forma negativa a la naturaleza y que sea inofensivo para los animales y vegetación cercana. Además, el sistema utilizado (digestión anaeróbica) da cuenta de la relación de simbiosis que puede tener la humanidad con los microorganismos, lo que contrasta con la actividad habitual de rechazar y eliminar a los microorganismos.

9.2.2 Reconocer la interdependencia

Este principio se encuentra fuertemente vinculado con la ayuda que se requiere de los usuarios del equipo para que la solución pueda llevarse a cabo, pues no se utilizará más que su energía para operar el equipo. También se requiere fuertemente de la actividad de la naturaleza.

De poderse independizar la operación de las personas, de todas formas, se diseñaría pensando en que estas personas sean partícipes del proceso, para promover que los usuarios reconozcan su propia interdependencia con la naturaleza.

9.2.3 Respetar las relaciones entre espíritu y materia

El equipo podría ser instalado en cualquier lugar, en este aspecto, el usuario es libre de hacer lo que desee, es decir, el diseño deja que la persona decida. Además, este principio podría incluirse desarrollando un diseño agradable para las personas, ya sea por sus formas, colores, texturas, etc.

9.2.4 Aceptar la responsabilidad del diseño y sus consecuencias

Incluir este principio implica que la diseñadora del equipo es la responsable del diseño, así que la prolijidad y cuidado en el trabajo son aspectos muy importantes, y todos los problemas que sean abordados deben resolverse de forma acabada, según TRIZ y Upcycle.

9.2.5 Crear soluciones seguras con valor en el largo plazo

Incluir este principio requiere pensar en lo que ocurrirá con el equipo en el futuro, y esto se encuentra relacionado con el futuro de los materiales o la adaptación del equipo a otro artefacto. Este principio no se incluye porque, dada la extensión del trabajo, no se decidirán los materiales definitivos del equipo. Un diseño acabado, según la metodología TRIZ, requiere un par de ciclos para actualizar materiales y formas, hasta hacer factible la utilización de materiales sustentables. Así, solo se propondrán materiales, pero posiblemente no sean los adecuados. Por la misma razón, no se estudia la factibilidad de que el desarme o adaptación del equipo.

9.2.6 Eliminar el concepto de basura

Este principio no se incluye por los mismos argumentos presentado en la sección 9.2.5.

9.2.7 Dependier de flujos de energía naturales

Este principio no se incluye en el diseño, pues se ha determinado que, según las características del contexto, es inadecuado utilizar tanto energías renovables como no renovables. Así que solo se utilizará la energía proveniente del esfuerzo de las personas.

9.2.8 Entender las limitaciones del diseño

Este principio se integra en el diseño, pues se acepta que no siempre se podrán cumplir con los beneficios deseados, por lo mismo se establece una Idealidad tolerable. Se entiende, además, que todas las soluciones pueden ser perfectibles.

9.2.9 Buscar la mejora continua mediante el intercambio de conocimientos

Para integrar este principio, se promoverán conversaciones con otros profesionales y personas en general, que puedan nutrir de ideas al diseño.

9.3 PASO 4: DEFINIR OBJETIVOS

El objetivo del diseño es crear un equipo que genere biogás a partir de la actividad microbiana, para consumo de las personas en sus viviendas, que pueda funcionar en cualquier contexto domiciliario presente en la Región Metropolitana.

9.4 PASO 5: DECIDIR ESTRATEGIAS

La estrategia de diseño corresponde a crear tecnología que se adapte a las personas, esto es, que la operación sea agradable y sencilla para ellas; y a utilizar la energía proveniente del esfuerzo humano, porque se asumirá que no existe otro tipo de energía disponible en todos los contextos.

9.5 PASO 6: DECIDIR TÁCTICAS

Las tácticas son utilizar las herramientas TRIZ para generar soluciones, generar discusiones con otras personas y pedir su opinión para nutrir de ideas, y estudiar cómo funciona la naturaleza y otros aparatos como referencias creativas.

Capítulo 10

OPERACIONES UNITARIAS Y LÍMITE DE BATERÍA

El objetivo de este capítulo es definir las operaciones unitarias y límite de batería del equipo asociado a cada proceso. Para esto, primero se parte decidiendo aspectos claves de la digestión anaeróbica y compostaje, como las acciones realizadas por el equipo, el usuario y algunas condiciones fisicoquímicas. Si bien las decisiones son tomadas por la autora, estas son sostenidas sobre los fundamentos de la Digestión Anaeróbica, explicados en el Capítulo 7 Fundamentos. Posteriormente, se concluyen las operaciones unitarias y su orden, explicitado en diagramas de bloques, y el límite de batería.

Se entenderá por límite de batería todas las actividades (acciones) que se lleven a cabo en el equipo, aunque su operación dependa del usuario. Si existe alguna acción que es realizada fuera del equipo o sin su ayuda, se dirá que no pertenece al límite de batería del equipo.

Las conclusiones de este capítulo no son definitivas: durante el dimensionamiento y diseño se tendrán más información y certezas, y también podrían surgir nuevas dudas, que provoquen cambios a las decisiones que se toman en este capítulo.

10.1 DECISIONES GENERALES

En esta sección se deciden aspectos esenciales del proceso de digestión anaeróbica, respecto a la alimentación, pretratamiento, digestión, producto y post tratamiento, y se definen las variables más importantes a considerar en el modelo del proceso.

10.1.1 Materia prima y pretratamiento

El usuario deberá separar sus residuos orgánicos, pues es una actividad que puede y está dispuesto a realizar, según lo que se ha concluido en el capítulo Características del Equipo. Esta actividad no se incluirá dentro del límite de batería, porque habitualmente la separación la realiza el usuario cada vez que genera sus residuos y decide donde depositarlos, así, es innecesario que el equipo realice dicha separación.

Es posible que para que la materia prima tenga una composición aceptable, se requiera mezclar los residuos de forma particular. Esta necesidad se determinará en el dimensionamiento. De ser requerido, se pedirá a los usuarios mezclarlos, y se incluirá un instructivo sobre las características de los residuos y cuáles alimentar al equipo.

La composición de los residuos se debe cuidar para asegurar proporciones adecuadas de nutrientes y reducir concentraciones de sustancias tóxicas o inhibitoras, y sustancias contaminantes. En la Tabla 50 se muestran las condiciones que se consideran aceptables en la alimentación.

El resto de los nutrientes que no se mencionan en la tabla se encuentran en una concentración suficiente en la materia prima cuando esta corresponde a una mezcla de sustratos, así que no es necesario controlar su composición cumpliendo con dicha condición. Dichos nutrientes podrían ser cuidados en la alimentación con mezclas específicas de sustratos, pero esto complejiza considerablemente el dimensionamiento y operación del equipo, así que se opta por cumplir con la regla de forma general: realizar una mezcla de varios tipos de sustratos. Para ello, entonces, se decide acumular los residuos de varios días y mezclarlos, previo a la digestión anaeróbica.

Las sustancias inhibitoras o tóxicas y contaminantes químicos ingresan con la materia prima; una opción es remover las moléculas indeseada, pero esto es complejo, así que se prefiere limitar el ingreso de la materia prima.

Tabla 50: Contenido requerido de nutrientes y otras sustancias en la alimentación.

Sustancia	Valor deseado	
C: N	≥ 30 (idealmente 30)	
C: S	≥ 600	
	Inhibición y toxicidad $\left[\frac{mg}{l}\right]^a$	Contaminantes químicos $\left[\frac{mg}{kg \text{ materia seca}}\right]^b$
Cu	< 40	< 70
Cd	< 20	< 0,7
Zn	< 150	< 200
Ni	< 10	< 25
Pb	< 340	< 45
Cr	< 100	—
Hg	—	< 0,4

^a Valores reportados en [41].

^b Guía Suiza para la utilización de compost y digestato.

Se prohibirá el ingreso de materia prima con pH extremos para evitar que el sistema se ralentice por ajuste de pH.

Los antibióticos y desinfectantes no serán de preocupación en el diseño, pues posiblemente su efecto sea despreciable en el proceso.

Es necesario reducir el tamaño de partícula de la materia prima hasta el rango $[1; 2][mm]$. Se opta por realizar un pretratamiento mecánico, por su afinidad al contexto domiciliario.

La conminución podría ser realizada por el usuario, por ejemplo, cortando con un cuchillo. Sin embargo, el tamaño de partícula requerido es reducido, así que se proveerá de un sistema incorporado al equipo. Se utilizará el esfuerzo humano por ser la energía mecánica más accesible (ver sección 4.3.2 Costos tolerables). Esta actividad deberá ser sencilla y poco desgastante.

La mejora que podría proveer el tratamiento biológico, posiblemente, no sea tan importante porque los residuos de alimentos son fáciles de digerir. Además, es un pretratamiento complejo, de características similares a la operación unitaria central (digestión). Por lo tanto, no se realizará.

A pequeña escala el agua no debería afectar de forma importante la operación, como se mencionó en el Capítulo 8 Estado del Arte. Solo se debe asegurar que tiene una humedad mayor a la mínima requerida (55%), lo que suele ser cierto para la materia prima que será utilizada en el equipo.

Considerando que el agua se evapora durante el proceso, se podría requerir agregar agua al sustrato que se está digiriendo y mezclar. Se desea evitar que el usuario intervenga la digestión anaeróbica una vez iniciada porque esto complejiza la operación, así que, de ser necesario, se prefiere que el usuario agregue agua al sustrato en la etapa de pretratamiento. Agregar agua puede ser reemplazado por una selección de materia prima muy húmeda, idea que será evaluada en el siguiente capítulo.

Los reciclos de digestato o su fracción líquida son beneficiosos para el proceso, pues aporta inóculo de microorganismos, así que es conveniente que un reciclo de digestato se mezcle con la materia prima. En el dimensionamiento se evaluará su necesidad. De ser útil, la mezcla puede realizarse solo en el pretratamiento y no en simultáneo con la digestión anaeróbica, puesto que se prefiere que el usuario intervenga antes de la operación principal, junto con el resto de las actividades que debe realizar.

Para realizar la mezcla, se utilizará agitación.

10.1.2 Etapa principal: Digestión Anaeróbica

El sistema debe ser hermético para evitar entrada de oxígeno y salida de metano.

Se aprovechará la autorregulación de pH del sistema. No se ajustará esta variable, por las mismas razones que no se realiza pretratamiento biológico. Así, se asumirá pH 7, y para que este supuesto se cumpla se restringirá el ingreso de sustratos con pH extremos.

Se desea que la temperatura se encuentre en el rango mesofílico, por las ventajas que entrega, por sobre los otros rangos.

El control de temperatura del equipo, posiblemente, requiera de reciclos de calor y aislamiento térmico. Se deberá evaluar si estas opciones son necesarias en el dimensionamiento.

Se incluirá agitación, por todas las ventajas que provee, como homogeneización, mejora de la transferencia de masa y cinética de las reacciones. La agitación será realizada manualmente por el usuario, pues es la fuente de energía mecánica más accesible (ver sección 4.3.2 Costos tolerables), por lo tanto, la agitación será esporádica y sencilla.

Se requiere definir el tiempo de residencia para diseñar el equipo, siendo este uno de los parámetros más importantes.

Se utilizará un reactor batch con agitación o PFR, porque presentan un menor tiempo de residencia que los CSTR.

Se desea que no exista transporte ni trasvasije de material, para evitar fugas.

10.1.3 Producto y post tratamiento

Para remover el H_2S del biogás, las opciones factibles son adsorberlo con carbón activado y realizar un tratamiento biológico. Se escoge la prima alternativa por su simplicidad y porque, además, permite remover CO_2 , H_2O , O_2 , N_2 e hidrocarburos halogenados. El NH_3 se elimina cuando el biogás se seca. El carbón activado podría ser difícil de obtener, así que se utilizarán materiales porosos comunes, como el carbón de leña. Independiente del tipo de sólido adsorbente utilizado, este no podrá regenerarse porque no es posible físicamente o porque es un proceso difícil de realizar en el contexto domiciliario (intensivo en energía).

Dado que no se consumirá el biogás a la misma tasa con que será generado, se requiere un almacenamiento del gas, y se utilizará una configuración de membrana con refugio por su resistencia. Lo mismo ocurre con el digestato, así que también se incluirá un almacenamiento.

Se asume una correcta combinación de sustratos para reducir la concentración de contaminantes químicos y un tiempo mínimo para destruir los patógenos, por lo que no es necesario realizar un pretratamiento del digestato y este puede ser aplicado directamente a la tierra para nutrir a las plantas.

Para corroborar el supuesto anterior, podría existir un control de salida para asegurar la calidad del digestato, realizado por los usuarios. Por ejemplo, se podría evaluar el olor, la temperatura o el aspecto, y el equipo podría incluir un termómetro u otros elementos para facilitar la actividad. Con esto, el usuario podría decidir qué hacer con el digestato. Sin embargo, no existen normas de calidad del digestato, tampoco diagnósticos informales para determinar su idoneidad para aplicación en suelo, así que la inspección de calidad no es posible de realizar.

Si por alguna razón el usuario decidiera descartar el digestato al relleno sanitario, el proceso de tratamiento domiciliario habrá servido para reducir el flujo e impacto ambiental, en comparación con la línea base de este proyecto: los residuos orgánicos dispuestos directamente al relleno sanitario.

Si bien la aplicación de digestato en la tierra podría ser parte del límite de batería del equipo, por prioridad a otras operaciones se decide no incluirlo en esta etapa del diseño.

La correcta aplicación del digestato deberá incluir una ficha de uso. En invierno deberá descartarse al relleno sanitario o alcantarillado, considerando los ciclos de crecimiento de las plantas, descritos en el Capítulo 7 Fundamentos.

En el caso de que el digestato contenga materiales indeseados, como contaminantes plásticos, estos deberán ser removidos y descartados al relleno sanitario. Así, es necesaria una etapa de inspección y otra de separación, para detectar los materiales indeseados y removerlos del digestato, respectivamente. El descarte de elementos quedará fuera del límite de batería del equipo, porque esta actividad no está enlazada directamente con los cambios que se desean provocar con el equipo. Además, lo puede realizar el usuario sin problema, porque es algo que suele realizar.

10.2 OPERACIONES UNITARIAS

A partir de las decisiones anteriores, se concluyen las operaciones requeridas para llevar a cabo el proceso de digestión anaeróbica (ver Figura 27):

1. Separación:

El usuario debe separar los materiales orgánicos del resto de los residuos. Esta operación no es parte del límite de batería.

2. Dosificación:

El usuario combina los residuos orgánicos de forma apropiada, según instrucciones. Aquellos materiales que no se utilicen pueden ser reciclados a una siguiente alimentación del equipo.

3. Descarte:

Aquellos residuos indeseados se descartan al relleno sanitario. Esta operación no es parte del límite de batería.

4. Conminución:

Se reduce el tamaño de partícula del material orgánico que continúa en el proceso. Esto se realiza con ayuda del usuario.

5. Almacenamiento:

Se almacenan los residuos de algunos días (3 por ejemplo).

6. Mezcla:

Se mezclan los residuos entre sí para homogeneizar la alimentación. Las etapas de almacenamiento y mezcla se realizan una a continuación de la otra, luego de la conminución, porque esto permite que la mezcla pueda ser realizada con los residuos molidos lo que favorece la homogeneización.

7. Mezcla:

Se mezcla la alimentación con agua. Esto se realiza con ayuda del usuario.

8. Mezcla:

Se mezcla la alimentación con reciclo de digestato.

Tanto la mezcla con agua y con digestato ocurren luego de conminución y no antes, porque moler la alimentación con la adición de elementos adicionales complejiza la operación

Las tres mezclas mencionadas podrían ocurrir en simultáneo o en otro orden.

9. Digestión anaeróbica:

El material orgánico molido se digiere anaeróbicamente. Esta etapa incluye de forma simultánea la mezcla del material que se encuentra en el reactor para promover la homogeneización. El usuario ayuda a agitar el sistema.

10. Adsorción:

El biogás generado es tratado por medio de adsorción con carbón activado u otro sólido con características similares. Cabe mencionar que esta etapa se realiza previo al almacenamiento

porque los contaminantes podrían ser dañinos para el sistema de almacenamiento y ocupar espacio.

11. Descarte:

El sólido adsorbente no podrá ser regenerado, así que el usuario debe descartarlo al relleno sanitario. Esta operación no es parte del límite de batería.

12. Almacenamiento:

El biogás tratado se almacena.

13. Combustión:

El biogás es combustionado para generar calor. Los gases de combustión se liberan al ambiente.

14. Inspección:

El digestato es controlado al final del proceso. El usuario realiza una inspección para corroborar que no existan materiales indeseados.

15. Descarte:

Si la calidad del digestato no es la deseada o se el periodo es invierno, se descarta al relleno sanitario o al alcantarillado. Esta operación no es parte del límite de batería.

16. Separación:

Si el digestato cuenta con materiales indeseados, se separan. Podría ser necesario un tamiz.

17. Descarte:

El usuario descarta al relleno sanitario los materiales indeseados separados del digestato. Esta operación no es parte del límite de batería.

18. Almacenamiento:

Si el usuario no desea aplicar inmediatamente el digestato a la tierra, puede almacenarlo. Esta operación es optativa, y ocurre luego de inspección, porque esta última permite determinar el fin del proceso. Además, no se desea almacenar un producto que no podrá ser utilizado.

19. Aplicación en suelo:

Si la calidad del digestato es la correcta y no tiene materiales indeseados, se puede aplicar en la tierra, siguiendo instrucciones.

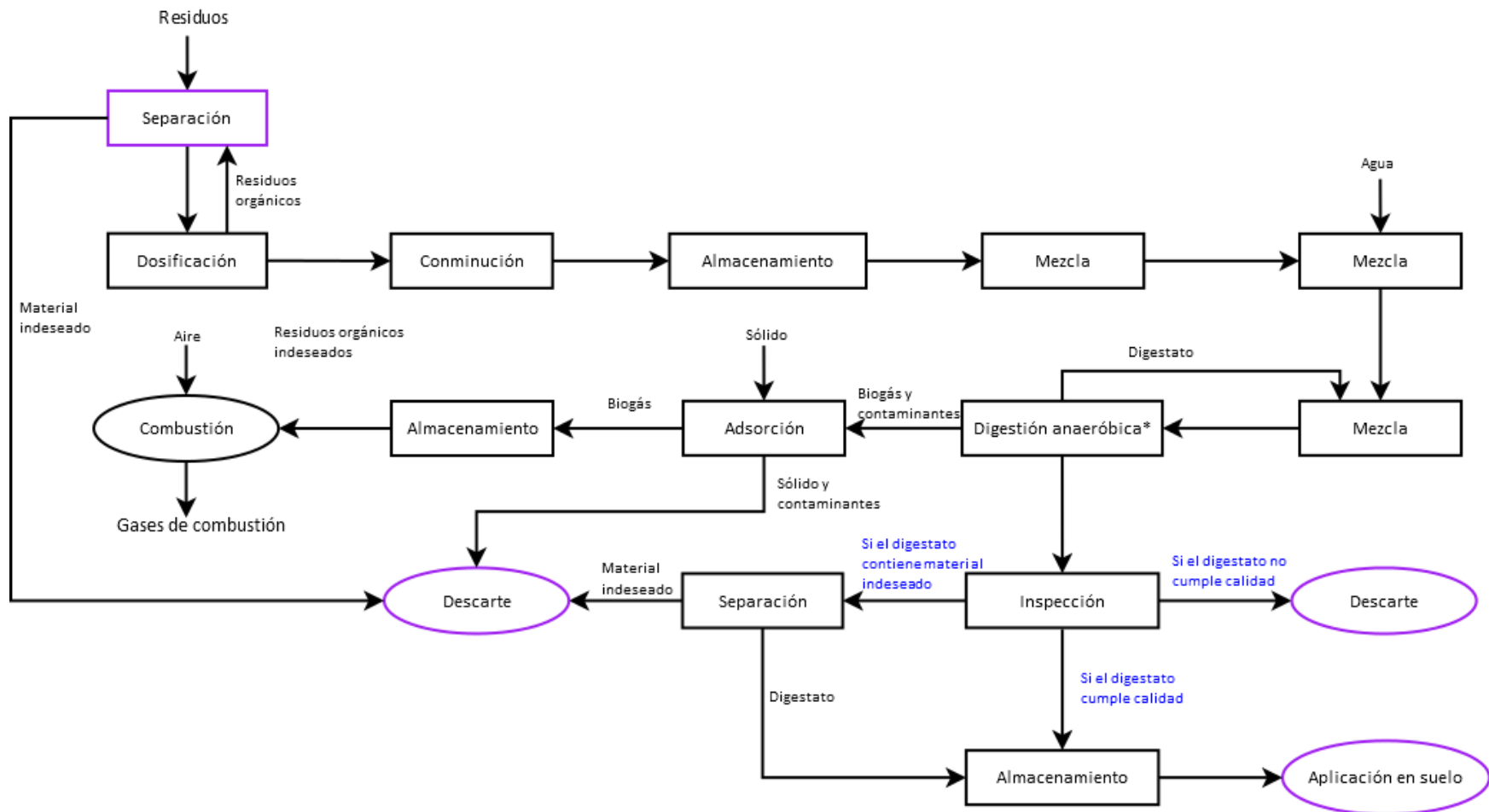


Figura 27: Operaciones unitarias del proceso de digestión anaeróbica. Las operaciones finales se muestran en óvalos; en azul se muestran las diferentes opciones para el digestato; y en morado se remarcan las operaciones unitarias que quedan fuera del límite de batería del equipo y que deberán ser realizadas por el usuario.

10.3 REFLEXIONES FINALES SOBRE LAS OPERACIONES UNITARIAS Y LÍMITE DE BATERÍA

En este capítulo se definieron las operaciones unitarias y límite de batería del equipo para el proceso de digestión anaeróbica. Se presentó un diagrama de bloques, que resume lo anterior.

El dimensionamiento del equipo, realizado en el próximo capítulo, deberá considerar las decisiones y supuestos aquí tomados.

Capítulo 11

DIMENSIONAMIENTO

En el presente capítulo se realiza el dimensionamiento del equipo de digestión anaeróbica, esto es, se definen los volúmenes, tiempos, longitudes, etc. requeridos para llevar a cabo las diferentes operaciones unitarias involucradas en el límite de batería del equipo (ver Capítulo 10 Operaciones Unitarias y Límite de Batería).

11.1 DIMENSIONAMIENTO DE EQUIPOS

En las siguientes secciones se explica el dimensionamiento asociado a las operaciones unitarias y se concluyen las dimensiones correspondientes. Se destaca que algunas operaciones no son dimensionables, y en dicho caso se definirán otras características importantes.

11.1.1 Dosificación de residuos

Los residuos orgánicos que ingresan al proceso deben tener ciertas características para poder ser procesados. La mezcla no es posible de dimensionar, y en esta sección se determina la correcta dosificación de los residuos.

Según lo analizado en el Capítulo 10 Operaciones Unitarias y Límite de Batería, el objetivo de mezclar los residuos orgánicos de la alimentación es asegurar condiciones mínimas de contenido de nutrientes y humedad, y reducir la concentración de sustancias perjudiciales para el proceso.

Para determinar la dosificación, primero se caracterizan diferentes tipos de residuos orgánicos y luego se determina la correcta combinación de estos para lograr con los objetivos mencionados.

11.1.1.1 Caracterización de residuos

Se seleccionaron residuos diversos, que representaran la gran variedad que existen. En la Tabla 51 se muestran las categorías consideradas y los residuos representantes de estas.

Tabla 51. Clasificación de residuos de alimentos y representante para estimar composición.

Categoría de residuo	Residuo
Frutas	Manzana
Verduras	Lechuga, brócoli
Lácteos	Leche y queso
Comidas preparadas	Guiso, porotos, arroz
Carnes	Carne
Aceites	Aceite de semilla
Hojas	Hojas secas, hojas verdes

Se estudia la composición de los nutrientes: carbono, nitrógeno y azufre, y se calcula la proporción C: N y C: S. También, el contenido de sustancias inhibitoras o tóxicas y contaminantes químicos: Cu, Cd, Zn, Ni, Pb y Cr. Y, además, la humedad. La información es extraída de la base de datos de composición de alimentos del Departamento de Agricultura y Servicio de Investigación Agrícola de Estados Unidos [44]. La caracterización mencionada se encuentra en el Anexo F.1.

11.1.1.2 Dosificación

Una alimentación adecuada debe cumplir contenidos mínimos de nutrientes y máximos de sustancias tóxicas o inhibitoras y contaminantes, como se muestra en la Tabla 52.

Tabla 52: Contenido requerido de sustancias en la alimentación.

Sustancia	Valor deseado	
Humedad	≥ 55% (idealmente 55%)	
C: N	≥ 30 (idealmente 30)	
C: S	≥ 600	
	Inhibición y toxicidad $\left[\frac{mg}{l}\right]^a$	Contaminantes químicos $\left[\frac{mg}{kg\ materia\ seca}\right]^b$
Cu	< 40	< 70
Cd	< 20	< 0,7
Zn	< 150	< 200
Ni	< 10	< 25
Pb	< 340	< 45
Cr	< 100	—
Hg	—	< 0,4

^a Estos niveles han sido reportados en literatura, y permiten que la digestión anaeróbica no presente efectos negativos de inhibición y toxicidad.

^b Límites permitidos según normativa Suiza, para que el digestato sea seguro para el medio ambiente.

Se debe notar que en el Capítulo 10 Operaciones Unitarias y Límite de Batería se mencionó que, de ser necesario, debería agregarse agua al proceso o residuos muy húmedos porque el sustrato se podría secar durante la digestión. Sin embargo, del dimensionamiento de la digestión anaeróbica se obtiene que no es necesario adicionar agua extra. Por lo tanto, no se incluye dicho requerimiento en la dosificación de residuos (tampoco se ha incluido esta condición en la Tabla 52).

A partir de la caracterización, se concluye que todos los residuos cumplen con el valor deseado de la proporción C: S, y no presentan riesgo de toxicidad ni inhibición. Todos los residuos, menos las hojas secas, cumplen con el mínimo de contaminación química, así que tampoco se debe cuidar la alimentación. Por lo tanto, no se requiere ningún tipo de dosificación especial en la alimentación respecto a estos temas.

Las hojas secas son el único residuo que no cumple con la norma de contaminantes químicos: el Zn supera la cota máxima. Sin embargo, al final de esta sección se concluye que estos residuos siempre deben dosificarse con otros por razones de humedad y proporción C: N, y las mezclan que forman cumplen con la norma que limita la concentración de Zn. Por lo tanto, la dosificación de hojas secas no es de cuidado teniendo presente lo anterior. Así, se da por resuelto este problema y ya no se vuelve a mencionar en esta sección.

La proporción C:N y humedad son inadecuadas para algunos residuos, y estos últimos se han categorizado a partir del cumplimiento de los valores deseados respectivamente, como muestra la Tabla 53. Así, se debe tener especial precaución con los residuos de nivel de cuidado alto. Aquellos residuos que no se mencionan cumplen con las condiciones establecidas.

Tabla 53. Clasificación de residuos de alimentos según su nivel de cuidado en la dosificación.

Nivel de cuidado	Residuo	Causa del nivel
Alto	Manzana	Proporción C: N muy alto
	Aceite	Proporción C: N muy alto y humedad muy baja
	Hoja seca	Humedad muy baja
Medio	Arroz	Proporción C: N alto
	Queso	Humedad baja
	Pan	Humedad baja
Bajo	Hoja fresca	Proporción C: N bajo y humedad alta
	Pasto	Proporción C: N bajo y humedad alta

Para poder procesar los alimentos que se encuentran en la Tabla 53, se deben mezclar entre sí o con otros para que en total cumplan con las condiciones. Así, por ejemplo, no se puede alimentar aceite, pero sí aceite y pasto, pues contrarrestan su déficit, siempre y cuando se encuentren en una proporción másica correcta.

Se realizan variadas combinaciones de residuos y se concluyen proporciones recomendadas. En la Tabla 54 y Tabla 55 se muestran los resultados. En el Anexo F.2 se detallan los cálculos realizados para concluir dichas combinaciones.

Cabe mencionar que los residuos analizados son representantes de una categoría de residuos. Desde ahora se vuelve a utilizar dichas categorías y no del residuo particular; por ejemplo, se habla de frutas y no de manzana. Además, se observó que existen residuos cuyas características estudiadas no son similares, así que se opta por separarlos en nuevas categorías; análogamente se unen categorías de residuos que presentan características parecidas, por ejemplo, las hojas verdes y la lechuga se unen en la categoría 'verduras y hojas verdes'.

En Tabla 54 y Tabla 55, cada fila tiene un color: verde significa que es posible dosificar sin seguir reglas; amarillo, se sugiere tal proporción; y rojo, seguir esta proporción para evitar problemas en la operación.

Tabla 54. Combinaciones de residuos para el ingreso al equipo (parte 1).

Residuo que se desea alimentar	Combinaciones requeridas con otros residuos										
	Frutas	Verduras y hojas verdes	Hojas secas	Aceites y grasas	Lácteos líquidos	Quesos	Carnes	Masas (Ej. pan)	Pastas y cereales cocidos (Ej. arroz)	Legumbres cocidas	Guisos
Frutas	25%		25%						50%		
	25%		25%							50%	
	25%					25%		50%			
	25%					25%				50%	
	50%					50%					
	75%		25%								
	75%					25%					
Verduras y hojas verdes											
Hojas secas	25%		25%						50%		
	25%		25%							50%	
	75%		25%								
			25%						75%		
Aceites y grasas				12,5%						87,5%	
		87,5%		12,5%							
Lácteos (líquidos)											

Tabla 55. Combinaciones de residuos para el ingreso al equipo (parte 2).

Residuo que se desea alimentar	Combinaciones requeridas con otros residuos										
	Frutas	Verduras y hojas verdes	Hojas secas	Aceites y grasas	Lácteos líquidos	Quesos	Carnes	Masas (Ej. pan)	Pastas y cereales cocidos (Ej. arroz)	Legumbres cocidas	Guisos
Quesos						25%			75%		
						25%					75%
						50%					50%
	50%					50%					
Carnes											
Masas								25%		75%	
					75%			25%			
								25%			75%
					50%			50%			
								50%			50%
Pastas y cereales cocidos							50%		50%		
							25%		75%		
						25%			75%		
			25%						75%		
Legumbres cocidas											
Guisos											

Las proporciones presentadas en Tabla 54 y Tabla 55 debe ser comprensibles para las personas que operen el equipo. Por esto, se opta por reconfigurar las tablas anteriores a una más sencilla (ver Tabla 56):

El usuario debe alimentar una masa de residuos respetando las proporciones de la Tabla 56. Debe buscar el alimento en la primera columna, si este alimento se encuentra marcado con color verde, puede alimentar cuanto quiera; si el color es amarillo se recomienda agregar otros residuos según la dosificación de las siguientes columnas; y si el color es rojo, la dosificación debe ser realizada.

Las columnas informan las dosificaciones posibles siguiendo la siguiente instrucción: En cada fila, suma el puntaje total de la última columna, utilizando todos los colores de la fila (serán 2 o 3 dependiendo el caso). Si la fila tiene 3 colores, usa los 3; si tiene 2, usa 2.

La construcción de la Tabla 56 se explica en el Anexo F.3.

Tabla 56. Reglas de combinación de residuos para el ingreso al equipo (versión para el usuario).

		Porciones de:										Suma de porciones a alimentar	
		Frutas	Hojas secas	Aceites y grasas	Quesos	Masas y cereales secos	Masas y cereales húmedos	Verduras y hojas verdes	Lácteos líquidos	Carnes	Legumbres cocidas		Guisos
Porciones de:	Frutas	1	1		1		2				2		4
	Hojas secas	1	1				2				2		4
	Aceites y grasas			1				7			7		8
	Quesos	1			1		3					1 a 3	4
	Masas secas y cereales secos. (Ej. pan, arroz crudo)					1			1 a 3		3	1 a 3	4
	Masas húmedas y cereales húmedos. (Ej. arroz cocido)		1		1		3			1			4
	Verduras y hojas verdes												
	Lácteos líquidos												
	Carnes												
	Legumbres cocidas												
	Guisos												

11.1.2 Conminución

La conminución queda dimensionada con su potencia, es decir, la energía por unidad de tiempo que se requiere para reducir el tamaño de partícula de la alimentación. Además, se desea conocer el tiempo que una persona deberá operar el equipo.

11.1.2.1 Cálculo de potencia de conminución

La potencia necesaria para reducir el tamaño de partículas de un flujo de sólidos o una masa de sólidos, en operación continua o batch, respectivamente, depende de los diámetros de entrada y salida de la etapa de conminución y de la dureza del material.

Se requiere que el diámetro de partícula de las partículas a la salida de la conminución se encuentre en el rango $[1; 2][mm]$, pues este tamaño favorece la digestión anaeróbica. Se propone un diámetro de entrada a la conminución de $5 [cm]$, si los residuos orgánicos tuviesen un tamaño mayor, se deberán cortar previamente para cumplir con el supuesto.

Respecto a la dureza, esta es difícil de caracterizar, pues en los equipos de conminución no solo se expresa la naturaleza interna del material (cohesión molecular), sino que también la flexibilidad, interacción entre partículas y forma. Así, el concepto de dureza se traduce a un índice experimental general: el índice de trabajo de Bond [45][46].

La energía específica necesaria para reducir el tamaño de partícula queda expresada por la Ley de Bond [45][46]:

$$E^0 = 100 \cdot E_i \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{d_2}} - \frac{1}{\sqrt{d_1}} \right) \quad (15)$$

Donde:

E^0 = energía específica necesaria para reducir el tamaño de partícula desde d_1 hasta d_2 , $\left[\frac{kWh}{t} \right]$.

E_i = índice de trabajo de Bond, $\left[\frac{kWh}{t} \right]$.

d_2 = diámetro final de las partículas sólidas, $[m]$.

d_1 = diámetro inicial de las partículas sólidas, $[m]$.

Si bien se cuenta para valores para el índice de trabajo de Bond, estos son informados para minerales, que no son representativos de los residuos orgánicos.

Así, se opta por estimar el índice experimentalmente, como se explica a continuación.

Experimento para determinar el índice de Bond

Se escogió una zanahoria para realizar el experimento, porque, dentro de los residuos de alimentos, esta presenta una de las durezas más altas. Así, se calcula un índice exagerado para asegurar que la conminución pueda realizarse con cualquier tipo de residuo orgánico.

Una muestra de 60 [g] de trozos de zanahoria de 5 [cm], fue ingresada en una licuadora de 450 [W] para reducir el tamaño de partícula. Luego de 6 [s] de operación de la licuadora, se obtuvo trozos de 4 [mm] de diámetro en promedio.

La energía utilizada para realizar la conminución anterior se estima como:

$$E^0 = \frac{\text{Potencia licuadora [W]} \cdot \text{Tiempo de operación [s]}}{\text{Tamaño de la muestra [g]}} \quad (16)$$

$$E_0 = 12,5 \left[\frac{kWh}{t} \right] \quad (17)$$

Luego, se estima el índice de Bond con la ley de Bond utilizando los diámetros de partícula del experimento y la energía utilizada, con esto se obtiene:

$$E_i = 0,011 \left[\frac{kwh}{t} \right] \quad (18)$$

Una vez calculado el índice de Bond es posible utilizar la Ley de Bond para estimar la energía consumida por el equipo de conminución:

$$d_1 = 5 \cdot 10^{-2} [m] \quad (19)$$

$$d_2 = 2 \cdot 10^{-3} [m] \quad (20)$$

$$E_{conm}^0 = 20 \left[\frac{kWh}{t} \right] = 70.991 \left[\frac{J}{kg} \right] \quad (21)$$

Luego, multiplicando por el caso base ($0,6 \left[\frac{kg}{día} \right]$), se tiene que la potencia requerida por el equipo es:

$$P_{conm} = 70.991 \left[\frac{J}{kg} \right] \cdot 0,6 \left[\frac{kg}{día} \right] = 42.595 \left[\frac{kg}{día} \right] \quad (22)$$

Cabe mencionar que en los cálculos se ha asumido que las máquinas involucradas tienen la misma eficiencia: al calcular el índice de trabajo de Bond se incluyó tácitamente la eficiencia de la máquina. En el cálculo del trabajo de una persona en una manivela, se asumió que la máquina que se usará para moler los residuos será igual de eficiente que una licuadora.

Es posible que un moledor manual sea más eficiente que una licuadora, pues estas últimas generan ruido y se calientan importantemente (es decir, pierden energía). Así, es probable que el tiempo de trabajo manual en la manivela sea menor en la realidad. Por lo tanto, los cálculos se encuentran sobre estimados.

11.1.2.2 Cálculo de tiempo de operación

Una referencia de velerismo dice que, en ejercicios con manivelas, los veleristas llegan a una potencia de $11,5 \left[\frac{W}{kg \text{ masa corporal}} \right]$ (referencia del velerista medido con menor rendimiento) [47].

Asumiendo que una persona normal llega a un 20% de este rendimiento y tiene una masa corporal de 60 [kg], se tiene que su potencia es:

$$P_{persona} = \left(11,5 \left[\frac{W}{kg \text{ masa corporal}} \right] \cdot 60 [kg \text{ masa corpora}] \right) \cdot 20\% = 138 [W] \quad (23)$$

Finalmente, el tiempo de operación diaria es:

$$t_{op.conm} = \frac{p_{equipo}}{ppersona} = \frac{42.595 \left[\frac{kg}{día} \right]}{138 [W]} = 309 \left[\frac{s}{día} \right] = 5,14 \left[\frac{min}{día} \right] \quad (24)$$

El tiempo de operación se encuentra sobreestimado, tal como el cálculo de potencia y por las mismas razones.

Los cálculos detallados del dimensionamiento de la conminución se encuentran en el Anexo G.

11.1.3 Almacenamiento y mezcla de residuos

El propósito de esta etapa es reducir la variación de composiciones de la alimentación que ingresa al equipo de día en día. La siguiente etapa, el mezclado, tiene el objetivo de homogeneizar el material acumulado. Se ha optado, por juntar ambas etapas en un único equipo: depósito de alimentación.

En el dimensionamiento del reactor de digestión anaeróbica, a partir del Modelo N°3 corregido, se ha determinado que la humedad dentro del reactor siempre supera el 55%, siendo este valor el mínimo aceptado en el proceso. Por lo tanto, se concluye que no es necesario agregar agua al proceso (es decir, no es necesaria la operación de mezcla de agua). Cabe mencionar que en el modelo se han utilizado composiciones de la alimentación con contenido de agua sobre el 55%, por lo que la conclusión es válida bajo esas condiciones. Y dichas condiciones siempre se cumplen, pues se han impuesto como una regla en la alimentación (ver sección 11.1.1 Dosificación de residuos).

El almacenamiento de residuos queda dimensionado con su volumen.

Se simulan diferentes entradas de alimentación e inóculo (ver alimentaciones en Anexo K.1),

Se calcula el volumen para el peor de los casos, es decir, para el mayor flujo volumétrico de residuos. Se prueban diferentes entradas de alimentación (ver detalles en Anexo K.1), donde las que las alimentaciones 8, 9, 10 y 11 cuentan con la menor humedad aceptada en el sistema (55%); con ello, la densidad de los residuos es la menor posible y, en consecuencia, el flujo volumétrico es el mayor posible. En estas condiciones, el flujo volumétrico de residuos es de $1,017 \left[\frac{l}{día} \right]$.

Sobre los cálculos, es importante destacar que se ha estimado la densidad de la materia prima como una ponderación de las densidades del agua y los sólidos orgánicos originales (densidad = $590 \left[\frac{kg}{m^3} \right]$), utilizando la humedad del sustrato y su fracción orgánica (SV) informada en la sección de dimensionamiento del reactor. Se ha utilizado un factor de ocupación menor (80%) que en otros almacenamientos de este proceso para proveer un rango de seguridad mayor, por la variabilidad en la humedad de la materia prima.

Para dimensionar, se utiliza el valor del flujo volumétrico mencionado ($1,017 \left[\frac{l}{\text{día}} \right]$), el tiempo de almacenamiento (3 días) y un factor de ocupación del equipo (80%), según la Ecuación (25). Se impone un tiempo máximo de almacenamiento de 3 días, pues esto permitiría los residuos alimentados un día fuesen mezclados con los residuos de los anteriores dos. Como la alimentación se estima diaria, el procedimiento de uso de este almacenamiento sería ingresar los alimentos del día respectivo, mezclar, y luego extraer una masa similar a la ingresada para alimentar la siguiente etapa. Esto permite homogenizar los nutrientes y cumplir las hipótesis de dimensionamiento del reactor, conservando la flexibilidad en la alimentación diaria.

$$V_{\text{almacenamiento mat.prima}} = \frac{Fv_{\text{alimentación}} \cdot t_{\text{almacenamiento}}}{f_{\text{ocupación}}} \quad (25)$$

El volumen del almacenamiento de materia prima corresponde a 3,82 [l].

El volumen obtenido se encuentra sobreestimado para la mayoría de las alimentaciones, pues se ha obtenido a partir de los flujos volumétricos más grandes posibles.

En el Anexo H se presenta el detalle de los cálculos del dimensionamiento del depósito de alimentación.

11.1.4 Digestión Anaeróbica y mezcla de digestato

La digestión anaeróbica y la mezcla de digestato se realizarán en un mismo equipo, por razones que son explicadas en el Capítulo 12 Diseño. Así, el reactor deberá tener un sistema de mezcla y no se necesita un mezclador aparte.

La digestión anaeróbica es la operación unitaria más importante porque en ella se degradan los residuos y se genera biogás. Por esto, su dimensionamiento es el más detallado: se desea conocer las especies involucradas en el proceso, sus masas y posiciones a través del tiempo, dentro del reactor. Esto permitirá determinar, por ejemplo, el flujo de biogás generado y el sustrato consumido, bajo diferentes condiciones de operación. Con esto, podrán concluirse las dimensiones más adecuadas para el reactor.

Para lograr lo anterior, primero se parte desarrollando un modelo fisicoquímico que permite representar el proceso a partir de fenómenos físicos y químicos; el objetivo es dar cuenta de lo que ocurre dentro del reactor y su configuración espacial. Este modelo, posteriormente, se traduce a ecuaciones matemáticas a partir del desarrollo de balances de masa, que son implementadas en Octave para su resolución y simulación del proceso. El resultado entrega información sobre la masa y posición de las especies en el tiempo dentro del reactor, y con estos se determina la mejor configuración del reactor.

Cabe destacar que para que las ecuaciones representen la realidad se realiza un ajuste de parámetros a partir de datos experimentales reportados en la literatura.

Las dimensiones que se desean concluir con el volumen del reactor y el tiempo de retención de la materia prima.

11.1.4.1 Modelo fisicoquímico

El proceso de digestión anaeróbica corresponde a una serie de reacciones y transferencias que permiten degradar materia orgánica a metano y dióxido de carbono.

Para representar el proceso, se asume el modelo explicado en el Capítulo 7 Fundamentos (sección 7.2.2 Transferencias y 7.1.3 Etapa central: Digestión Anaeróbica): las partículas orgánicas son porosas, y en sus poros se alojan los microorganismos y agua; a todo este conjunto se le denomina matriz. En la digestión existen muchas de estas matrices que pueden estar en contacto entre sí o separadas por agua, en un medio líquido. Los microorganismos liberan enzimas que viajan por el agua dentro de la matriz o hacia otras matrices, y reaccionan con el sustrato degradándolo a moléculas solubles. Estas moléculas se transportan hacia otros microorganismos que los metabolizan y generan diferentes productos que pueden viajar hacia otros sectores de la matriz u otras matrices donde son, nuevamente, metabolizadas por microorganismos, o bien pueden ser transportadas hacia la superficie del medio líquido y evaporarse hacia el medio gaseoso. Es en el medio gaseoso donde se encuentra la mayor concentración de metano, que es el producto de interés. Para mayor detalle de los pasos de la digestión, se recomienda al lector revisar la Figura 13).

Para visualizar el proceso, se asume una configuración física del reactor y un tipo de operación. Por el momento, se supondrá un reactor flujo pistón cilíndrico, con una fase gaseosa y otra líquida, como muestra Figura 28:

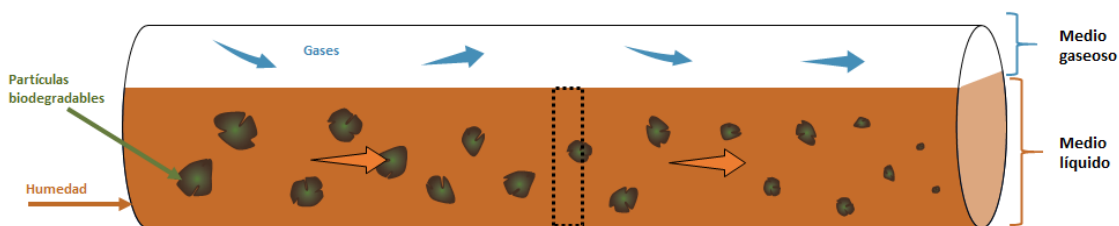


Figura 28. Representación de un reactor tubular para la digestión anaeróbica. La línea punteada indica el volumen de control.

En el medio líquido existe un flujo de agua que arrastra a las matrices. Las partículas biodegradables se van descomponiendo y generando biogás, por lo que cada vez son más pequeñas. El biogás se acumula en la fase gaseosa donde puede ser recolectado para su uso.

Idealmente, se desea que al final del reactor las partículas se hayan degradado completamente y se haya generado todo el biogás posible, para aprovechar completamente la materia prima. Si el reactor tuviese un largo reducido, no todo el sustrato se descompondría y, por lo tanto, el tamaño del reactor sería insuficiente.

Más adelante, se estudiará la representación matemática de solo una fracción diferencial del reactor (volumen de control diferencial) (ver línea punteada de la Figura 28) y, con ello, mediante la integración de las ecuaciones, se podrá modelar el reactor completo.

En las siguientes secciones se explica el rol del paso limitante, luego se mencionan las variables interesantes a estudiar en el modelo y, finalmente, se ahonda en las reacciones involucradas.

11.1.4.1.1 Paso limitante

El proceso puede ser modelado a partir de reacciones y transportes, donde cada uno de estos fenómenos provoca cambios a una velocidad determinada.

Existe un conjunto de fenómenos cuya representación en el modelo puede ser simplificada:

Considere el lector aquellas reacciones y transportes que se relacionan con la aparición o desaparición (desde ahora llamados cambios) de compuestos, cuyos pasos se encuentren en serie. Para representar la velocidad de dichos fenómenos basta con considerar la velocidad del más lento (el paso limitante).

Por ejemplo, la especie A y la B se transportan hasta un punto espacial, donde se encuentran y reaccionan para generar la especie C; entonces, la tasa de aparición de C corresponde a la velocidad más lenta de los pasos mencionados. Así, todos los fenómenos, tanto el transporte de A y B como la reacción, pueden ser descritos con la velocidad más lenta, y se obtendría el mismo resultado que utilizar las velocidades reales. Esto se suele realizar para simplificar los cálculos en el modelo matemático.

En la digestión anaeróbica, los pasos se encuentran en serie así que conviene modelar el sistema a partir del paso limitante. Dependiendo de las condiciones fisicoquímicas, podría limitar un paso u otro, sin embargo, en condiciones óptimas, las reacciones son más lentas que las transferencias. En este caso, si se escoge que limiten las reacciones, se asegura el menor tiempo de retención posible y, con ello, un menor volumen de reactor.

Se desea que el equipo ocupe el menor volumen posible, así se decide que en el proceso limiten las reacciones. Para que esto sea posible, en el diseño deben asegurarse que las condiciones óptimas se cumplan (se han descrito en el Capítulo 7 Fundamentos). Cabe mencionar que en las industrias de digestión anaeróbica suelen limitar las reacciones, así que se deduce que las condiciones requeridas no son muy exigentes en agitación, aislación, etc.[44][48].

11.1.4.1.2 Variables

Las variables a seguir en el modelo son las concentraciones de las especies involucradas en el proceso de digestión anaeróbica. Podría modelarse el comportamiento todas las especies, sin embargo, tal complejidad no aporta información relevante si no se cuentan con datos suficientes para ajustar todos los parámetros cinéticos a la realidad. Si bien la literatura ofrece abundante información sobre digestión anaeróbica, las mediciones no son multivariantes para residuos orgánicos (más detalles en sección 11.1.4.3.2 Ajuste de parámetros).

Teniendo presente lo anterior, a continuación, se explica qué variables serán incluidas en el modelo:

1. Materia prima:

La materia prima corresponde a residuos orgánicos. Es de particular interés para la nutrición de los microorganismos el contenido de carbono (*C*), nitrógeno (*N*) y azufre (*S*).

Se considera que los compuestos carbonados se dividen en lípidos, carbohidratos y proteínas; los ácidos nucleicos se descartan por su baja concentración. Algunos autores no realizan esta subdivisión y consideran que la materia orgánica es solo una molécula, sin embargo, esta falta

de variedad no permite evaluar casos en que la alimentación del reactor cambia. El lector podrá notar la utilidad de dividir la materia orgánica en los resultados del modelo.

Se descarta subdividir los orgánicos en no degradables, de fácil y difícil degradación, porque no se encuentra información disponible sobre la evolución de estas moléculas en reactores. Existen datos para esta subdivisión, pero asumiendo solo en un tipo de macromolécula, pero, como ya se mencionó, se prefiere modelar diferentes macromoléculas.

Por lo tanto, las variables a seguir corresponden a lípidos, carbohidratos y proteínas.

2. Biogás:

EL biogás está compuesto de 8 especies principalmente, así que las concentraciones de dichas moléculas serán seguidas en el modelo, estas son CH_4 , CO_2 , H_2S , NH_3 , O_2 , N_2 , Cl total y F total.

3. Agua:

El H_2O es seguido por su importancia en las reacciones y transferencia. Si bien este último fenómeno no es modelado, se debe asegurar un contenido de humedad adecuado como condición para que ocurre de forma óptima.

Las sustancias inhibitoras y tóxicas para el proceso serán restringidas en la alimentación, así que no es necesario seguir su concentración en el modelo. Lo mismo ocurrirá con los contaminantes químicos que podrían afectar al digestato.

La temperatura, si bien afecta reacciones y transportes, se asume adecuada (dentro del rango mesofílico) para simplificar el modelo. En el Capítulo 12 Diseño se ahondará en el transporte de calor y el cumplimiento de dicho supuesto.

Los microorganismos son fundamentales para el proceso ocurra, sin embargo, no se consideran como variables por la falta de datos experimentales.

Cabe mencionar que el digestato corresponde a una mezcla de materia no degradada completamente, microorganismos y agua, es decir, no es una especie nueva así que no corresponde una variable extra.

11.1.4.1.3 Reacciones

La degradación de carbohidratos, proteínas y lípidos ocurre en 4 fases: Hidrólisis, Acidogénesis, Acetogénesis y Metanogénesis, como se ha explicado en la sección 7.1.3.1 Microorganismos. Cada una de estas fases involucra una red de reacciones en serie y/o paralelo de descomposición correspondiente a cada sustrato. Las fases más estudiadas son la hidrólisis y metanogénesis, posiblemente por tener cinéticas lentas.

El paso limitante cambia según el contexto fisicoquímico en el que ocurre el proceso. Para el reactor en estudio se han propuesto parámetros operacionales, como el tamaño de partícula del sustrato, rango de temperatura, etc., sin embargo, a pesar de tener información sobre la fisicoquímica, no es posible predecir la fase más lenta. Cabe mencionar que para el ajuste de parámetros se usarán datos experimentales de un proceso con características similares al que posee el reactor en estudio, así

que el paso limitante deber ser el mismo; no obstante, también se desconoce el paso limitante en el experimento.

Por lo tanto, ya que no es posible determinar con certeza la fase más lenta, se opta por representar las 4 fases en el modelo. Existen modelos que proponen complejas redes de reacciones, que consideran, por supuesto, reacciones intermedias y productos intermedios, como se muestra de forma esquemática en la Figura 29. Sin embargo, los datos cinéticos son escasos y no se encuentra información adecuada para el caso de degradación de residuos.

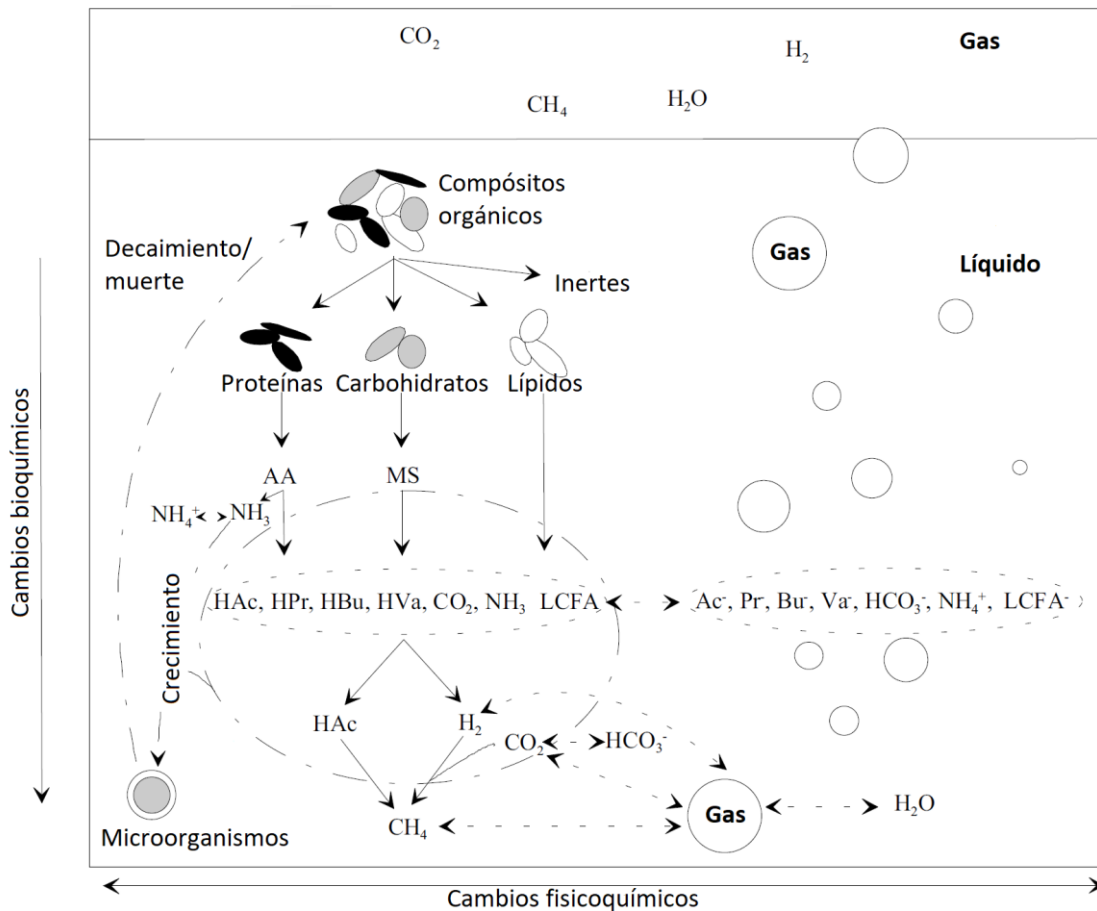


Figura 29. Cambios moleculares durante la digestión anaeróbica. Traducido de [49].

Considerando la información disponible, se decide dividir el proceso en 2 etapas, donde la primera corresponde a la hidrólisis y la segunda a la acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Dicha agrupación se realiza debido a que se cuenta con las reacciones representativas de cada etapa y datos suficientes para ajustar sus cinéticas.

Para la etapa 1, la reacción de hidrólisis es conocida: una macromolécula se disocia en sus monómeros gracias a la adición de agua, catalizado por enzimas hidrolíticas microbianas. En la etapa 2, los monómeros se transforman en metano y dióxido de carbono, catalizada por microorganismos; se utilizará la fórmula de Buswell que propone una reacción para este tipo de degradación.

Si bien podría usarse directamente la fórmula de Buswell para representar la degradación de las macromoléculas en un solo paso, la propuesta de un mecanismo en dos pasos da origen a una ley

cinética mejor adaptada a la realidad. Cabe mencionar que dicha fórmula es típicamente utilizada para describir la descomposición de sustratos, pero asumiendo que el sustrato corresponde a monómeros, aunque en realidad sean polímeros.

No se incluyen reacciones de crecimiento y metabolismo microbiano, que considera consumo de nutrientes y producción de metano y otras sustancias. Por lo tanto, las reacciones mencionadas anteriormente no podrán depender de la presencia de microorganismos, así, la ley cinética no tendrá una estructura dependiente de la catálisis biológica (tipo Monod).

No incluir variables como productos intermedio y microorganismos en el modelo, no tiene efecto en el comportamiento del modelo cuando se representan las condiciones experimentales del ajuste de parámetros, sin embargo, el modelo se aleja de la realidad cuando dichas condiciones cambian porque no es capaz de predecir ni extrapolar información, pues carece de una red de reacciones que representen la complejidad del proceso real. Así, el modelo es deficiente debido a la escasez de datos, pero corresponde a la representación más compleja de formular considerando los antecedentes reportados.

De ser posible mejorar el modelo, se incluirían las siguientes variables en orden decreciente de importancia: concentración de microorganismos, temperatura y concentración de productos intermedios, porque los primeros acercan considerablemente el modelo a la realidad y la segunda es una variable más sensible en estos sistemas que la tercera.

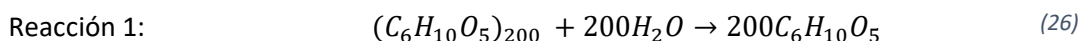
A continuación, se presentan las reacciones de degradación de los 3 sustratos considerados, que se descomponen en rutas paralelas:

a) Carbohidratos:

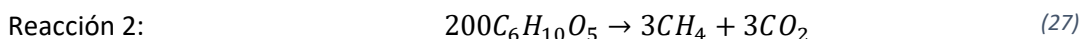
Se asume como sustrato la celulosa, aunque podría utilizarse el almidón. Cualquiera sea la molécula utilizada, no hay cambios en las moléculas producto de la hidrólisis. Podrían existir cambios en la entalpía de reacción, pero esto es irrelevante para el modelo pues no se desarrollan balances energéticos.

La fórmula molecular de la celulosa y almidón corresponde a polímeros de glucosa: $(C_6H_{10}O_5)_n$ donde n es un número que puede tomar diferentes valores. Se utiliza el valor 200, que es el mínimo número de monómeros de glucosa para la celulosa.

Así, la reacción para la etapa 1 es la siguiente:



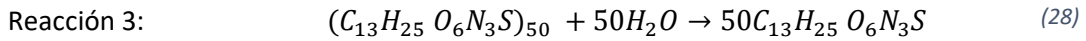
Para la etapa 2, según la fórmula de Buswell:



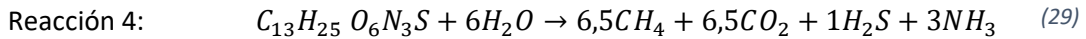
b) Proteínas:

El sustrato corresponde a un polímero de aminoácidos, típicamente se utiliza la siguiente fórmula empírica: $(C_{13}H_{25}O_6N_3S)_n$. Se asume $n = 50$, similar a la molécula de insulina.

La reacción para la etapa 1 es:



La reacción para la etapa 2, según la fórmula de Buswell, es:

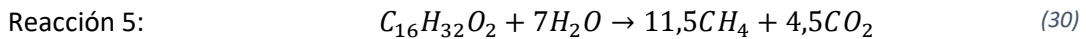


c) Lípidos:

Los lípidos que usualmente se encuentran en los residuos de alimentos corresponden a aceites y grasas, que están compuestos por triglicéridos (ácidos grasos enlazados con moléculas de glicerol).

Note el lector que, a diferencia de la hidrólisis de las otras macromoléculas, los lípidos generan un componente extra a parte de su monómero, el glicerol. En la etapa 2, los ácidos grasos se degradan a metano, pero se desconoce lo que ocurre con el glicerol, además, no se desea seguir productos intermedios adicionales. Por lo anterior, se decide utilizar la técnica usual en el modelamiento de procesos de digestión anaeróbica: asumir un solo paso de transformación descrito por la fórmula de Buswell, con ácidos grasos ($C_{16}H_{32}O_2$) como sustrato. Otra alternativa es utilizar un lípido como sustrato o suponer que el glicerol se degrada según Buswell, entre otras; se optó por el ejercicio habitual por simplicidad.

Así, la reacción de descomposición de los lípidos es:



11.1.4.2 Modelo matemático

Un modelo matemático representa la realidad a través de ecuaciones, que permiten concluir valores asociados a las especies (su masa, espacio y tiempo). Para ello se realiza un balance de masa, que requiere de las velocidades (cinéticas) de las reacciones descritas en la sección anterior.

11.1.4.2.1 Cinéticas

La velocidad de las reacciones queda descrita por leyes cinéticas. Se asume que la estructura es de primer orden, que corresponde un supuesto habitual en ingeniería química. Una cinética de primer orden cuenta con una constante multiplicada por la concentración del reactivo limitante:

$$-r_{ij} = -k_j * C_i \quad (31)$$

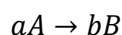
Donde:

$-r$ = velocidad de consumo de la especie i debido a la reacción j , $\left[\frac{\text{masa}}{\text{tiempo} \cdot \text{volumen}} \right]$.

k = constante cinética de la reacción j , $\left[\frac{1}{\text{tiempo}} \right]$.

C_i = concentración de la especie i (reactivo limitante), $\left[\frac{\text{masa}}{\text{volumen}} \right]$.

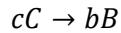
Si se desea expresar la velocidad de generación de los productos de la reacción j , basta realizar un ajuste estequiométrico con la velocidad de consumo del reactivo limitante, por ejemplo:



$$-r_{1A} = -k_1 * C_A \quad (32)$$

$$r_{1B} = \left(\frac{b}{a}\right) r_{1A}$$

Si el producto B también se genera en otra reacción, entonces:



$$-r_{2C} = -k_2 * C_C \quad (33)$$

$$r_{2B} = \left(\frac{b}{c}\right) r_{2C}$$

Considerando las dos reacciones, entonces, en total B se genera gracias a dos tasas:

$$r_B = r_{1B} + r_{2B}$$

Si se considerara que las reacciones son catalizadas por microorganismos o que dan origen a crecimiento microbiano lo más adecuado sería utilizar una ley cinética con estructura de Monod:

$$r_{ij} = -\frac{(k_j \cdot C_i \cdot X)}{K_j + C_i} \quad (34)$$

Donde:

$-r_{ij}$ = velocidad del consumo de especie i por parte de los microorganismos, debido a la reacción j , $\left[\frac{\text{masa}}{\text{tiempo} \cdot \text{volumen}}\right]$.

C_i = concentración de la especie i (reactivo limitante), $\left[\frac{\text{masa}}{\text{volumen}}\right]$.

k_j = velocidad máxima de consumo según la reacción j , $\left[\frac{m}{s}\right]$.

K_j = concentración de microorganismos cuando la velocidad es $\frac{k_j}{2}$, $\left[\frac{\text{masa}}{\text{volumen}}\right]$.

En el caso mencionado, para determinar la tasa de crecimiento de microorganismos, basta con ajustar estequiométricamente, tal como se realizó en el ejemplo previo. Se suelen agregar otros términos a dicha tasa, para incluir la muerte celular y otros fenómenos.

A continuación, en la Tabla 57, se muestran las leyes cinéticas asociadas de todas las variables y reacciones.

Tabla 57. Leyes cinéticas por especie.

Variable	Reacción					
	1	2	3	4	5	Total
Celulosa	$-r_{cel1}$ $= -k_1 \cdot C_{cel}$					$-r_{cel1}$
Glucosa	r_{glu1} $= 200 \cdot r_{cel1}$	$-r_{glu2}$ $= -k_2 \cdot C_{glu}$				$r_{glu1} - r_{glu2}$
Proteínas			$-r_{pro3}$ $= -k_3 \cdot C_{pro}$			$-r_{pro3}$
Aminoácidos			r_{aa3} $= 50 \cdot r_{pro3}$	$-r_{aa4}$ $= -k_4 \cdot C_{aa}$		$r_{aa3} - r_{aa4}$
Ácido sulfhídrico				$r_{h2s4} = r_{aa4}$		r_{h2s4}
Ácidos grasos					$-r_{acg5}$ $= -k_5 \cdot C_{acg}$	$-r_{acg5}$
Amoníaco				r_{nh34} $= 3 \cdot r_{aa4}$		r_{nh34}
Metano		r_{ch42} $= 3 \cdot r_{glu2}$		r_{ch44} $= 6,5 \cdot r_{aa4}$	r_{acg5} $= 11,5 \cdot r_{acg5}$	$r_{ch42} + r_{ch44} + r_{acg5}$
Dióxido de carbono		r_{co22} $= 3 \cdot r_{glu2}$		r_{co24} $= 6,5 \cdot r_{aa4}$	r_{co25} $= 4,5 \cdot r_{acg5}$	$r_{co22} + r_{co24} + r_{co25}$
Agua	$-r_{h2o1}$ $= -200 \cdot r_{cel1}$		$-r_{h2o3}$ $= -50 \cdot r_{pro3}$	$-r_{h2o4}$ $= -6 \cdot r_{aa4}$	$-r_{h2o5}$ $= -7 \cdot r_{acg5}$	$-r_{h2o1} - r_{h2o3} - r_{h2o4} - r_{h2o5}$

11.1.4.2.2 Balances de masa

Se ha propuesto que el reactor sea una sucesión de batch con agitación o un flujo pistón (PFR). La decisión final del tipo de reactor a utilizar se determinará en el diseño, pues corresponde a razones sustentadas en la geometría y operación del equipo.

Para realizar el balance de masa se supondrá un PFR, como ha sido mencionado en la sección 11.1.4.1 Modelo fisicoquímico. Fácilmente los resultados del balance pueden transformarse en resultados para una sucesión de reactores batch, considerando que la longitud de un PFR se relaciona con el tiempo de retención en un batch.

11.1.4.2.2.1 Expresión general del balance de masa en fase líquida

A continuación, se determina la ecuación general de balance de masa para una especie, en un volumen de control en la fase líquida.

El balance de masa queda descrito por la siguiente fórmula:

$$E_{iliq} - S_{iliq} + E_{igas} - S_{igas} + D_i = A_i \quad (35)$$

Donde:

E_{ji} = Flujo de entrada del componente i desde la fase j (líquida o gaseosa), $\left[\frac{mol}{s}\right]$.

S_{ji} = Flujo de salida del componente i desde la fase j , $\left[\frac{mol}{s}\right]$.

D_i = Cambio (generación o desaparición) del componente i , $\left[\frac{mol}{s}\right]$.

A_i = Acumulación del componente i , $\left[\frac{mol}{s}\right]$.

En reactores continuos, como el PFR, se asume estado estacionario (es decir, no existen variaciones temporales) por lo que no hay acumulación de masa, así que A_i es nulo.

Se supone mezcla completa en el volumen de control diferencial; si el volumen es suficientemente pequeño de forma axial, entonces este supuesto es cierto; respecto a la dimensión radial, para que el supuesto sea cierto se debería asegurar agitación o un régimen turbulento de flujo. Con esto, se puede concluir que la concentración de salida del componente i es homogénea radialmente e igual a la concentración del volumen de control, además, la concentración de entrada es homogénea radialmente. Cabe destacar que asumir mezcla completa quiere decir que la transferencia de masa es muy rápida, por lo que las concentraciones en el medio son homogéneas. Por ejemplo, si un compuesto se genera en un punto, viaja a otros lugares igualando su concentración en todos los puntos. La existencia de mezcla completa permite fortalecer el supuesto de que las transferencias son más rápidas que las reacciones.

Usualmente, se suele asumir que la masa líquida total que entra al volumen de control es igual a la masa líquida total que sale, y que la densidad es constante, por lo que el flujo volumétrico líquido que entra es igual al que sale. Esto podría no ser cierto para el caso del reactor en estudio, porque hay masa que se pierde a la fase gaseosa, pero es una fracción reducida respecto al total, según la literatura, así que se asumirá como cierto por simplicidad de los cálculos.

Considerando todo lo anterior, se pueden definir las siguientes expresiones:

$$E_{liqi} = F_v \cdot C_{iE} \quad (36)$$

$$S_{liqi} = F_v \cdot C_i \quad (37)$$

Donde:

F_v = flujo volumétrico de entrada o de salida, $\left[\frac{m^3}{s}\right]$.

C_{iE} = concentración del componente i en el flujo de entrada, $\left[\frac{mol}{m^3}\right]$.

C_i = concentración del componente i en el volumen de control o en el flujo de salida, $\left[\frac{m^3}{s}\right]$.

Respecto a D_i , este corresponde a los moles del componente i que aparecen o desaparecen en el tiempo; este es el término que se relaciona con los fenómenos de transferencia y reacciones, que pueden ser simplificados con el paso limitante. Dado que el paso limitante son las reacciones, entonces, la velocidad del cambio es la velocidad de dichas reacciones. Así, se D_i puede escribir de la siguiente forma:

$$D_i = (\pm)r_i \cdot dV \quad (38)$$

Donde:

$(\pm)r$ = velocidad de aparición (+) o desaparición (–) del componente i en el volumen de control diferencial dV , $\left[\frac{mol}{m^3 \cdot s}\right]$.

dV = volumen de control diferencial dV donde ocurren los cambios, $[m^3]$.

La expresión de r se relaciona con las características de la reacción, pero también con las condiciones que proveen los otros pasos que se encuentran en serie (transferencias).

Recuerde el lector que se ha asumida mezcla completa, así que el cambio ocurre en todo el volumen de control, por lo tanto, la expresión para D_i es válida para todo el volumen.

Cabe destacar que hay algunas especies inertes que no cambian dentro del volumen de control, es decir, no aparecen ni desaparecen, por lo que el término D_i es nulo.

Los flujos del componente i que entran desde la fase gaseosa o salen hacia esta están determinados por el equilibrio másico que debe existir entre la fase líquida y gaseosa: la especie se transporta desde el seno del fluido hacia la superficie y se evapora, y luego viaja desde la interfase hacia el seno del gas. Esta velocidad se puede calcular con la ecuación de transferencia de masa y la ecuación de Henry o Raoult, según corresponda, que relacionan el equilibrio gaseoso con el líquido. Con lo anterior, la transferencia se puede expresar de la siguiente forma:

$$E_{igas} - S_{igas} = dA \cdot k_{ci} \cdot (C_i^* - C_i) \quad (39)$$

Donde:

dA = Área diferencial de transferencia (es igual al área expuesta del volumen de control a la fase gaseosa), $[m^2]$.

k_{ci} = Coeficiente de transporte global de masa para la especie i , $\left[\frac{m}{s}\right]$.

C_i^* = concentración de la especie i en la interfase líquida, $\left[\frac{mol}{m^3}\right]$

La concentración de la interfase se calcula a partir de las ecuaciones de Henry o Raoult, y depende de la presión parcial del componente i en la fase gaseosa. A mayor presión parcial, se espera que la concentración en la interfase sea mayor. Si esa concentración de la interfase es mayor a la del seno del fluido, entonces el componente viaja desde el gas y se absorbe en el agua para aumentar su concentración; si la concentración en la interfase es menor a la del seno, entonces el componente viaja desde la fase líquida hacia el gas para reducir su concentración.

Para simplificar los cálculos se considera que la fase gaseosa es homogénea, por lo que presión parcial del gas es constante en el espacio. Además, el gas es recolectado, así que la presión dentro del equipo puede mantenerse constante a través del tiempo. Así, las presiones parciales no varían, por lo que C_i^* es constante, sin embargo, tanto las presiones y concentraciones son desconocidas. El valor de k_{ci} también es incierto y se prefiere no calcularlo. Así que se adopta una estrategia diferente para calcular los flujos gaseosos.

Se asume que C_i^* es constante e igual a la concentración de saturación, que es un valor razonable considerando los supuestos anteriores. Existen algunas zonas del reactor donde la concentración es mayor que C_i^* , y en otras, menor. Así, en algunas zonas el componente es absorbido desde la fase gas; y en otras, desorbido hacia la misma. Teniendo lo anterior presente:

a) Se toma como supuesto que la tasa de desorción es igual a la de generación para que, después de alcanzada la saturación, el compuesto generado por las reacciones sea inmediatamente liberado a la fase gas. Con lo anterior, el líquido saldrá saturado del reactor y no sobresaturado, lo resultaría físicamente imposible.

Si C_i^* tomara un valor menor al de la saturación, podría ser factible que el líquido saliera con una concentración mayor que la concentración en la interfase, sin embargo, como se ha asumido la de saturación, esto no es posible.

b) Respecto a la absorción, esta se omite, pues no se tienen referencias de la velocidad del fenómeno. Este supuesto solo retrasa la salida de gas, lo que no tiene un efecto importante en los resultados.

Se adopta una estrategia diferente para el agua: se sabe que el biogás suele salir saturado en agua, así que se supondrá que los gases que se evaporan están saturados con agua. La humedad del gas no vuelve a condensarse, puesto que la fracción de agua en la fase líquida es muy alta y esto provoca que la transferencia vaya desde el líquido al gas en todo el reactor.

Además, se asume que otras especies no se evaporan por poseer una cinética lenta, según la literatura, como las moléculas orgánicas.

Por lo tanto, para todos los compuestos excepto el agua y moléculas orgánicas:

$$E_{igas} = 0 \quad (40)$$

$$S_{igas} = r_i \cdot dV \text{ si } C_i > C_i^* \quad (41)$$

$$S_{igas} = 0 \text{ si } C_i < C_i^* \quad (42)$$

Para el agua:

$$E_{igas} = 0 \quad (43)$$

$$S_{h2ogas} = 0,0728 \cdot \sum_i (S_{igas}) \quad (44)$$

Donde el 0,0728 corresponde a la fracción de agua para un gas saturado en agua, a 40 [°C] y 1 [atm].

Y para las moléculas orgánicas:

$$E_{igas} = 0 \quad (45)$$

$$S_{igas} = 0 \quad (46)$$

Finalmente, la ecuación del balance de masa queda como sigue:

$$(F_v \cdot C_{iE} - F_v \cdot C_i) - S_{igas} \pm r_i \cdot dV = 0 \quad (47)$$

Reemplazando dV por $dz \cdot S$, donde dz corresponde al ancho del volumen diferencial y S al área transversal del volumen:

$$(F_v \cdot C_{iE} - F_v \cdot C_i) - S_{igas} \pm r_i \cdot dz \cdot S = 0 \quad (48)$$

Dividiendo por dz :

$$\left(\frac{F_v \cdot C_{iE} - F_v \cdot C_i}{dz} \right) - \frac{S_{igas}}{dz} \pm r_i \cdot S = 0 \quad (49)$$

$$F_v \cdot \left(\frac{dC}{dz} \right) - \frac{S_{igas}}{dz} \pm r_i \cdot S = 0 \quad (50)$$

Finalmente, reordenando:

$$\frac{dC}{dz} = \frac{\left(\frac{S_{igas}}{dz} \mp r_i \cdot S \right)}{F_v} \quad (51)$$

Donde $\frac{S_{igas}}{dz}$ puede tomar los valores según sea el caso: 0; $r_i \cdot S$; o $0,0728 \cdot \frac{\sum_i(S_{igas})}{dz}$.

11.1.4.2.2.2 Expresión general del balance de masa en fase gas

Como se ha mencionado, se asume que la fase gas es homogénea y tiene una presión constante. Se toma como volumen de control, entonces, toda la sección gaseosa. A esta entra un flujo proveniente de la fase líquida y sale el flujo que es recolectado, y no existe acumulación ni cambio. Por lo tanto, el balance queda como:

$$E_{iliq}^g - S_{igas}^g = 0 \quad (52)$$

Donde:

E_{iliq}^g = Flujo de entrada a la fase gas, desde el líquido, $\left[\frac{mol}{s} \right]$.

S_{igas}^g = Flujo de salida desde la fase gas al exterior, $\left[\frac{mol}{s} \right]$.

El flujo que entra al gas proveniente desde el líquido corresponde a todos los flujos de componentes que se han evaporado desde la fase líquida, es decir, la integral de los flujos generados:

$$E_{liq}^{gas} = \int_A \left(\frac{S_{igas}}{dz} \right) dA \quad (53)$$

Además:

$$S_{igas} = F_v^g \cdot C_i^g \quad (54)$$

Donde:

F_v^g = Flujo volumétrico que sale de la fase gas al exterior, $\left[\frac{m^3}{s} \right]$.

C_i^g = Concentración del componente i en el flujo de salida o en el volumen de control, $\left[\frac{mol}{m^3} \right]$.

Cabe destacar que a partir de gases ideales se tiene que:

$$F_v^g = \frac{n \cdot R \cdot T}{P} \quad (55)$$

$$n = \sum_i \left(\int_A \left(\frac{S_{igas}}{dz} \right) dA \right) \quad (56)$$

Donde:

n = flujo molar total, $\left[\frac{mol}{s} \right]$.

R = constante de los gases ideales, $\left[\frac{m^3 \cdot Pa}{mol \cdot K} \right]$.

T = temperatura del gas, $[K]$.

P = presión del gas, $[Pa]$.

Finalmente, el balance de masa global en el gas es:

$$\int_A \left(\frac{S_{igas}}{dz} \right) dA - F_v^g \cdot C_i^g = 0 \quad (57)$$

$$\frac{\int_A \left(\frac{S_{igas}}{dz} \right) dA}{F_v^g} = C_i^g \quad (58)$$

11.1.4.2.3 Balances de masa por especie

Con las ecuaciones generales de balance de masa para la fase líquida y gas, se procede a realizar el balance de masa de cada una de las especies. Se utilizan las leyes cinéticas determinadas en la sección 11.1.4.2.1 Cinéticas. Las expresiones para los balances de masa por especie se encuentran disponibles en la Tabla 58.

Tabla 58. Expresiones para los balances de masa por especie.

Variable	Balance de masa	
	Fase líquida	Fase gas
Celulosa	$-r_{cel1} \cdot \frac{S}{F_v} = \frac{dC_{cel}}{dz}$	$0 = C_{cel}^g$
Glucosa	$(r_{glu1} - r_{glu2}) \cdot \frac{S}{F_v} = \frac{dC_{glu}}{dz}$	$0 = C_{glu}^g$
Proteínas	$-r_{pro3} \cdot \frac{S}{F_v} = \frac{dC_{pro}}{dz}$	$0 = C_{pro}^g$
Aminoácidos	$(r_{aa3} - r_{aa4}) \cdot \frac{S}{F_v} = \frac{dC_{aa}}{dz}$	$0 = C_{aa}^g$
Ácido sulfhídrico	$0 = \frac{dC_{h2s}}{dz}$ si $C_{h2s} > C_{h2s}^*$ $r_{h2s4} \cdot \frac{S}{F_v} = \frac{dC_{h2s}}{dz}$ si $C_{h2s} < C_{h2s}^*$	$\frac{\int_A (\frac{S_{h2sgas}}{dz}) dA}{F_v^g} = C_{h2s}^g$
Ácidos grasos	$-r_{acg5} \cdot \frac{S}{F_v} = \frac{dC_{acg}}{dz}$	$0 = C_{acg}^g$
Amoníaco	$0 = \frac{dC_{nh3}}{dz}$ si $C_{nh3} > C_{nh3}^*$ $r_{nh34} \cdot \frac{S}{F_v} = \frac{dC_{nh3}}{dz}$ si $C_{nh3} < C_{nh3}^*$	$\frac{\int_A (\frac{S_{nh3gas}}{dz}) dA}{F_v^g} = C_{nh3}^g$
Metano	$0 = \frac{dC_{ch4}}{dz}$ si $C_{ch4} > C_{ch4}^*$ $(r_{ch42} + r_{ch44} + r_{acg5}) \cdot \frac{S}{F_v} = \frac{dC_{ch4}}{dz}$ si $C_{ch4} < C_{ch4}^*$	$\frac{\int_A (\frac{S_{ch4gas}}{dz}) dA}{F_v^g} = C_{ch4}^g$
Dióxido de carbono	$0 = \frac{dC_{co2}}{dz}$ si $C_{co2} > C_{co2}^*$ $(r_{co22} + r_{co24} + r_{co25}) \cdot \frac{S}{F_v} = \frac{dC_{co2}}{dz}$ si $C_{co2} < C_{co2}^*$	$\frac{\int_A (\frac{S_{co2gas}}{dz}) dA}{F_v^g} = C_{co2}^g$
Agua	$0,0728 \cdot \frac{\sum_i (S_{igas})}{dz} +$ $(-r_{h2o1} - r_{h2o3} - r_{h2o4} - r_{h2o5}) \cdot \frac{S}{F_v} = \frac{dC_{h2o}}{dz}$	$\frac{\int_A (\frac{S_{h2ogas}}{dz}) dA}{F_v^g} = C_{h2o}^g$
Moléculas cloradas	$0 = \frac{dC_{cl}}{dz}$	$0 = C_{cl}^g$
Moléculas fluoradas	$0 = \frac{dC_{fl}}{dz}$	$0 = C_{fl}^g$

En la siguiente sección se explica el método de resolución de los balances de masa.

11.1.4.3 *Método de resolución de balances de masa*

La resolución de los balances de masa entrega por resultado los valores de las concentraciones de las especies en la fase líquida y gas, a lo largo del reactor. Las incógnitas son, por lo tanto, los valores C_i y C_i^g en todas las posiciones dentro del reactor.

Los balances de masa de la fase líquida corresponden a ecuaciones diferenciales ordinarias (EDOs), que al ser integradas representan matemáticamente a todo el reactor. Mientras que los de la fase gas son ecuaciones algebraicas que hacen uso de los resultados de los balances anteriores.

Se les debe dar un valor a todos aquellos términos que no son incógnitas, como S y F_v . Estos datos serán definidos en las siguientes secciones, según las condiciones deseadas del proceso. Existen algunos parámetros, sin embargo, que son desconocidos y deben obtenerse a partir de experimentación: las constantes cinéticas.

A continuación, se explica la metodología para resolver el sistema de ecuaciones y obtener las constantes cinéticas a partir de un ajuste de parámetros. En ambos casos se utilizará el software Octave para la resolución.

11.1.4.3.1 Resolución del sistema de ecuaciones

La resolución de las EDOs entrega los valores de las concentraciones de las especies en la fase líquida. Para resolverlas se deben integrar a lo largo del reactor, para ello se utiliza un método numérico de solución de sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias por diferencias finitas de paso variable, llamado Isode de Octave.

Para resolver se requiere la composición de la alimentación (condición inicial), el flujo de entrada, los valores de parámetros relacionados con las características físicas del reactor, entre otros. También los parámetros cinéticos.

La función Isode entrega una matriz con los valores de concentración de las especies en cada posición.

Las ecuaciones algebraicas de la fase gas se resuelven con información obtenida de la resolución de las EDOs: se suman todos los flujos gaseosos que salen del reactor, para cada especie, y se divide por el flujo volumétrico, y se obtiene la concentración de cada especie en el gas.

Se desea incluir reciclo de digestato, pues aporta inóculo que es favorable para la digestión. El reciclo se incluye de la siguiente forma: resolver iterativamente las ecuaciones, asumiendo que una fracción del flujo de salida ingresa al reactor en la siguiente iteración. Cuando los resultados del modelo no varíen, entonces la solución del sistema es la final y no se requiere seguir iterando.

Se ha confeccionado un código para resolver el sistema de ecuaciones para cada caso requerido del dimensionamiento que se encuentra más adelante (para un ejemplo, ver Anexo I. Código Modelo 1) y también para el Ajuste de Parámetros (código en Anexo J. Código ajuste de parámetros).

11.1.4.3.2 Ajuste de parámetros

El ajuste de parámetros permite estimar el valor de las constantes cinéticas a partir de una comparación de los resultados del modelo con datos experimentales. Los parámetros cinéticos a ajustar son k_1, k_2, k_3, k_4 y k_5 .

Se utilizarán como datos experimentales la información obtenida de un test PBM [7] presentado en el Capítulo 7 Fundamentos. En este test se realizaron experimentos en reactores batch, donde se alimentaron residuos de alimentos que se digirieron anaeróbicamente. Los datos obtenidos consisten en la producción de metano por masa de sólido agregado a través del tiempo. Esta información es la más adecuada encontrada en bibliografía. Cabe mencionar que los cambios que ocurren en el experimento son rápidos en comparación con procesos industriales, esto posiblemente se debe a la alta concentración de inóculo (reciclo) en reactor, 4 veces la masa de sustrato seco.

Los datos mencionados deben ser transformados para ser comparables con los resultados del reactor continuo. Así, se debe relacionar el tiempo de reacción con el largo del reactor, suponiendo una velocidad del flujo. Una vez adaptados los datos, se realiza lo siguiente:

Primero, se resuelve el modelo desarrollado, utilizando las condiciones del experimento, como el flujo de residuos tratado y flujo de reciclo, y se utilizan valores de constantes cinéticas arbitrarias (adivinanza inicial). Del modelo se obtienen las concentraciones de las especies y, en particular, se necesita calcular con esa información la producción de metano por masa de sustrato.

Luego, para encontrar el valor de los parámetros cinéticos, se minimizará la diferencia entre los datos experimentales y los resultados del modelo, utilizando el método de optimización de Levenberg-Marquardt, implementado en Octave con la función lsqr. Este método modifica el valor de los parámetros hasta que la diferencia cuadrática entre los datos y resultados sea la mínima.

Dada la existencia de mínimos locales, la búsqueda de parámetros fue aplicada iterativamente: los parámetros obtenidos en la iteración N se utilizan como adivinanza inicial en la iteración $N + 1$, modificando las opciones de búsqueda del óptimo, como la variación máxima de los parámetros y la tolerancia, permitiendo que el método pueda continuar la búsqueda saliendo del mínimo local.

Cabe mencionar que el número de parámetros máximo que es posible ajustar es igual al número de datos menos 1. Además, solo es posible ajustar aquellas cinéticas que se relacionen con el dato experimental: la producción de metano depende de las cinéticas de las reacciones 1, 2, 3, 4 y 5, por lo tanto, es posible ajustar sus parámetros cinéticos. Si hubiese otras reacciones que no se relacionaran con la producción de metano, como la degradación de fósforo orgánico a fosfato, no serían posible de ajustar. Es por esto último que el modelo no considera reacciones con productos intermedios.

También es importante considerar que: el mecanismo propuesto de reacción cuenta con 3 rutas paralelas para la producción de metano (una para cada sustrato) y los experimentos disponibles no distinguen el origen molecular del metano, es decir, podría ser producido a partir de proteínas, lípidos o carbohidratos con cinéticas similares o unas más rápidas que otras. El ajuste de parámetro realizados tiene, por tanto, la misma característica: los valores de los parámetros ajustan la producción de metano experimental, pero el conjunto de valores podría ser diferentes conservando el ajuste y modificando la velocidad relativa de consumo de proteínas, lípidos y carbohidratos. Por

lo tanto, no es recomendable extrapolar ni resolver el modelo fuera de las condiciones del experimento.

De la literatura se sabe que algunas reacciones son más rápidas que otras, y por esta razón se decide ligar las constantes cinéticas por medio de otras ecuaciones a fin de controlar la velocidad relativa entre reacciones. Esto permite reducir el error mencionado en el párrafo anterior.

En la Tabla 59 se muestra el resultado del ajuste de parámetros. En la Figura 30 se presentan los resultados del modelo con los parámetros ajustados y los datos experimentales; el intervalo de confianza del ajuste es 3,4%.

Tabla 59: Parámetros cinéticos obtenido a partir del ajuste de parámetros.

Constante cinética	Valor $\left[\frac{1}{s}\right]$
k_1	$6,85 \cdot 10^{-5}$
k_2	$1,67 \cdot 10^{-5}$
k_3	$7,41 \cdot 10^{-5}$
k_4	$6,02 \cdot 10^{-5}$

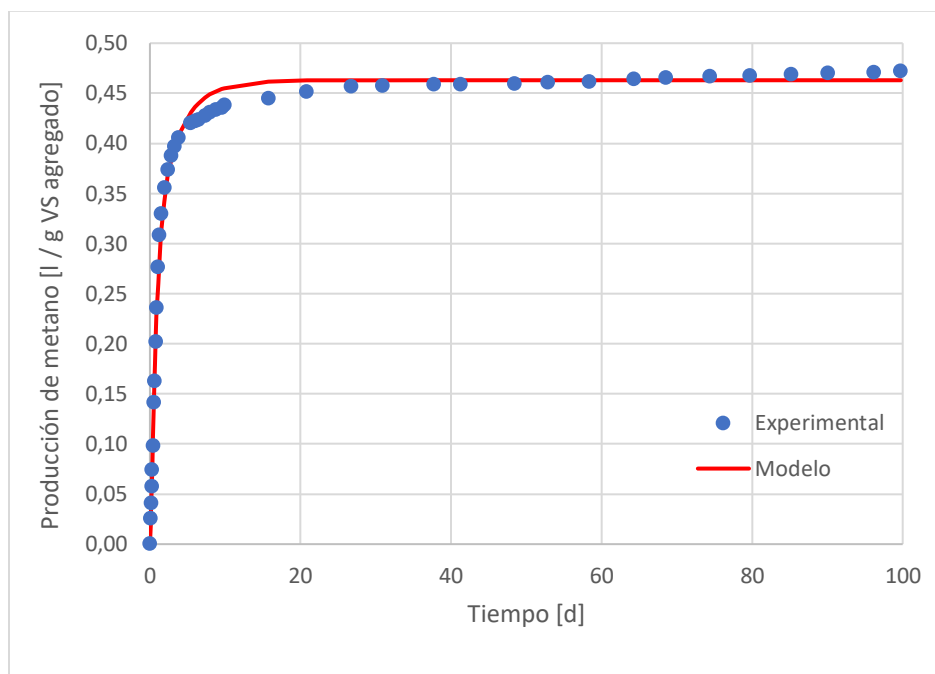


Figura 30: Comparación del modelo y datos experimentales para la producción de metano. Modelo de elaboración propia y datos experimentales tomados de [7]. Intervalo de confianza del ajuste de 3,4%.

Cabe mencionar que en la digestión anaeróbica suele no degradarse todo el sustrato porque existen compuestos orgánicos muy difíciles de degradar por los microorganismos. Existen algunos porcentajes de degradabilidad que dan cuenta de ello, a partir de experimentos. Por supuesto, este valor varía de experimento en experimentos porque las condiciones utilizadas cambian. En el experimento estudiado, el metano producido rodea los 0,45 $\left[\frac{l \text{ de metano}}{g \text{ SV de sustrato agregado}}\right]$ y no se ha

degradado todo el sustrato, este valor, entonces, corresponde a la degradación del sustrato que es degradable. Existirá también, entonces, una cota superior de metano posible de producir, que desde ahora se denominará *máxima producción de metano*. Note el lector que no es posible identificar fácilmente qué porcentaje del sustrato es degradable de forma teórica, por lo que se opta por no dividir las macromoléculas de esta forma.

En el Anexo J. Código ajuste de parámetros se encuentra el código utilizado para ajustar parámetros en Octave. En el código se utilizan las condiciones de operación del experimento y condiciones iniciales de concentración de los sustratos (alimentación) extraídas de otra fuente (ver cálculos de condiciones iniciales en Anexo K.1), pues en el experimento no se informaron.

11.1.4.4 *Método de dimensionamiento y resultados*

11.1.4.4.1 Modelo N°1

Se desea obtener el largo del reactor y el tiempo de residencia de la materia prima dentro de este. Para ello se resuelven las ecuaciones de balance de masa como ya se ha explicado en la sección anterior, utilizando los parámetros ajustados experimentalmente. Se utilizan algunas condiciones diferentes a las del experimento, pues se requiere evaluar otras situaciones. Si bien esto no es recomendable, no se cuenta con mejor información.

Se utiliza el Modelo N°1 (código en Anexo I. Código Modelo 1), que simula el reactor de digestión anaeróbica a partir de los parámetros de alimentación, reciclo, características físicas del reactor y rendimiento de metano deseado (en el Anexo L se muestra la fórmula utilizada para el rendimiento, que no es la usual), y entrega como resultados la evolución de componentes en el reactor, su volumen y tiempo de residencia, entre otros. Los resultados obtenidos son para un reactor flujo pistón, pero se adaptan para representar una sucesión de reactores batch.

Se simulan diferentes entradas de alimentación e inóculo (ver alimentaciones en Anexo K.1), y se determina el volumen y tiempo de residencia requerido para diferentes conversiones finales deseadas. Se evalúan entradas de alimentación que contienen mezclas de macromoléculas y también solo una macromolécula para entender su comportamiento individual.

Cabe mencionar que, si bien la tasa de reciclo debería mantenerse igual al del experimento, pues asegura que la concentración de microorganismos es la adecuada, se considera el caso de reducirlo a la mitad reduce porque otros experimentos no muestran cambios importantes cuando esto sucede.

Se desea que el reactor tenga un volumen aproximado de 30[l]. Algunos casos entregan mayores volúmenes, así que se evalúa también una reducción del caso base ($0,6 \left[\frac{kg}{día} \right]$) para lograr dicho volumen. Así también, se evalúa un aumento del caso base cuando corresponda. Obtenidos los resultados anteriores, se procede a determinar el volumen más apropiado para el reactor.

En Tabla 60, Tabla 61 y Tabla 62 se muestran parte de los resultados. En el Anexo K.2 se encuentran resultados completos.

Tabla 60. Resultados del Modelo 1 para diferentes alimentaciones (parte 1).

		Mezcla													
Prueba N°		1	2	3	4	5	6	5	6	7	8	9	10	11	12
Alimentación N°		1	1	2	2	2	2	8	8	8	8	12	12	12	12
Sustrato	Composición másica:														
	Carbohidratos [%org]	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59	59
	Lípidos [%org]	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16
	Proteínas [%org]	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25
	Agua [%]	76	76	76	76	76	76	55	55	55	55	90	90	90	90
	Flujo _{sustrato} $\left[\frac{kg}{d}\right]$	0,60	0,43	0,60	0,71	0,60	1,55	0,60	0,81	0,60	1,74	0,60	0,71	0,60	1,54
Inóculo (reciclo)	Proporción SV reciclo/ SV sustrato (Prop_R_S) $\left[\frac{kg\ SV\ reciclo}{kg\ SV\ sustrato}\right]$	4,00	4,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Reactor	Rendimiento [%]	95	95	95	95	85	85	95	95	85	85	95	95	85	85
Resultados	Tiempo retención materia prima [días]	6,50	6,50	6,50	6,50	3,20	3,20	6,50	6,50	3,20	3,20	6,50	6,50	3,20	3,20
	Volumen total [l]	42,07	30,00	25,27	30,00	11,60	30,00	22,10	30,00	10,34	30,00	25,43	30,00	11,70	30,00
	Flujo _{inóculo} $\left[\frac{kg}{día}\right]$	5,23	3,73	2,76	3,28	2,49	6,46	2,16	2,93	1,99	5,77	2,85	3,36	2,59	6,65
	Prop. reciclo/sustrato $\left[\frac{kg\ total}{kg\ total}\right]$	8,72	8,72	4,60	4,60	4,16	4,16	3,60	3,60	3,32	3,32	4,75	4,75	4,32	4,32

Tabla 61. Resultados del Modelo 1 para diferentes alimentaciones (parte 2).

		Carbohidratos				Proteínas				Lípidos					
Prueba N°		1	2	1	2	1	2	3	4	1	2	3	4	3	4
Alimentación N°		4	4	5	5	3	3	3	3	6	6	9	9	13	13
Sustrato	Composición másica:														
	Carbohidratos [%org]	100	100	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Lípidos [%org]	0	0	0	0	100	100	100	100	80	80	80	80	80	80
	Proteínas [%org]	0	0	100	100	0	0	0	0	20	20	20	20	20	20
	Agua [%]	76	76	76	76	76	76	76	76	76	76	55	55	90	90
	Flujo _{sustrato} $\left[\frac{kg}{d}\right]$	0,60	2,24	0,60	2,42	0,60	0,24	0,60	0,54	0,60	0,65	0,60	0,82	0,60	0,65
Inóculo (reciclo)	Proporción SV reciclo/ SV sustrato (Prop_R_S) $\left[\frac{kg\ SV\ reciclo}{kg\ SV\ sustrato}\right]$	2,00	4,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Reactor	Rendimiento [%]	95	95	95	95	95	95	85	85	85	85	85	85	85	85
Resultados	Tiempo retención materia prima [días]	2,30	2,30	2,10	2,10	9,40	9,40	6,00	6,00	5,70	5,70	5,70	5,70	5,7	5,7
	Volumen total [l]	8,02	30,00	7,45	30,00	76,60	30,00	33,25	30,00	27,61	30,00	21,99	30,00	27,49	30,00
	Flujo _{inóculo} $\left[\frac{kg}{día}\right]$	2,36	8,82	2,42	9,74	7,02	2,75	4,41	3,98	3,72	4,04	2,62	3,58	3,76	4,10
	Prop. reciclo/sustrato $\left[\frac{kg\ total}{kg\ total}\right]$	3,93	3,93	4,03	4,03	11,71	11,71	7,36	7,36	6,19	6,19	4,37	4,37	6,27	6,27

Tabla 62. Resultados del Modelo 1 para diferentes alimentaciones (parte 3).

		Lípidos					
Prueba N°		1	2	1	1	1	1
Alimentación N°		16	16	17	18	19	20
Sustrato	Composición másica:						
	Carbohidratos [%org]	0	0	0	0	0	0
	Lípidos [%org]	80	80	80	80	80	80
	Proteínas [%org]	20	20	20	20	20	20
	Agua [%]	83	83	65	95	85	80
	Flujo _{sustrato} $\left[\frac{kg}{d}\right]$	0,60	0,63	0,60	0,60	0,60	0,60
Inóculo (reciclo)	Proporción SV reciclo/ SV sustrato (Prop_R_S) $\left[\frac{kg\ SV\ reciclo}{kg\ SV\ sustrato}\right]$	2,00	4,00	2,00	2,00	2,00	2,00
Reactor	Rendimiento [%]	85	85	85	85	85	85
Resultados	Tiempo retención materia prima [días]	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7	5,7
	Volumen total [L]	28,36	30,00	25,05	24,32	28,34	28,17
	Flujo _{inóculo} $\left[\frac{kg}{día}\right]$	3,88	4,10	3,21	3,23	3,89	3,83
	Prop. reciclo/sustrato $\left[\frac{kg\ total}{kg\ total}\right]$	6,47	6,47	5,35	5,38	6,48	6,39
	Flujo volumétrico inóculo $\left[\frac{m^3}{s}\right]$	0,0040					

De los resultados se discute lo siguiente:

Para un mismo rendimiento, las proteínas son las que más rápido se degradan, luego los carbohidratos y finalmente los lípidos, tal como se esperaba, pues esto fue impuesto en el modelo a través de la relación entre las constantes cinéticas. Para corroborar, el lector compare los tiempos de residencia de Proteínas alimentación 5 prueba 1, Carbohidratos alimentación 4 prueba 1 y Lípidos alimentación 3 prueba 1.

Si se reduce el rendimiento deseada, el tiempo de residencia baja, pues se necesita menos tiempo para convertir menos metano. Por ejemplo, comparar tiempo de residencia de mezcla alimentación 8 pruebas 5 y 8; y comparar Lípidos alimentación 6.

Para un mismo rendimiento, el mayor tiempo de residencia lo tienen los lípidos. Esto implica que para un volumen de 30 [L], la masa tratada es la más reducida (comparar caso base de: Proteínas alimentación 5 prueba 2, Carbohidratos alimentación 4 prueba 2 y Lípidos alimentación 3 prueba 2). Si se mantiene constante el caso base, entonces el volumen de equipo de los lípidos es el más grande (por ejemplo, comparar los casos de Proteínas alimentación 5 prueba 1, Carbohidratos alimentación 4 prueba 1 y Lípidos alimentación 3 pruebas 1 y 3).

El tiempo de residencia se mantiene si cambia el contenido de humedad para las pruebas de mezcla. Cambiar la humedad provoca que la concentración de las macromoléculas cambie, sin embargo, se mantienen en la misma proporción así que el tiempo permanece constante. Si cambia el contenido de agua de las pruebas con alimentación unitaria de macromolécula, se espera que pase lo mismo. Se hizo esta prueba para los lípidos: se cambió la humedad y con ello la concentración inicial de lípidos, y el tiempo de residencia se mantuvo constante (comparar tiempo de residencia de Lípidos alimentación 6, 9, 13, 16, 17, 18, 19 y 20, pruebas 1).

Para un mismo rendimiento, cambiar la humedad de la alimentación cambia el tamaño del equipo si el caso base se mantiene constante o cambia el caso base si el volumen se mantiene constante. Comparar volumen del equipo de Mezcla alimentación 8 prueba 7 y alimentación 12 prueba 9, y comparar los casos base de Mezcla alimentación 8 prueba 8 y alimentación 12 prueba 10. Es difícil predecir el comportamiento de las variables con la humedad debido a las dependencias entre las variables, sin embargo, posiblemente el comportamiento se vea afectado por el reciclo de digestato, que depende de la humedad de la materia prima y su contenido de orgánicos: para un flujo de caso base fijo, solo el flujo de digestato define cómo varía el volumen del equipo o, en otros términos, el flujo de digestato define cuánta masa de sustrato se puede tratar para un volumen fijo. Para la mezcla se ve un aumento del volumen con la humedad (comparar volumen de Mezcla alimentación 8 prueba 5, alimentación 2 prueba 3 y alimentación 12 prueba 9). Esta tendencia, sin embargo, no se asume válida para el resto de las alimentaciones.

Para determinar el volumen del equipo o caso base, se toma el caso que requiere un mayor volumen o caso base. Esto ocurre con los lípidos, pues presentan el menor tiempo de residencia. En la prueba Lípidos alimentación 6 pruebas 1 y 2 se tiene que el volumen requerido para tratar el caso base supera al doble al volumen deseado o, en otros términos, con el volumen deseado solo pueden tratarse menos de la mitad (40%) del caso base original. Ninguna de estas dos consecuencias se considera aceptable. Frente a esto, se prefiere reducir el rendimiento de este caso hasta un 85%.

Considerar solo lípidos y agua como alimentación no es factible, pues para que el proceso se lleve a cabo se requiere que exista un mínimo contenido de nitrógeno, que es entregado por las proteínas. Entonces, se realizan pruebas (desde alimentación 6 en adelante) con alimentación de lípidos y proteínas, estas últimas en la mínima proporción requerida (para obtener $C:N = 30$). Se utiliza una redimimiento del 85% para hacer las pruebas de lípidos y proteínas. Cabe destacar que el peor caso estudiado presentará una redimimiento mínima de 85% y el resto de las alimentaciones presentarán un rendimiento superior.

En pruebas con alimentación de lípidos y proteínas, el peor caso se presenta con una humedad del 83% (humedades mayores e inferiores provocan volúmenes de reactor menores, o casos bases mayores y, por lo tanto, flujos de reciclo mayores) (ver Lípidos **alimentación 16** pruebas 1 y 2). Es posible tratar el caso base original en un volumen de 28,36 [L] o bien tratar un caso base mayor al original en un volumen de 30 [L]. Se prefiere la primera opción: tratar el caso base original porque es un número cerrado, sin embargo, exagerando el volumen requerido a **30 [L]** como seguridad, por los errores que pueden existir en los cálculos. El tiempo de residencia necesario es de 5,7 [días], pero se supondrá un tiempo de **6 [días]**, por la misma razón anterior, y porque es un número entero de días que facilitará la operación del equipo. Respecto al flujo de digestato, para cualquier otra alimentación, el flujo requerido debería ser menor y, por lo tanto, se podría aceptar un mayor flujo de sustrato, sin embargo, para facilitar la operación se decide fijar dichos valores. Específicamente, se fijará el volumen del digestato en **0,04 $\left[\frac{m^3}{s}\right]$** (pues es más sencillo para la operación, que medir masa) y se impondrá un caso base de **0,6 $\left[\frac{kg}{día}\right]$** (se supone ocupa siempre un mismo volumen).

Cabe mencionar que aumentar el tiempo de residencia (de 5,7 a 6 [días]) provocará que se requiera un volumen mayor al concluido en las pruebas y la reducción del reciclo debería disminuir el volumen requerido. Dado lo anterior, se deberá evaluar si los 30 [L] de volumen son suficientes.

Como se mencionó, alimentaciones diferentes a la utilizada para definir el volumen del equipo tendrán conversiones mayores al 85%. Por ejemplo, una mezcla con 76% de agua, que debería ser una alimentación usual, en un tiempo de residencia de 5,7 días debería tener una redimimiento superior al 90%. Esto puede concluirse comparando los tiempos de residencia y conversiones en los casos Mezcla alimentación 2, pruebas 3 y 4.

El siguiente paso es redefinir el volumen del reactor imponiendo los valores de caso base, flujo de reciclo y tiempo de residencia definidos en esta sección, lo que será realiza en la siguiente sección.

A continuación, se analiza de forma general el modelo.

Los resultados de tiempos de residencias son menores a los usuales reportados en la literatura para procesos industriales. Sin embargo, son valores esperables considerando la referencia de donde se obtuvieron los datos experimentales para ajustar los datos, y otros procesos a escala de laboratorio que pueden durar aproximadamente una semana. Estos últimos suelen entregar mejores resultados porque las condiciones de operación se encuentran más cercana a las óptimas. Los resultados entregados por el modelo son optimistas, considerando que las condiciones de operación podrían no lograrse completamente en el reactor.

Cabe mencionar que en el transcurso de las simulaciones se observó que los productos NH_3 y H_2S no se transferían a la fase gas, pues nunca cumplían con la concentración de saturación en la fase líquida. Por esto, se modificó la estrategia para el cálculo del transporte: se calculó el equilibrio de Henry para estas moléculas. El método se encuentra en el Anexo M, y ha sido implementado en todos los modelos, incluyendo el N°1.

De todas formas, el resultado no fue satisfactorio: para una alimentación usual, se obtiene una concentración de H_2S de 65.000 [ppm] aproximadamente, sin embargo, el rango usual es de [100; 10.000] [ppm] [41], y otras referencias reportan valores entre 1.000 [50] y 2.000 [ppm] [51], por lo que se opta por dividir la concentración de H_2S por 50 para ajustar el valor dentro del último rango mencionado; por otro lado, la concentración de NH_3 para la misma alimentación es de 10.000 [ppm] aproximadamente, encontrándose sobre el rango usual de [0; 100] [ppm], por lo tanto se opta por realizar el mismo ajuste anterior (dividir por 50). Los cambios son implementados en el Modelo N°3 corregido. El error presentado posiblemente se deba a las reacciones utilizadas: la producción de metano a partir de proteínas siempre conlleva la generación de los productos mencionados según las reacciones, sin embargo, es posible generar metano sin producir tales moléculas, de hecho, podrían nunca descomponerse porque no se encuentran expuestas directamente al medio o podrían generar productos intermedios.

Note el lector que los cambios en la estrategia de cálculo de amoníaco y ácido sulfhídrico no afectan los resultados de producción de metano ni degradación del sustrato.

El resto de los gases presenta un comportamiento normal para todas las alimentaciones evaluadas en las siguientes secciones dentro de los rangos esperados para el biogás: el metano entre [50; 80] y dióxido de carbono [15; 50] [%mol]. Además, el biogás sale saturado en agua como es lo usual, pues se ha impuesto a través de las ecuaciones que esto suceda.

El flujo total generado de biogás, considerando los cambios en los valores de NH_3 y H_2S , es concordante con la producción reportada en el experimento, que rodea los $0,45 \left[\frac{l \text{ de metano}}{g \text{ SV de sustrato agregado}} \right]$, para diferentes alimentaciones. En particular, la degradación de lípidos se observa un alza en este valor (aproximadamente $0,9 \left[\frac{l \text{ de metano}}{g \text{ SV de sustrato agregado}} \right]$), lo que es esperable, pues los lípidos generan más metano por unidad de masa que proteínas y carbohidratos.

El balance de masa global presenta un error del 2,17% (cálculo en Anexo N. Código Modelo 3), lo que se debe a no incluir el ajuste realizado para NH_3 y H_2S en la fase líquida, y errores por aproximación. El error se considera aceptable.

Los resultados de flujo de biogás y composición, junto con la corrección de las concentraciones de H_2S y NH_3 se presentan en el Modelo N° 3 corregido, los modelos anteriores no entregan información explícita sobre el biogás ni cuentan con la corrección de concentraciones.

A pesar de que el modelo se utilizó para simular condiciones diferentes a las del experimento, los resultados son coherentes con la realidad, posiblemente porque las constantes cinéticas se ajustaron para mantener relaciones proporciones entre ellas, concordantes lo esperado en la realidad.

11.1.4.4.2 Modelo N°2

Para redefinir el volumen del reactor, se asume el caso base, tiempo de residencia y flujo de digestato definido en la sección anterior, para la alimentación 16. Se utiliza el Modelo N°2, que es una adaptación del Modelo N°1, para imponer los valores mencionados.

El Modelo N°3 permite determinar si la proporción de reciclaje es suficiente para diferentes alimentaciones, como es explicado en 11.1.4.4.3 Modelo N°3. Los resultados de este modelo y del Modelo 2 para la alimentación 16 deberían ser los mismos.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de los Modelos 2 y 3, imponiendo como datos de entrada el caso base, el tiempo de residencia y flujo volumétrico de digestato.

Tabla 63. Resultados Modelos 2 y 3.

		Modelo 2	Modelo 3
Alimentación N°		16	16
Sustrato	Composición másica:		
	Carbohidratos [% _{org}]	0	0
	Lípidos [% _{org}]	80	80
	Proteínas [% _{org}]	20	20
	Agua [%]	83	83
	Flujo _{sustrato} $\left[\frac{kg}{d}\right]$	0,60	0,60
Inóculo (reciclo)	Composición:		
	Prop. molar Carbono	6,08	5,86
	Prop. molar Hidrógeno	13,18	12,77
	Prop. molar Oxígeno	3,03	2,71
	Prop. molar Nitrógeno	1	1
	Humedad [%]	95	95
	Flujo _{inóculo} $\left[\frac{m^3}{día}\right]$	0,004	0,004
Reactor	Apertura lecho [°]	45	45
	Radio lecho [cm]	7,50	7,50
	Diámetro Lecho [cm]	15,00	15,00
	Tiempo retención materia prima [días]	6	6
Resultados	Velocidad lecho $\left[\frac{mm}{s}\right]$	0,003	0,003
	Largo reactor [cm]	154,84	154,84
	Largo 1 batch [cm]	25,81	25,81
	Volumen total [l]	30,10	30,10
	Proporción SV reciclo/ SV sustrato (Prop_R_S) $\left[\frac{kg\ SV\ reciclo}{kg\ SV\ sustrato}\right]$	1,94	1,95
	Reciclo $\left[\frac{kg}{día}\right]$	3,92	3,92

De los resultados se discute lo siguiente:

Si bien los resultados del Modelo N°2 y el Modelo N°3 presentan diferencias, estas son leves, y posiblemente se deben al número de ciclos utilizados: los casos no parten desde los mismos valores de composición del reciclo, así que el número de iteraciones no es suficiente para alguno, lo que se refleja en que dichas composiciones finales difieren (ver Tabla 63).

El volumen total es diferente al concluido con el Modelo N°1, y esto se debe a que:

1. Se impuso un tiempo de residencia (6,0 [días]) mayor al obtenido en el Modelo 1 (5,7 [días]), por lo tanto, el volumen del equipo debe aumentar.
2. Se impuso un flujo volumétrico fijo del reciclo y no una relación de masas de sólidos volátiles. Se utilizó el flujo volumétrico que se obtiene luego de 50 iteraciones del Modelo 1 (al que se le ha impuesto una relación de SV), sin embargo, el Modelo 1 utiliza un flujo volumétrico distinto en cada iteración. Para replicar exactamente los resultados del Modelo 1 en los Modelos 2 y 3, el flujo volumétrico debería cambiar en cada ciclo en los Modelos 2 y 3. Esto también afecta al resultado de proporción de reciclo/sustrato (Prop_R_S).

Se utilizan los resultados de los modelos 2 y 3 para definir el volumen del reactor, pues la imposición de flujo volumétrico de reciclo y tiempo de residencia reflejan de forma más realista el reactor.

Un punto a destacar del dimensionamiento es que se impuso un caso base másico, suponiendo que la densidad era constante. Si la densidad es menor, entonces, el caso base no cabrá completo en el reactor, y si es mayor, entonces puede entrar más. Posiblemente, la operación del equipo considera un flujo volumétrico de residuos, pues es más sencillo que medir masa. Esto permitirá que solo se alimente lo que cabe en el reactor, solucionando el problema de residuos con densidad menor. Por otro lado, se alimentará una mayor masa de sustrato que el caso base si los residuos tienen una alta densidad, en este caso, el problema que podría existir es que los microorganismos no sean capaces de digerir toda la materia prima (se reduciría el rendimiento), sin embargo, esto no será un problema porque se ha exagerado el reciclo y con esto se espera que la proporción de sólidos volátiles del reciclo y la materia prima de entrada supere el valor 2, que es el mínimo requerido, así que se podría digerir más sustrato. Entonces, alimentar más sustrato que el caso base es factible. Cabe mencionar que lo único que se ve afectado si se varía el flujo másico de residuos es el flujo neto de metano generado, y no el rendimiento, ni el tiempo de residencia, ni el volumen del equipo.

En la siguiente Tabla 64 se muestra las dimensiones concluidas:

Tabla 64. Dimensiones concluidas para el reactor.

Dimensión	Valor	Unidad
Volumen	30,6	[l]
	30.600	[cm ³]
Tiempo de retención	6	[días]
Flujo de sustrato	0,6	$\left[\frac{kg}{día}\right]$
Flujo de reciclo (digestato)	0,004	$\left[\frac{m^3}{día}\right]$

No se fija el volumen obtenido porque este puede presentar errores, así que se prefiere aumentarlo por seguridad. Además, se aumenta a un valor múltiplo de 6, que son el número de días del tiempo de residencia. Ese número de días corresponderá al número de reactores batch de digestión. Así, cada reactor batch tendrá un volumen de 1/6 del valor concluido en la Tabla 64. El tiempo de retención, el flujo de sustrato y de reciclo se mantienen iguales a los valores obtenidos con el Modelo N°1.

Cabe notar que el área superficial y el largo del reactor pueden proporcionarse de cualquier manera, siempre y cuando su multiplicación de el volumen del reactor, y los resultados de concentración, redimiento, etc. no cambian. Incluso, se puede cambiar el ángulo de apertura (define la superficie que está con contacto con la fase gas) y los resultados no cambian, esto último ocurre porque el flujo de salida hacia el gas no depende del radio de apertura (esto es un error, debería depender). Por lo tanto, en las pruebas lo único que importa es el volumen, y luego se verá cuáles son los valores de área y largo, según convenga. Se debe procurar, sin embargo, que el ángulo de apertura sea grande para promover la salida de gas (en el modelo se asumió que salía sin problema, así que el diseño del equipo debe cumplir con ese supuesto agitando, exponiendo un alta área al gas, etc.)

El siguiente paso es corroborar que el reciclo es suficiente en diferentes casos de alimentaciones. Y, además, determinar las composiciones del biogás y el flujo generado, para dimensionar el adsorbedor y almacenamiento; y las composiciones del digestato para determinar su calidad.

Todos los resultados del Modelo N°2 se encuentran en el Anexo K.3.

11.1.4.4.3 Modelo N°3

Para corroborar que el reciclo es suficiente en diferentes casos de alimentaciones, se simula el proceso con el Modelo N°3 y con ello se obtiene la proporción de sólidos volátiles del reciclo y del sustrato. También, se obtiene la composición del biogás generado en cada caso, y se identifican aquellas alimentaciones que presentan flujos gaseosos máximos de los componentes, pues son relevantes para el dimensionamiento del adsorbedor. Y, además, se calculan los contaminantes químicos que posee el digestato para evaluar su toxicidad cuando se aplique en la tierra.

El código del Modelo N°3 se encuentra en el Anexo N. Código Modelo 3. La Tabla 65 y Tabla 66 presenta los resultados de este modelo:

Tabla 65. Resumen de resultados para diferentes composiciones de alimentación. Las concentraciones gaseosas de H₂S y NH₃ se encuentran en equilibrio gas-líquido (Henry) (parte 1).

		Mezcla			Lípidos			Proteínas			Carbohidratos		
Alimentación N°		2	8	12	9	13	16	5	11	15	7	10	14
Sustrato	Composición másica:												
	Carbohidratos [% _{org}]	59	59	59	0	0	0	0	0	0	87	87	87
	Lípidos [% _{org}]	16	16	16	80	80	80	0	0	0	0	0	0
	Proteínas [% _{org}]	25	25	25	20	20	20	100	100	100	13	13	13
	Agua [%]	76	55	90	55	90	83	76	55	90	76	55	90
	Flujo _{sustrato} [kg/d]	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Inóculo (reciclo)	Proporción SV reciclo/ SV sustrato (Prop_R_S) [(kg SV reciclo)/ (kg SV sustrato)]	2,88	3,43	2,93	2,78	2,04	1,93	3,02	3,67	3,09	3,08	2,72	3,15
	Humedad [%]	90,2	76,6	95,9	81,4	97,2	95,4	89,7	74,6	95,7	89,4	81,9	95,6
	Flujo _{inóculo} [kg/d]	3,84	3,62	3,93	3,70	3,95	3,92	3,83	3,58	3,93	3,83	3,70	3,93
Reactor	Tiempo retención materia prima [días]	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
	Volumen total [l]	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1

Tabla 66: Resumen de resultados para diferentes composiciones de alimentación. Las concentraciones gaseosas de H₂S y NH₃ se encuentran en equilibrio gas-líquido (Henry) (parte 2).

		Mezcla			Lípidos			Proteínas			Carbohidratos		
Alimentación N°		2	8	12	9	13	16	5	11	15	7	10	14
Salida gaseosa	FV _{gas} $\left[\frac{m^3}{s}\right]$	1,26 · 10 ⁻⁶	2,43 · 10 ⁻⁶	5,09 · 10 ⁻⁷	3,84 · 10 ⁻⁶	8,27 · 10 ⁻⁷	1,43 · 10 ⁻⁶	1,25 · 10 ⁻⁶	2,44 · 10 ⁻⁶	5,02 · 10 ⁻⁷	1,06 · 10 ⁻⁶	2,01 · 10 ⁻⁶	4,17 · 10 ⁻⁷
	Flujo molar gas $\left[\frac{mol}{s}\right]$	4,89 · 10 ⁻⁵	9,41 · 10 ⁻⁵	1,97 · 10 ⁻⁵	1,49 · 10 ⁻⁴	3,19 · 10 ⁻⁵	5,53 · 10 ⁻⁵	4,87 · 10 ⁻⁵	9,46 · 10 ⁻⁵	1,95 · 10 ⁻⁵	4,09 · 10 ⁻⁵	7,81 · 10 ⁻⁵	1,62 · 10 ⁻⁵
	H ₂ S $\left[\frac{mol}{s}\right]$	7,47 · 10 ⁻⁷	1,49 · 10 ⁻⁶	2,71 · 10 ⁻⁷	1,20 · 10 ⁻⁶	2,34 · 10 ⁻⁷	4,26 · 10 ⁻⁷	2,98 · 10 ⁻⁶	6,01 · 10 ⁻⁶	1,07 · 10 ⁻⁶	3,75 · 10 ⁻⁷	7,47 · 10 ⁻⁷	1,31 · 10 ⁻⁷
	NH ₃ $\left[\frac{mol}{s}\right]$	3,44 · 10 ⁻⁸	1,24 · 10 ⁻⁷	5,90 · 10 ⁻⁹	1,53 · 10 ⁻⁷	7,53 · 10 ⁻⁹	2,20 · 10 ⁻⁸	1,31 · 10 ⁻⁷	4,76 · 10 ⁻⁷	2,24 · 10 ⁻⁸	1,49 · 10 ⁻⁸	5,25 · 10 ⁻⁸	2,47 · 10 ⁻⁹
	H ₂ O $\left[\frac{mol}{s}\right]$	3,27 · 10 ⁻⁶	6,28 · 10 ⁻⁶	1,32 · 10 ⁻⁶	1,00 · 10 ⁻⁵	2,15 · 10 ⁻⁶	3,72 · 10 ⁻⁶	3,0 · 10 ⁻⁶	5,98 · 10 ⁻⁶	1,25 · 10 ⁻⁶	2,75 · 10 ⁻⁶	5,24 · 10 ⁻⁶	1,09 · 10 ⁻⁶
	CH ₄ $\left[\frac{mol}{s}\right]$	2,59 · 10 ⁻⁶	4,91 · 10 ⁻⁶	1,09 · 10 ⁻⁶	9,62 · 10 ⁻⁶	2,14 · 10 ⁻⁶	3,64 · 10 ⁻⁶	2,19 · 10 ⁻⁶	4,17 · 10 ⁻⁶	9,22 · 10 ⁻⁶	1,96 · 10 ⁻⁵	3,67 · 10 ⁻⁵	8,15 · 10 ⁻⁶
	CO ₂ $\left[\frac{mol}{s}\right]$	1,90 · 10 ⁻⁵	3,71 · 10 ⁻⁵	7,22 · 10 ⁻⁶	4,13 · 10 ⁻⁵	8,15 · 10 ⁻⁶	1,48 · 10 ⁻⁵	2,06 · 10 ⁻⁵	4,04 · 10 ⁻⁵	7,90 · 10 ⁻⁶	1,82 · 10 ⁻⁵	3,54 · 10 ⁻⁵	6,83 · 10 ⁻⁶
Salida Diges.	Flujo digestato $\left[\frac{kg}{d}\right]$ (sin reciclo)	0,48	0,38	0,55	0,29	0,54	0,49	0,48	0,36	0,55	0,50	0,40	0,56

A partir de los resultados se discute lo siguiente:

La proporción de SV del reciclo con el sustrato es mayor a 2, excepto con la alimentación 8 y 16, donde la primera es infactible y la segunda es el caso con el que se dimensionó el equipo (la explicación del valor obtenido se realiza en la sección Modelo N°2) y se considera aceptable el valor de la proporción. Por lo tanto, la proporción es correcta en todos los casos factibles de ocurrir.

El volumen de reactor es igual en todas las pruebas, lo que es esperable pues se impusieron los valores de la entrada (sustrato y reciclo). Recuerde el lector que, a pesar de obtener dicho valor, se asumirá un volumen de 30 [l] en la realidad.

El mayor flujo molar de H_2S y NH_3 se dan cuando se alimenta solamente proteínas (alimentación 11), lo que es esperable, pues esta molécula es la única con contenido de N y S . Sin embargo, a partir de una comparación con la realidad, se determinó que los flujos molares de H_2S y NH_3 obtenidos se encuentran exagerados, aproximadamente, unas 50 veces. Los resultados con los valores corregidos se muestran en la Tabla 67 y Tabla 68.

Para determinar los contaminantes químicos presentes en el digestato, se asume que la alimentación son hojas secas (pues presenta los más altos valores de contaminantes) y se calcula la concentración final de contaminantes en el digestato, considerando todas las masas de digestato posibles de generar (para todas las pruebas). En algunos casos no se cumple la norma, sin embargo, la alimentación de solo hojas secas no es factible por la humedad (ver sección 11.1.1 Dosificación de residuos). Si se evalúa una alimentación factible, como hojas secas y fruta, entonces se tiene que los contaminantes químicos se encuentran bajo los límites máximos permitidos, así que no es necesario restringir la alimentación de sustrato al reactor. Estos valores cambiarán cuando se corrijan los valores H_2S y NH_3 , puesto que una reducción de estos genera que exista una mayor concentración en la fase líquida.

Tabla 67. Resumen de resultados para diferentes composiciones de alimentación. Las concentraciones gaseosas de H₂S y NH₃ han sido ajustadas a antecedentes (parte 1).

		Mezcla			Lípidos			Proteínas			Carbohidratos		
Alimentación N°		2	8	12	9	13	16	5	11	15	7	10	14
Sustrato	Composición másica:												
	Carbohidratos [% _{org}]	59	59	59	0	0	0	0	0	0	87	87	87
	Lípidos [% _{org}]	16	16	16	80	80	80	0	0	0	0	0	0
	Proteínas [% _{org}]	25	25	25	20	20	20	100	100	100	13	13	13
	Agua [%]	76	55	90	55	90	83	76	55	90	76	55	90
	Flujo _{sustrato} [kg/d]	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Inóculo (reciclo)	Proporción SV reciclo/ SV sustrato (Prop_R_S) [(kg SV reciclo)/ (kg SV sustrato)]	2,88	3,43	2,93	2,78	2,04	1,93	3,02	3,67	3,09	3,08	2,72	3,15
	Humedad [%]	90,2	76,6	95,9	81,4	97,2	95,4	89,7	74,6	95,7	89,4	81,9	95,6
	Flujo _{inóculo} [kg/d]	3,84	3,62	3,93	3,70	3,95	3,92	3,83	3,58	3,93	3,83	3,70	3,93
Reactor	Tiempo retención materia prima [días]	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
	Volumen total [l]	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1

Tabla 68. Resumen de resultados para diferentes composiciones de alimentación. Las concentraciones gaseosas de H₂S y NH₃ han sido ajustadas a antecedentes (parte 2).

		Mezcla			Lípidos			Proteínas			Carbohidratos		
Alimentación N°		2	8	12	9	13	16	5	11	15	7	10	14
Salida gaseosa	Fv _{gas} [m ³ /s]	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1	30,1
	Flujo molar gas [mol/s]	1,24 · 10 ⁻⁶	2,39 · 10 ⁻⁶	5,02 · 10 ⁻⁷	3,80 · 10 ⁻⁶	8,17 · 10 ⁻⁷	1,41 · 10 ⁻⁶	1,18 · 10 ⁻⁶	2,27 · 10 ⁻⁶	4,74 · 10 ⁻⁷	1,05 · 10 ⁻⁶	1,99 · 10 ⁻⁶	4,14 · 10 ⁻⁷
	H ₂ S [mol/s]	4,82 · 10 ⁻⁵	9,26 · 10 ⁻⁵	1,95 · 10 ⁻⁵	1,48 · 10 ⁻⁴	3,17 · 10 ⁻⁵	5,49 · 10 ⁻⁵	4,56 · 10 ⁻⁵	8,82 · 10 ⁻⁵	1,84 · 10 ⁻⁵	4,06 · 10 ⁻⁵	7,73 · 10 ⁻⁵	1,61 · 10 ⁻⁵
	NH ₃ [mol/s]	1,49 · 10 ⁻⁸	2,99 · 10 ⁻⁸	5,42 · 10 ⁻⁹	2,40 · 10 ⁻⁸	4,68 · 10 ⁻⁹	8,52 · 10 ⁻⁹	5,97 · 10 ⁻⁸	1,20 · 10 ⁻⁷	2,15 · 10 ⁻⁸	7,49 · 10 ⁻⁹	1,49 · 10 ⁻⁸	2,62 · 10 ⁻⁹
	H ₂ O [mol/s]	3,27 · 10 ⁻⁶	6,28 · 10 ⁻⁶	1,32 · 10 ⁻⁶	1,00 · 10 ⁻⁵	2,15 · 10 ⁻⁶	3,72 · 10 ⁻⁶	3,09 · 10 ⁻⁶	5,98 · 10 ⁻⁶	1,25 · 10 ⁻⁶	2,75 · 10 ⁻⁶	5,24 · 10 ⁻⁶	1,09 · 10 ⁻⁶
	CH ₄ [mol/s]	2,59 · 10 ⁻⁵	4,91 · 10 ⁻⁵	1,09 · 10 ⁻⁵	9,62 · 10 ⁻⁵	2,14 · 10 ⁻⁵	3,64 · 10 ⁻⁵	2,19 · 10 ⁻⁵	4,17 · 10 ⁻⁵	9,22 · 10 ⁻⁶	1,96 · 10 ⁻⁵	3,67 · 10 ⁻⁵	8,15 · 10 ⁻⁶
	CO ₂ [mol/s]	1,90 · 10 ⁻⁵	3,71 · 10 ⁻⁵	7,22 · 10 ⁻⁶	4,13 · 10 ⁻⁵	8,15 · 10 ⁻⁶	1,4 · 10 ⁻⁵	2,06 · 10 ⁻⁵	4,04 · 10 ⁻⁵	7,90 · 10 ⁻⁶	1,82 · 10 ⁻⁵	3,54 · 10 ⁻⁵	6,83 · 10 ⁻⁶
Salida Diges.	Flujo _{digestato} [kg/d] (sin recicló)	0,49	0,38	0,56	0,29	0,54	0,49	0,49	0,38	0,56	0,50	0,41	0,56

La corrección de las concentraciones de NH_3 y H_2S provoca que el flujo molar total de gas se reduzca, y esto afecta las fracciones molares del resto de los componentes del gas. En particular los valores del vapor de agua cambian y no presentan todos el mismo valor de fracción molar como antes, con los datos originales. Esto se debe a que, al cambiar el flujo molar de gases, debería cambiar el agua que se evapora (siempre es un 7% del flujo molar total), pero este valor no se reajustó, por lo que se presentan leves variaciones entre un caso y otro. Además, las concentraciones de contaminantes químicos cambian con las modificaciones de los flujos volumétricos, sin embargo, se mantiene la conclusión realizada con anterioridad sobre estos.

Finalmente, las dimensiones finales del reactor son las mostradas en la Tabla 64.

Para cerrar este capítulo, se debe mencionar que el equipo se encuentra subestimado. Por un lado, el tiempo de residencia podría estar subestimado, considerando los valores usuales; y por otro lado, el volumen está exagerado para la mayoría de las alimentaciones porque fue determinado a partir del residuo con peor cinética. Sin embargo, se considera más importante el efecto del tiempo de residencia porque posiblemente no se puedan lograr las condiciones del experimento y, de lograrse, no se puede asegurar que en cada parte del reactor ocurren de la misma forma.

Los resultados completos del Modelo N°3 y Modelo N°3 corregido se presentan en el Anexo K.4

11.1.5 Adsorción

El objetivo del equipo de adsorción es remover los componentes indeseados del biogás, como el H_2O , NH_3 y H_2S . Se dimensiona la masa de adsorbente necesaria para separar las especies mencionadas del biogás y, con ello, el volumen del equipo.

Primero se parte definiendo qué especies deben ser removidas y, posteriormente, se calcula la masa de adsorbente a partir de una ecuación de dimensionamiento y el volumen.

11.1.5.1 Determinación de especies a remover

Para definir qué compuestos remover, se estudia la norma de regulación de emisión de estos compuestos.

Según el Decreto 119, solo el ácido sulfhídrico debe ser removido del biogás: debe encontrarse en una concentración menor o igual a 200 [ppm] [52].

El NH_3 no se encuentra regulado, pero este componente será combustionado generando NO_x , así que podría utilizarse las normas de emisión de este último. Sin embargo, tampoco existe norma para emisión de NO_x para aparatos de combustión domiciliaria, por lo que se utilizará la norma estadounidense para aparatos domiciliarios de combustión, que establece una cota superior de $86 \left[\frac{ng \text{ de } NO_x}{J} \right]$.

Para definir cuánto remover, se considera el peor caso, es decir, los mayores flujos de NH_3 y H_2S generados. La alimentación 11 maximiza ambos flujos, así que se utiliza como referencia. En la Tabla 67 del Modelo N°3 corregido se especifican las concentraciones de dichos compuestos en el biogás.

Con la información anterior se determina que se debe remover un 84,44% del ácido sulfhídrico presente en el biogás a la salida del digestor, y que no es necesario remover el amoníaco.

Por otro lado, no es necesario reducir el contenido de agua, según la norma. Si bien es conveniente que no exista agua en el biogás, su presencia no es crítica, así que se prefiere no remover agua con el proceso de adsorción. Posiblemente de todas formas el agua se adsorberá porque este compuesto ingresará a la etapa. Además, condensará en el almacenamiento de biogás, lo que aportará a reducir su contenido en el gas.

Como se menciona más adelante, se utilizará carbón activado para remover H_2S . El NH_3 tiene poca afinidad con este material en comparación con el ácido, así que se asume que no se adsorbe. Por otro lado, el agua puede ser adsorbida, lo que favorece la adsorción de H_2S en el carbón. En el peor de los casos, el agua no se adsorbe y queda en el biogás.

11.1.5.2 Cálculo de masa de adsorbente y volumen del equipo

Un equipo de adsorción puede ser dimensionado de manera sencilla considerando la masa de adsorbente necesaria para separar una especie gaseosa de otras. Si bien el grado de separación dependerá de la afinidad de cada componente gaseoso con el sólido adsorbente y de la cinética de adsorción, es posible estimar el tamaño de la columna de adsorción y la masa de adsorbente asumiendo una separación rápida.

La mayoría de las columnas de adsorción funcionan con ciclos de carga y descarga, en que las especies se adsorben y desorben, respectivamente. Estos ciclos duran comúnmente 5 a 60 [min] (columnas de adsorción por cambio de presión, PSA) o 60 a 200 [min] (columnas de adsorción por cambio de temperatura, TSA). En tales ciclos el adsorbente se regenera parcialmente. En la carga, los adsorbentes también son utilizados parcialmente, es decir, solo una fracción (f_L) llega a completar la carga completa teórica (m_1). Solo en casos en que el perfil de adsorción es muy abrupto es posible completar la carga teórica. Regularmente, f_L toma el valor 0,7 [46].

Cuando una planta es dimensionada desde cero, se puede utilizar la Ecuación (59) para determinar la masa de adsorbente necesario (M_a) [45] [46]. Para entender la ecuación, considere el lector el esquema del equipo de adsorción presentado en la Figura 31.

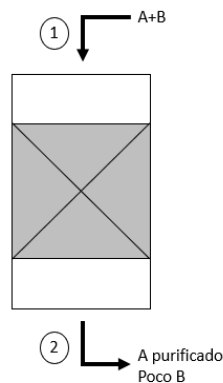


Figura 31: Esquema equipo de adsorción. El ingreso está indicado por el número 1 y la salida por el número 2. Las especies A y B ingresan, y sale A principalmente. Elaboración propia.

$$(F_1 \cdot y_1 - F_2 \cdot y_2) \cdot M_w \cdot t_a = (m_1 - m_2) \cdot M_a \cdot f_L \quad (59)$$

Donde:

F_1 = Flujo molar total en la entrada, $\left[\frac{mol}{s}\right]$.

F_2 = Flujo molar total en la salida, $\left[\frac{mol}{s}\right]$.

y_1 = Fracción molar de B en la entrada.

y_2 = Fracción molar de B en la salida.

M_w = Masa molar de B, $\left[\frac{kg}{mol}\right]$.

t_a = Tiempo de uso del adsorbente en el lecho, [s].

m_1 = Carga máxima de B en el adsorbente, $\left[\frac{kg\ de\ B}{kg\ de\ adsorbente}\right]$.

m_2 = Carga mínima de B en el adsorbente, $\left[\frac{kg\ de\ B}{kg\ de\ adsorbente}\right]$.

M_{ads} = Masa de adsorbente en el lecho, [kg].

f_L = Fracción del lecho que está completamente cargada al final del ciclo.

Entonces, para determinar la masa de adsorbente requerida para remover biogás, se definen los parámetros de la ecuación para concluir M_a , y se asume que el adsorbente es carbón activado; otros materiales como el carbón vegetal se descartan porque su adsorción es baja y se requeriría una masa exagerada respecto al tamaño del equipo (los cálculos no se incluyen).

Los valores de F_1, F_2, y_1 y y_2 se encuentran definidos por los resultados de la simulación de la alimentación 11 y el porcentaje de remoción requerido, calculado en la sección anterior. El valor de M_w es un dato conocido. Se define como tiempo de uso de adsorbente de un año, así solo deberá cambiarse el adsorbente una vez al año. La carga mínima se asume cero, mientras que la máxima corresponde a $0,104 \left[\frac{kg\ de\ B}{kg\ de\ adsorbente\ seco}\right]$ para el adsorbente carbón activado [53]. Y f_L toma el valor usual de 0,7.

Finalmente, se obtiene que $M_a = 1,50$ [kg].

Una vez obtenido el valor de M_a , es posible obtener el volumen del lecho con la densidad aparente (ρ_{ap}) del adsorbente:

$$V_a = \frac{M_a}{\rho_{ap}} \quad (60)$$

$$V_a = 4,9864 \cdot 10^{-3} [m^3] \quad (61)$$

El volumen del equipo suele ser mayor a V_a . El volumen del lecho corresponde a un 80% del volumen del equipo, dejando espacios de ingreso y salida para homogeneizar el flujo de gases:

$$V_{ads} = \frac{V_a}{0,8} \quad (62)$$

$$V_{ads} = 0,0062 [m^3] \quad (63)$$

Las dimensiones exactas del equipo dependerán de la forma en que se configure. Usualmente, se asume que es un cilindro, cuyo lado (L_{cil}) y diámetro (D_{cil}) tienen una proporción 3: 1 o mayor, para aprovechar todo el lecho. En dicho caso:

$$L_{cil} = 0,42 [m] \quad (64)$$

$$D_{cil} = 0,138 [m] \quad (65)$$

El valor obtenido es razonable, comparando V_{eq} con el volumen estimado de un equipo de adsorción de otros sistemas de digestión anaeróbica, Homebiogas. Este último presenta un volumen del adsorbedor de $0,007 [m^3]$ aproximadamente y trata alrededor del doble o triple flujo de entrada de alimentación [54]. Así, posiblemente el tamaño estimado del adsorbedor se encuentre sobre estimado.

Los cálculos detallados de este dimensionamiento se presentan en el Anexo O.

11.1.6 Almacenamiento de biogás

El almacenamiento queda dimensionado con su volumen.

Luego de la adsorción, el biogás se acumula en el almacenamiento. Si la temperatura baja, el agua condensará y se acumulará en el fondo del equipo. Así, también se determina el volumen de agua líquida que debe ser purgado.

Se definen, entonces, el volumen del almacenamiento y el volumen de acumulación de agua. Además, dichos resultados se evalúan para una alimentación de residuos al equipo que podría ser la habitual.

11.1.6.1 Cálculo de almacenamiento de biogás y agua

Para determinar el volumen de almacenamiento exclusivamente gaseoso, se considera el mayor flujo de gas que puede ser generado (esto ocurre con la alimentación 9) y que el agua no se condensa.

El volumen queda determinado por el flujo gaseoso que ingresa y el tiempo máximo que se encontrará almacenado, y el factor de uso (volumen ocupado por el biogás/volumen del equipo):

$$V_{almbiogas} = \frac{(F_{v_biogas} \cdot t_{almbiogas})}{f_{almbiogas}} \quad (66)$$

Se utilizó $f_{almbiogas} = 80\%$. Se tomaron valores arbitrarios de $t_{almbiogas}$, y se concluyó que la mejor relación posible entre volumen y tiempo es la que se muestra en la Tabla 69. Se consideró que un tiempo menor 2 [días] era un rango muy reducido, y con este valor el volumen sería de $0,8 [m^3]$, aprox. Con esto, se optó por aumentar el volumen a $1 [m^3]$, pues es un número cerrado y no mucho mayor al volumen anterior. Además, con estos valores, la alimentación para el biogás generado con una alimentación de residuos usual es aceptable.

Para determinar el volumen de agua máximo que se acumula, se considera que toda el agua contenida en el biogás se condensa y se utiliza el flujo de biogás con mayor contenido de agua, que justamente corresponde también a la alimentación 11. Para determinar el volumen a purgar se utiliza la siguiente fórmula:

$$V_{almagua} = Fv_{biogas} \cdot t_{almagua} \quad (67)$$

Se toma un tiempo arbitrario de acumulación de 30 [días], con lo que se obtiene un volumen de agua a purgar de $4,70 \cdot 10^{-4} [m^3]$ o $0,47 [l]$. Este volumen podría ser adaptado dentro del almacenamiento de biogás para hacerlo apto para acumular agua líquida. Los resultados se muestran en la Tabla 69.

Tabla 69. Valores de dimensionamiento para almacenamiento de biogás.

Variable	Valor	Unidad
$t_{almbiogas}$	2,75	[días]
$V_{almbiogas}$	1,00	$[m^3]$
$t_{almbioagua}$	30,00	[días]
$V_{almbioagua}$	$4,70 \cdot 10^{-4}$	$[m^3]$

Cabe mencionar que lo más probable es que la temperatura del biogás baje, pues se perderá calor al ambiente, así que el agua se condensará hasta lograrse el nuevo equilibrio líquido-gas. En días muy calurosos ($40^{\circ}C$), el agua no se condensará y el biogás se encontrará saturado con agua. En este caso, la combustión no debería verse tan afectada; tendría las características de una combustión un día de lluvia (el ambiente se encuentra saturado con agua).

11.1.6.2 Caso: una alimentación común

A continuación, se determina cuánto tiempo puede acumularse biogás proveniente de la digestión de una alimentación usual de residuos (alimentación 2) y el agua líquida acumulada. Los resultados de este cálculo también fueron usados para determinar si el volumen del almacenamiento era adecuado.

De la Ecuación (66) se despeja $t_{almbiogas}$, considerando el flujo de biogás F_{v_biogas} proveniente de la digestión de la alimentación 2. Se obtiene un tiempo de $8,4 [días]$, valor que se considera algo exagerado, pues podría ser poco probable que en alguna vivienda se deje de cocinar por más de una semana en condiciones normales. Una excepción a esto podrían ser los viajes, pero este es un evento más bien aislado, además, no se estará alimentado el digestor así que el flujo de biogás es reducido; en este caso una solución podría ser dejar de alimentar el reactor unos días antes del viaje, por ejemplo, para evitar la generación de biogás cuando las personas no estén presentes.

Suponiendo que el biogás se encuentra a $25^{\circ}C$ y el agua se encuentra en equilibrio, se obtiene que el tiempo que el biogás puede almacenarse es $9,2 [días]$, y se obtiene que el agua acumulada es $8,42 \cdot 10^{-5} [m^3]$ o $0,085 [l]$, un 18% del volumen original.

Finalmente, se concluye que el almacenamiento se encuentra sobreestimado para las alimentaciones normales al proceso, pero algo reducido para otros tipos de alimentación. Dado que las alimentaciones normales son las más frecuentes, se concluye que el equipo está sobreestimado. Cabe mencionar que, si se asegurara que las personas utilizarán el biogás cada día, el volumen del almacenamiento podría ser reducido, pero no se tiene certeza sobre lo anterior, así que se prefiere exagerar el tiempo de acumulación.

Los cálculos detallados del dimensionamiento del almacenamiento de biogás se presentan en Anexo P.

11.1.7 Combustión

Después de su producción y purificación, el biogás está listo para ser utilizado. El uso del biogás, una combustión, será realizada en una cocinilla para biogás asociada al equipo. Se ha descartado el acople a una red residencial de gas natural, por ejemplo, por dos razones: (i) la instalación requeriría una certificación de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) y (ii) en capítulos anteriores (ver 6.2.4 Selección de producto y proceso) se ha definido que el equipo podrá ser utilizado en contextos de escasez, donde no existe conexión a red de gas alguna.

Sobre la certificación de la SEC, entonces, no sería necesaria para la instalación, pero sí para el uso del equipo una vez construido. Este aspecto deberá atenderse después de construir el equipo.

La combustión, como se mencionó, se realizará en una cocinilla asociada al equipo. Este equipo será definido en etapas futuras de este proyecto (ingeniería de detalles) para centrar la atención del diseño en las etapas de producción del biogás, foco principal de este trabajo.

11.1.8 Inspección y separación

El digestato producido debe ser revisado para detectar la presencia de componentes indeseados, como plásticos no separados en las etapas iniciales del proceso, y, posteriormente, se deben separar dichos componentes del digestato.

Las etapas de inspección y separación no serán dimensionadas en este proyecto, debido a que corresponde a una etapa secundaria en el proceso, y se propone definirla en una etapa más avanzada de este proyecto (ingeniería de detalles). Además, cabe destacar que la probabilidad de que existan materiales indeseados en el digestato es baja, puesto que es un sistema a pequeña escala, como se ha explicado en la sección 8.3 Reflexiones Finales sobre el Estado del Arte.

11.1.9 Almacenamiento digestato

Al igual que para el almacenamiento de biogás, el almacenamiento de digestato queda dimensionado con su volumen.

Se calcula el volumen para el peor de los casos, es decir, para el mayor flujo volumétrico de digestato producido, que corresponde al proveniente de la digestión de la alimentación 14. En el Modelo N°3 corregido se encuentran calculados los flujos volumétricos de digestato.

Para dimensionar, se utiliza el valor del flujo volumétrico mencionado (Fv_{dig}), el tiempo de almacenamiento (t_{almdig}) y un factor de ocupación del biogás en el equipo ($f_{almbiogas}$), según la Ecuación (68). Se impone un tiempo máximo de almacenamiento de 4 [días], pues esto permitiría que la limpieza solo se realice 2 veces a la semana aproximadamente. Si la limpieza se realizara una vez a la semana, el volumen del almacenamiento crecería el doble y, junto con ello, la masa del digestato a remover, que sería difícil de trasladar por una persona.

Se obtiene un volumen de $2,5 \cdot 10^{-3} [m^3]$ o 2,5 [l]. Este valor se encuentra sobreestimado para las alimentaciones usuales.

$$V_{almdig} = \frac{Fv_{dig} \cdot t_{almdig}}{f_{almbiogas}} \quad (68)$$

Los cálculos detallados del dimensionamiento del almacenamiento de digestato se presenta en Anexo Q.

11.2 CARACTERÍSTICAS DEL BIOGÁS OBTENIDO

Si bien la composición del biogás cambiará conforme sean modificada la alimentación, es posible estimar la salida del equipo considerando una entrada común. Esta sección busca estimar las características del gas de salida del sistema dimensionado y comparar con otros diseños de pequeña escala disponibles en la literatura.

Se toma como referencia la Alimentación 2, considerada una composición común de acuerdo con los resultados de la encuesta a usuarios.

Se obtiene un flujo generado de biogás de $98 \left[\frac{1}{\text{día}} \right]$, cuya composición para la alimentación de referencia se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 70. Composición del gas de salida para una alimentación común.

Propiedad	Componente del biogás				
	H_2S	NH_3	H_2O	CH_4	CO_2
% v	0,00	0,00	3,13	55,93	40,94
Concentración $\left[\frac{mol}{m^3} \right]$	0,00	0,00	1,28	22,85	16,72

La estimación anterior de la composición de salida gaseosa es comparada con otros sistemas poniendo atención en parámetros energéticos, a saber, el poder calorífico inferior (PCI) y el rendimiento promedio de biogás.

Tabla 71. Comparación de rendimiento y poder calorífico con otros sistemas.

Propiedad	Sistemas			
	Este proyecto	Otros sistemas	Diferencia	Referencia
Rendimiento promedio de biogás $\left[\frac{m^3}{kg \text{ materia prima}} \right]$	0,163	0,144	13,4%	[42]
PCI $\left[\frac{MJ}{m^3} \right]$	18,33	22,00	16,7%	[42]

El tiempo aproximado de consumo del biogás generado en un día es $30 [min]$.

En el Anexo R se muestran los cálculos de las características del biogás generado y los cálculos asociados.

11.3 REFLEXIONES FINALES SOBRE EL DIMENSIONAMIENTO

En este capítulo se dimensionaron la conminución, almacenamiento y mezcla de residuos, digestión anaeróbica, adsorción, almacenamiento de biogás y almacenamiento de digestato.

Se destaca el método de dimensionamiento del reactor a través del modelamiento de las transformaciones que, si bien simplifica mucho la realidad, permitió flexibilidad para determinar el volumen del reactor, sensibilizando el valor de diferentes variables. Además, los modelos permitieron entender en profundidad los supuestos y condiciones que se asumen en las ecuaciones y en los datos, información que se desconoce cuando se utilizan ecuaciones de diseño usuales.

Todas las dimensiones calculadas se encuentran sobreestimadas, excepto la del reactor de digestión. En neto, el dimensionamiento del proceso se encuentra sobreestimado.

Considerando los volúmenes de los almacenamientos, el reactor y la adsorción, el reactor tendría un volumen total de $1,04 [m^3]$. Cabe mencionar que $1 [m^3]$ corresponde al almacenamiento de biogás; este valor podría disminuir considerablemente si se garantizara que las personas cocinan todos los días.

Para determinar el caso base se consideró que el volumen interno del equipo sería de $0,03 [m^3]$, sin tener claridad de las dimensiones de las partes del equipo. El volumen supuesto en ese entonces ha crecido considerablemente debido al almacenamiento. Se mantendrán estas dimensiones, pues son necesarias para que el proceso sea factible, teniendo claro, sin embargo, que está sobreestimado. En este punto cabe preguntarse si un equipo de las dimensiones concluidas cumple con uno de los objetivos del trabajo: que pueda ser implementado en cualquier vivienda. Esto último, sin embargo, no se puede deducir de inmediato, pues la forma del equipo puede ser bien adaptada a la vivienda.

Capítulo 12

DISEÑO

En el Capítulo 10 Operaciones Unitarias y Límite de Batería se han definido las operaciones que debe realizar el equipo; y en el Capítulo 11 Dimensionamiento, las dimensiones de las diferentes partes (desde ahora, *componentes*) que permiten realizar dichas operaciones. En el Diseño se resuelve cómo llevar a cabo las operaciones, considerando las formas y posiciones de los equipos componentes. Esta es una actividad enlazada con la etapa de ingeniería básica de un proyecto.

Por ejemplo, se han definido las operaciones de almacenamiento y mezcla. Ambas ocurrirán en un componente, y ya se ha determinado su volumen. Cabe preguntarse, entonces, ¿cuál es la forma más apropiada del almacenamiento? y ¿cómo agitar los residuos para lograr una buena mezcla?, además, ¿cómo transportar la alimentación de este equipo componente al siguiente (reactor de digestión anaeróbica) de forma manual procurando que no se liberen olores?, entre otras.

En este capítulo se diseñan las partes del equipo, procurando cumplir con los supuestos tomados en el dimensionamiento y que, en su conjunto, configuren un equipo que cumpla con las características mínimas según la Idealidad tolerable establecida en el Capítulo 4 Características del Equipo. Sumado a lo anterior, se determinan las medidas para cumplir los requerimientos térmicos del proceso.

Se comienza este capítulo recordando las características mínimas que debe cubrir el diseño, luego se explican las ideas centrales que ordenan los componentes del equipo de forma general, se realiza el diseño de los componentes y las medidas para los requerimientos térmicos, y finalmente se presentan los planos del equipo.

12.1 CARACTERÍSTICAS MÍNIMAS DEL EQUIPO

En la Tabla 72 se muestran las características que debe tener el equipo y su operación para que sea considerada una buena solución. Esta tabla se ha confeccionado a partir de la sección 4.3 Idealidad Tolerable.

Además, el diseño deberá integrar los Principios de Hannover siempre que sea posible, y proceder a partir de la estrategia definida. Se recuerda al lector que la estrategia corresponde a: crear tecnologías que se adapten a las personas, esto es, que la operación sea agradable y sencilla para ellas; y a utilizar la energía proveniente del esfuerzo humano, única Energía Renovable No Convencional disponible en las viviendas más restringidas.

Tabla 72: Resumen de las características del equipo.

N°	Característica del equipo
1.	Es atractivo visualmente.
2.	Emite al menos una sustancia positiva al ambiente.
3.	Es seguro para animales y personas.
4.	No daña pisos ni otros objetos.
5.	Debe tener un tamaño reducido.
6.	Utiliza solo energía proveniente de la actividad física humana.
7.	La operación es realizada por las personas.
8.	La operación es sencilla.
9.	La operación puede requerir otras materias primas.
10.	La operación puede costar hasta \$1.000 [CLP] al mes.
11.	La operación toma máximo 10 [min] al día.
12.	No se requiere transporte de residuos.
13.	No se emiten olores.
14.	Las personas no se contactan con los residuos ni los perciben.
15.	Se genera el mínimo de emisiones negativas.

12.2 IDEAS CENTRALES

En las siguientes secciones se explican las ideas centrales que sostienen el diseño del equipo. Sobre esta base, luego, se procede a diseñar cada componente.

12.2.1 Idea central n°1 sobre la operación del reactor

Se ha definido que el reactor de digestión anaeróbica sea un reactor flujo pistón o una sucesión de reactores batch. Para decidir qué reactor es más apropiado en el caso de este trabajo, se invita al lector a imaginar el funcionamiento de un PFR y de un reactor batch:

La característica principal de un reactor PFR es que la alimentación ingresa y avanza a lo largo del reactor de forma continua. Cuando la mezcla reactante llega al final del reactor, ha transcurrido un tiempo suficiente para que la transformación se haya completado (tiempo de residencia). En el presente caso de estudio, el tiempo de residencia es de 6 días.

Se debe notar que la alimentación no será continua, sino que discreta: las personas eliminan residuos cada cierto tiempo durante el día, podría ser una vez o muchas veces. De esta manera, para que la alimentación ingrese continuamente, se requeriría un almacenamiento de residuos que libere constantemente la alimentación al reactor. Otra alternativa es alimentar el reactor de forma discreta, simplemente, pero esto provocaría que dentro del reactor existan espacios vacíos debido al avance de la materia prima (como depositar residuos en una cinta transportadora que no se detiene). En tal caso, sin embargo, el reactor sería más largo de lo necesario. Posiblemente el problema más importante sea la mantención de una velocidad constante de avance de los residuos. Una solución para simplificar el avance es hacerlo discreto, dividiendo también el reactor PFR, que estaría compuesto por varios compartimientos que se llenan al final de un día: se llena el compartimiento 1 el día 1; el día 2, la alimentación del compartimiento 1 se traslada al compartimiento 2 y una nueva alimentación puede llenar el compartimiento 1; y así sucesivamente hasta que la alimentación llegue al compartimiento 6; el día 7, el digestato saldrá del sistema. Se ha

configurado así, un reactor flujo pistón discreto. Si se piensa con cuidado, no es realmente necesario que la alimentación se mueva, basta con que permanezca en un compartimiento por 6 días, y los nuevos lotes de alimentación llenen otros compartimientos respectivos. Note el lector que esta última idea corresponde a un conjunto de reactores batch desfasados en el tiempo.

Otro problema adicional en el PFR es que se debe hacer realidad (mediante el diseño) el supuesto de homogeneidad en el eje radial, que puede ser logrado mediante flujos turbulentos, difíciles de provocar por la velocidad requerida y las características del sustrato (es semisólido). En cambio, en cada reactor batch se requeriría mezcla axial y radial, que puede ser realizada con agitación de variados tipos. Seguramente, alguna de estas últimas alternativas resultaría más sencilla de imponer.

Es importante destacar que, suponiendo condiciones óptimas de operación, el biogás generado en ambos tipos de reactor es el mismo: las diferencias en el flujo producido y su composición deberían ser mínimas.

Finalmente, sobre el uso del equipo, un evento de operación por día es adecuada para los hábitos de las personas, tomando en cuenta sus ciclos diarios.

Considerando todo lo anterior, se decide que el reactor de digestión corresponda a un conjunto de 6 reactores batch en paralelo, desfasados en el tiempo. Esta es la idea más importante del diseño.

12.2.2 Idea central n°2 sobre las pérdidas de calor

En el dimensionamiento del reactor de digestión anaeróbica no se consideró el balance de energía por su complejidad, ligada especialmente a la red de reacciones químicas y bioquímicas. De todas formas, la transferencia de calor debe ser estudiada en el equipo para cumplir con la condición de temperatura supuesta en dicho dimensionamiento, que es asumir que la temperatura se encuentra en el rango mesofílico y, con mayor precisión, cerca de $36[^\circ\text{C}]$, temperatura a la que se realizó el experimento utilizado como base del dimensionamiento.

El proceso de digestión anaeróbica es exotérmico, pero no se cuenta con información del calor generado. En general, las pérdidas de calor de los reactores de digestión anaeróbica hacia el ambiente son muy importantes y se suelen implementar alternativas de aislamiento y calentamiento. Con esto, se deduce que la generación de calor tiene una magnitud mucho menor a las pérdidas en los equipos reales. Por esta razón, se simplificará el proceso asumiendo que no genera calor y se estudiarán solo las pérdidas de calor del reactor hacia el ambiente. Lo anterior provoca que la temperatura final del reactor sea subestimada; y las medidas para regular la temperatura puedan ser exageradas.

Las medidas para cumplir con los requerimientos térmicos corresponden a aislación y calentamiento del reactor. La única fuente de calor disponible es la propia combustión de los gases producto de la digestión. Los gases de combustión, en consecuencia, serán recolectados y aprovechados como fluido térmico en un intercambiador de calor. Existen otras alternativas para calentar, además de un fluido caliente, como fuego directo o radiación, pero no se cuenta con tales formas de energía; también, podría utilizarse un sólido calefaccionado (con los gases de combustión), y ese sólido podría contactarse con la alimentación, pero esto reduce la eficiencia en la transferencia de calor.

El fluido dentro del reactor puede ser calentado directamente con el intercambiador de calor, o bien puede calentarse la alimentación que ingresará al reactor. Para determinar la mejor opción se debe tener presente lo siguiente en consideración:

El calentamiento solo puede ser realizado unos minutos al día, aquellos en que las personas cocinen. Si se opta por aumentar la temperatura de la alimentación, el tiempo sin calefacción corresponderá a tiempo de pérdida de calor hacia el ambiente, es decir, se estará desaprovechando parte del calor absorbido. Una ventaja de esta alternativa es que no existen alzas de temperatura abruptas en el interior del reactor, que comprometerían la sobrevivencia de los microorganismos. Si esta alza de temperatura se da antes del reactor, en la materia prima, no existe tal efecto negativo.

Por otro lado, si se calentara directamente el reactor, si bien también se perdería energía, en todo momento se estaría aprovechando. Sin embargo, una desventaja es que, si solo existe un intercambiador para los 6 reactores en paralelo, habrá unos más calientes que otros según el sentido se avance del gas por los reactores, que se asume en serie, pues el flujo paralelo resulta muy difícil de imponer, especialmente a los gases, por las pérdidas de carga. Para resolver este problema se podría tener un intercambiador para cada reactor, pero esto aumentaría el tamaño del equipo y complejizaría su operación, porque el usuario tendría que cambiar o bloquear la entrada de gases a los reactores, según se requiera. Independiente del número de intercambiadores, existirán alzas de temperatura abruptas en los reactores. Esto último, sin embargo, se evita si el reactor se calienta con un sólido que acumule calor y que transfiera lentamente el calor al líquido, como ocurre con las piedras, sin embargo, la acumulación de energía corresponde a una operación más y la selección de material es compleja, así que se opta por no utilizar esta solución dado el tiempo disponible para diseñar el equipo.

Siguiendo la lógica de diseño de TRIZ, lo que se desea en este caso es: calentar el reactor, aprovechar siempre la energía, que no existan cambios abruptos de temperatura y una operación sencilla. Tomando lo ventajoso de ambas alternativas, se tiene que el intercambiador debería calentar solo la alimentación, y que el calor perdido sea absorbido por los reactores. Para ello, la alimentación debería encontrarse rodeada de reactores, además, esto provocaría que la alimentación pierda menos calor por encontrarse dentro de un espacio con una temperatura más alta que la ambiental.

Así, se decide que el intercambiador de calor aumente la temperatura del depósito de alimentación y que este, a su vez, se encuentre en el centro del equipo, rodeado de los reactores. El costo de esta solución es un nuevo requisito: el depósito de alimentación debe ser aislado.

12.2.3 Idea central n°3 sobre el tamaño y la instalación

El tamaño del equipo es más grande de lo previsto en el 5.2 Caso Base. Posiblemente no sea sencillo instalarlo en una vivienda pequeña, a menos que su forma sea muy adaptable. Con ese objetivo, se propone dividir al equipo en dos secciones de forma tal que puedan ubicarse en lugares diferentes, sin que ello complejice la operación.

Los componentes principales del equipo son: Depósito de alimentación, Reactor, Depósito de biogás y Cocina; la ubicación del resto de los componentes no es crítica. Se decide dividir al equipo en: Cocina-Depósito de alimentación-Reactor (sección 1) y Depósito de biogás (sección 2) por las razones expuestas a continuación.

La sección 1 tiene una configuración conveniente porque permite que la conexión de gases de combustión entre la Cocina y el Depósito se encuentre cercana, y que la alimentación pueda ingresar al reactor sin ningún transporte. Además, se hace factible ubicar el depósito entre los reactores.

La sección 2, al tener un gran volumen, posiblemente sea instalada en un patio o terraza, de existir. En cambio, es más fácil que la sección 1 se encuentre dentro de la vivienda, aunque también es posible que sea ubicada fuera de ella. Si se encuentra dentro de la vivienda, las pérdidas de calor se reducen porque no existe viento, y la temperatura no baja significativamente por la noche; si se encuentra fuera de ella, se puede aprovechar el almacenamiento para bloquear las corrientes de viento y otorgar un ambiente más caliente al reactor que la intemperie, y así reducir las pérdidas de calor.

Entonces, las secciones 1 y 2 pueden ser instaladas en distintos lugares, sin embargo, si la sección 1 es instalada en el exterior de la vivienda, debe hacerse junto al almacenamiento (sección 2).

Definidas las dos secciones, se decide que el Depósito de digestato se encuentren en la sección 1 por la cercanía con el reactor, pues es lugar donde el digestato se genera. De encontrarse en la sección 2, el digestato tendría que trasladarse y, posiblemente, se requeriría de un ducto extra. El Molino queda ubicado en la sección 1 porque es conveniente que se encuentre cerca del Depósito de alimentación, aunque podría estar totalmente dissociado del equipo, por no ser un componente intrínseco del mismo (ver detalles en la sección 12.3 Molino). En consecuencia, el Molino podría estar cerca o no. Respecto al Adsorbedor, no existen ventajas considerables si se ubica en una sección u otra; se opta por incluirlo en la sección 1, pues el Adsorbedor podría utilizar volúmenes subutilizados por los componentes, y así optimizar el espacio ocupado en conjunto.

12.2.4 Idea central n°4 sobre la forma del equipo

A partir de las tres ideas anteriores, se tiene:

- Son 6 reactores.
- La alimentación se encuentra rodeada de reactores.
- El almacenamiento de biogás no se encuentra asociado al resto del equipo.

Para lograr cumplir con la idea n°2 es conveniente que los reactores se encuentren dispuestos de forma simétrica alrededor del depósito de alimentación. Así, el depósito estaría en un centro y los reactores distribuidos en su frontera. La forma que permite dicha distribución son cilindros: un cilindro dividido en 6 de forma radial y en el centro un cilindro que lo corta y que corresponde al depósito, como se muestra en la Figura 32 (a). La complicación de dicha forma son las paredes curvas, pues son complejas de construir y acoplar a una vivienda. Si las paredes del equipo fuesen lisas, se obtendría una forma hexagonal como se muestra en la Figura 32 (b). Se decide imponer esta última forma como base del equipo.

Para facilitar la ubicación del equipo dentro de la vivienda, se decide que el equipo sea más alto que ancho: de los tres ejes espaciales de una habitación, los más utilizados por las personas son los asociados al plano horizontal, pues es allí donde se ubican muebles y por donde las personas transitan; en cambio, el eje de la altura es menos importante. De este modo, se diseñará procurando minimizar el ancho, maximizando la altura.

La pertinencia y utilidad de las ideas centrales en el diseño final son discutidas en el cierre del capítulo, en la sección 12.13 Reflexiones Finales sobre el Diseño.

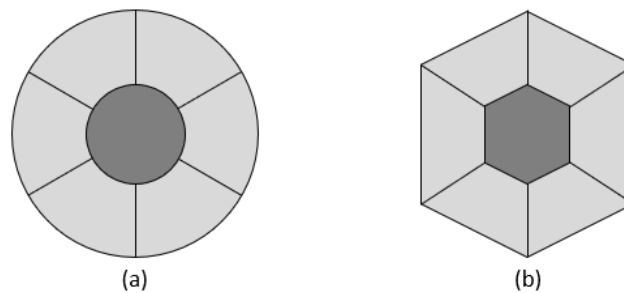


Figura 32: Vista superior de la distribución del depósito de alimentación y los reactores. En gris oscuro se representa el depósito y en gris claro los reactores. (a) Distribución cilíndrica; (b) Distribución hexagonal.

12.3 MOLINO

El molino realiza la conminución de la materia prima. Este componente no se diseña porque en el mercado ya se cuenta con molinos manuales y, a diferencia de otros componentes, este no requiere característica particular alguna. Así, puede utilizarse un molino convencional.

En el mercado existen variados molinos de cuchillos. Por ejemplo, en la Figura 33 se muestra el modelo PS-323H de la marca *Golden Light*; se estima que este aparato logra reducir el material a un diámetro de 5 [mm] o menos [55], sus dimensiones aproximadas son: 22,0 [cm] de alto, 13,5 [cm] de ancho y 7,3 [cm] de largo, con un volumen total de 2,2 [l].



Figura 33: Fotografía de la moledora Multi grinder PS-323H, tomada de [55].

12.4 DEPÓSITO DE ALIMENTACIÓN

Los beneficios principales que se desean de este componente son:

1. Que acumule residuos de 3 días en su interior.
2. Que homogenice los residuos almacenados.

Otros beneficios secundarios, asociados a características mínimas del equipo, son:

1. Que no emita olores.
2. Que no requiera el contacto de las personas con los residuos.

3. Que las personas no perciban los residuos.
4. Que la operación sea sencilla y sin requerir mucho esfuerzo.

A continuación, se resuelve cómo lograr los beneficios principales, considerando que siempre se deben cumplir los secundarios.

12.4.1 Beneficio: acumular

¿Qué se requiere para ser realizado?

Los residuos ingresan al depósito cada día, y para que solo se acumulen residuos de 3 días, debe existir una salida de residuos, específicamente, se desea que salgan hacia el reactor. Además, el volumen del depósito debe ser suficiente para almacenar los residuos.

Se requiere, entonces: un volumen, una entrada y una salida del equipo.

12.4.1.1 *Requerimiento: volumen*

El equipo componente debe tener un volumen de almacenamiento de la alimentación de 3,82 [L], determinado en el Capítulo 11 Dimensionamiento. Esto no quiere decir que este sea el tamaño completo del depósito, porque podrían existir elementos extras necesarios para la operación que provocarían un aumento de volumen. El valor mencionado corresponde al volumen mínimo de la sección donde se acumulan los residuos.

Cabe mencionar que las paredes del equipo deben ser de un material conductor que resista altas temperatura, pues se encontrarán en contacto con el intercambiador de calor. Se propone que las paredes sean de un metal que resista a la corrosión, como el aluminio. Cabe mencionar que este equipo no puede contactarse directamente con el usuario, porque su alta temperatura podría generar quemaduras en el usuario, y, por tal razón, tendría que estar rodeado de otros materiales. Esto último justifica el uso externo de un material aislante.

12.4.1.2 *Requerimiento: entrada*

El ingreso de residuos al depósito puede ser realizado abriendo este equipo, y este acto no debe generar una importante emanación de olores.

Así, basta una tapa que se pueda abrir y cerrar, procurando un buen sello y aislación para que el calor de la alimentación no se pierda. Se escoge poner la tapa en el techo porque puede aprovecharse la gravedad para que los residuos entren; si fuese un costado deberían ser empujados. Además, los costados podrían ser inaccesibles para el usuario, porque los reactores cubren dicha zona. El techo, justamente, está aislado, así que se decide que la tapa sea directamente una fracción del techo removible. Note el lector que se ha evitado inventar una estructura extra, utilizando los recursos disponibles. La sección superior de la tapa tiene hilos para ser atornillada contra el techo, y para sellar se utiliza un o´ring bajo un flange solidario a la sección superior de la tapa. El o´ring es aplastado contra el techo cuando la tapa es atornillada. La tapa sería similar al tornillo mostrado en la Figura 34: la goma negra representa al o´ring; mientras que la cabeza del tornillo, a la parte superior de la tapa; y el hilo del tornillo, al hilo de la tapa. Una salvedad es que la tapa no requiere un hilo y cuerpo tan largo.



Figura 34: Tornillo con empaquetadura de goma.

12.4.1.3 *Requerimiento: salida*

La salida hacia el reactor podría ser problemática: una de las ideas más evidentes para transportar los residuos al reactor es sacar los residuos del depósito hacia el exterior, trasladarlos hasta la posición del reactor e ingresarlos a este, como ocurre con un cucharón que toma alimento de una olla y lo deja en un plato. El problema de esta idea es que ingresar los residuos desde el exterior hacia el reactor requiere abrir y cerrar este equipo componente, lo que provocaría emanación de olores y también biogás, quebrando la idealidad del sistema. Si los residuos se sacan del depósito al exterior del equipo, entonces, necesariamente, tendrán que entrar al reactor desde el exterior. Además, los residuos deberían trasladarse en un contenedor cerrado, que evite la salida y olores, y que además deberá ser opaco para las personas no vean los residuos. El problema de la emisión de olores desde el reactor podría no existir si siempre se mantiene cerrado el reactor, como con una serie de tapones o puertas en desfase. Cabe preguntarse ¿se necesitan realmente todas las acciones involucradas en este sistema? Se puede utilizar la herramienta de recorte TRIZ y solo dejar las acciones estrictamente necesarias, que corresponden a sacar los residuos del depósito e ingresarlos al reactor, sin transporte alguno de un punto a otro en el exterior. Así, una mejor opción es nunca sacar hacia el exterior los residuos y que su movimiento ocurra en un nivel interno, que puede ser realizado a través de alguna pared que el reactor y el depósito comparten.

La pared comunicante debe desaparecer para que los residuos se trasladen de un lugar a otro. Si dicha pared se encuentra en la parte inferior del depósito o en algún nivel bajo los residuos, la sección sin pared debe ser bloqueada para que la alimentación no salga descontroladamente. Este bloqueo requiere algún tipo de sello para ser aislada completamente del reactor, pero el sello es muy difícil de lograr si existen sólidos particulados en el medio, pues interfieren en el sistema de cierre. Por lo tanto, la comunicación entre el depósito de alimentación y los reactores debe ocurrir por sobre el nivel de los residuos.

Con todo lo anterior, lo que se necesita para lograr que la alimentación salga del equipo componente es: tomar una fracción de residuos, subirlos hasta la pared comunicante, botarlos hacia dicha pared y cruzarla.

Primero se resuelve cómo subir, tomar y botar residuos y, posteriormente, cómo cruzar la pared.

Tomar, subir y botar residuos

Para tomar sólidos, un concepto de utilidad corresponde al agarre, emulando una mano que toma los residuos. El problema de esta idea es su complejidad porque se requiere un sistema articulado.

Otro concepto, utilizado en la vida diaria, es la inundación: un elemento podría ser hundido en el residuo y llenarse de dicho material por inundación, tal como ocurre cuando se hunde un cucharón en una olla con sopa. La característica principal del elemento de recolección debe ser la contención

de un gran volumen de almacenamiento de residuos. De esta manera, en el ejemplo, el cucharón debe ser grande. Esta característica provoca que el elemento tenga una gran área de contacto con el material, imposibilitando su inmersión (los residuos tienen consistencia sólida o pastosa). Note el lector que el problema recién presentado corresponde a una contradicción física: se desea que el elemento sea grande para poder almacenar mucho residuo, pero que sea pequeño para poder sumergirse en este, problema que puede ser solucionado separando las características en el tiempo. En consecuencia, el elemento es pequeño y plano, y solo cuando está sumergido entre los residuos se expande aumentando su volumen. Esto último puede ser logrado provocando que, cuando el plano suba, se despliegue un saco adherido a una placa, debido al choque con los residuos. Para probar esta solución, se construyó un piloto de baja resolución, y se concluyó que los sacos no se abren: quedan adheridos a la placa pues algunos residuos son muy viscosos.

Otra idea distinta corresponde a rodear un volumen de alimentación y luego extraerlo, como ocurre con una cuchara al sacar azúcar. El problema de esto es que se requiere un movimiento de giro del elemento de recolección que es muy complicado de resolver, considerando que el usuario opera desde afuera del equipo. Las ideas anteriores, aunque no funcionales, solo requerirían que el usuario moviera el elemento de recolección de forma vertical. Sin embargo, puede rescatarse la idea conceptual de rodear un volumen.

Combinando la idea de inmersión y de encierre de un volumen, se configura la siguiente solución: sumergir una argolla de forma vertical en la alimentación, luego, avanzar de forma horizontal por esta, y a medida que avanza se despliega un saco de fondo cerrado con forma de acordeón. Este saco es flexible y está plegado sobre sí mismo cuando no contiene alimentos. Si fuese una caja sólida no podría sumergirse. Entonces, el saco entra aplastado a la alimentación, y para ello se necesita que el final del saco sea sólido. Para manejar ambos extremos, argolla y final, el usuario dispone de respectivos vástagos que salen del equipo hacia el exterior. Con lo anterior, la solución planteada permite recolectar los residuos.

Al subir el sistema de recolección, lo que será necesario para sobrepasar la pared, resulta deseable que el alimento al interior de este no se caiga. Si todo el dispositivo sube de forma horizontal, los líquidos podrían fluir y caer por la boca (argolla). Por lo tanto, primero se subirá la argolla y luego, en desfase, el final del saco, quedando las puntas inclinadas una respecto a la otra.

Finalmente, para botar la alimentación del dispositivo de recolección, se pueden juntar los extremos de forma diagonal para aplastar los residuos y que salgan por la boca, pero esto requeriría mucha precisión en la operación. Otra opción es dejar caer los residuos utilizando la gravedad: se necesita subir el final del saco por sobre el nivel de la argolla, quedando con un ángulo mayor al de descanso (se impone un ángulo de 60°).

La solución a este problema requiere movimiento horizontal y vertical de los vástagos asociados a los extremos del saco.

Cabe mencionar que el tamaño del saco define el volumen máximo de residuos a dosificar al reactor. Si se alimentan menos residuos que el caso base al depósito de alimentación, entonces se debe dosificar solo dicho volumen y no más; para que la operación sea sencilla, la instrucción para el usuario es dosificar residuos hasta llegar a un volumen definido en el depósito. Para ello, se informa

al usuario el nivel de llenado del depósito a través del vástago (se encuentra graduado) porque toca la superficie de los residuos, constituyendo un sensor de nivel.

Cruzar la pared

Para cruzar la pared con el sistema anterior, la argolla deja caer los residuos sobre una bandeja receptora inclinada, que se comunica con la pared que cuenta con un corte inclinado (60°) para que los residuos se desplacen y caigan al otro lado.

Como últimos detalles, es importante mencionar que el sistema de recolección creado alimenta un reactor a la vez. Es necesario que el sistema gire para ser alineado con la pared que comunica con el respectivo reactor a alimentar. El sistema de alimentación, por tanto, se encuentra integrado al techo, que es giratorio.

12.4.2 Beneficio: homogeneizar

Para mezclar los residuos se pueden mover de forma tal que las partículas se desordenen. Esto último se logra imponiendo velocidades distintas entre las partículas (tanto su dirección, sentido y magnitud). Los materiales más difíciles de mover son los sólidos y líquidos pastosos, pues no fluyen con facilidad, siendo esta consistencia la predominante en los residuos orgánicos. Se asumirá, por tanto, que la alimentación tiene dicha consistencia.

El requerimiento, entonces, es mezclar los residuos.

12.4.2.1 Requerimiento: mezclar

Existen 26 formas de mezclar un sólido según la base de datos de efectos TRIZ, de ellas las más usuales son rotar (por ejemplo, rotar un eje con paletas o rotar un tambor), sacudir (mover de arriba abajo o hacia los costados) y cepillar (empujar secciones del sólido hacia sus costados, por ejemplo, un rastrillo haciendo surcos en la tierra). La alternativa de rotar no es conveniente porque la alimentación que se encuentre lejos del elemento que gira posiblemente no se mueva si el material no es viscoso y, por otro lado, al sistema podría costarle girar si el líquido es muy viscoso. Lo primero podría ser solucionado al poner muchos elementos de giro y sus respectivos ejes. No se desea sacudir porque requeriría mover la masa de residuos y su contenedor, y eso requiere más energía y esfuerzo de las personas; además, los materiales viscosos se moverían en bloque sin mezclarse. Finalmente, empujar el sólido con cepillos es la mejor opción, porque hace posible afectar todo el sólido, según la ubicación de las cerdas, independiente de la viscosidad. Es muy importante la forma y posición de las cerdas para que logren mover materiales viscosos.

Para que el dispositivo de recolección y el sistema de mezcla no choquen, este último también se ancla al techo giratorio. Así, además, el cepillo se podrá mover siguiendo una trayectoria circular.

Esta solución está probada en ollas industriales que mezclan alimentos, particularmente arroz viscoso [56].

12.4.3 Diseño propuesto para Depósito de alimentación

El diseño propuesto para el Depósito de alimentación se encuentra disponible en la Figura 35. La Figura 36 incluye una vista del techo giratorio de la alimentación. En la Figura 37 se presenta la misma vista, acoplado el sistema de alimentación que comunica el Depósito de alimentación con los reactores. Sus planos serán presentados en la sección 12.12 Configuración Final del Equipo.

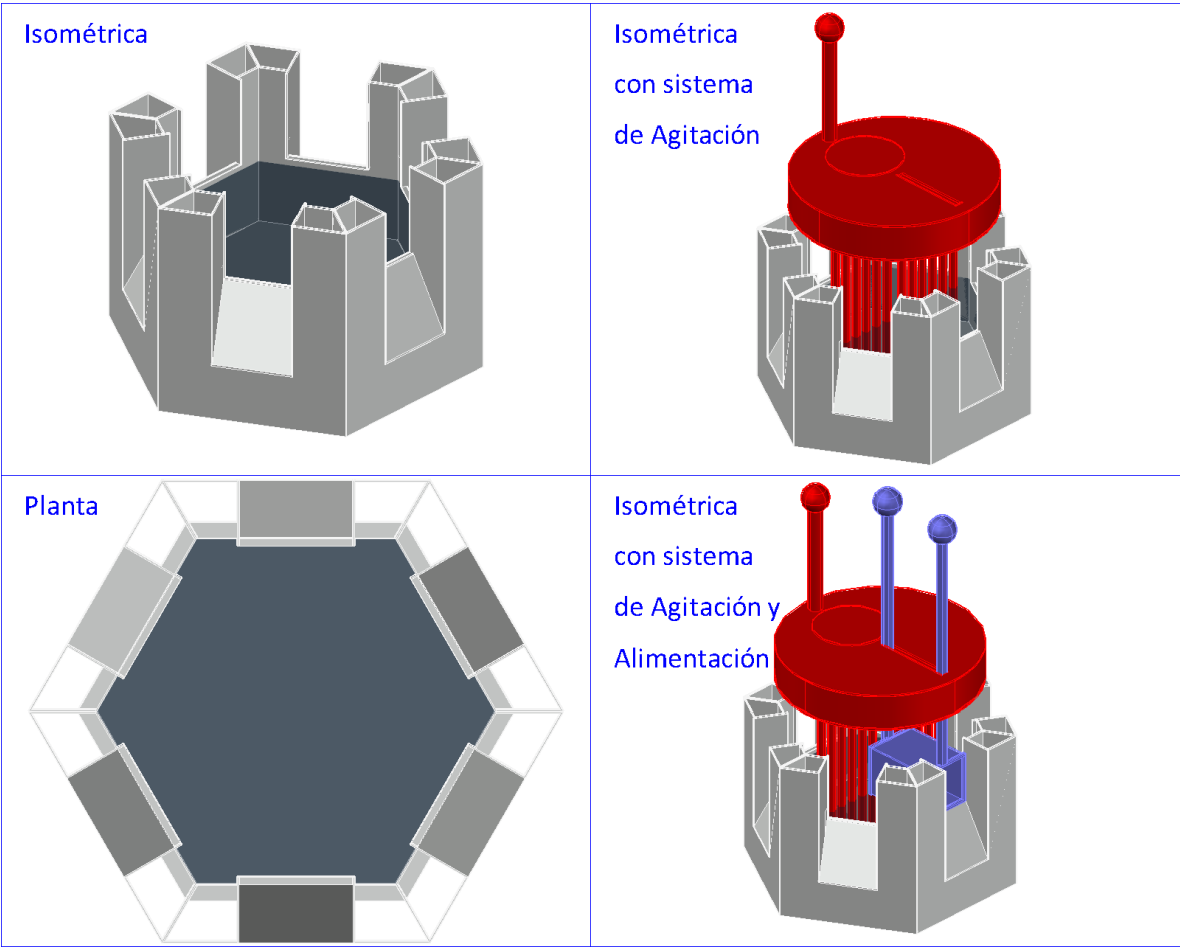


Figura 35: Vistas del diseño propuesto para el Depósito de Alimentación.

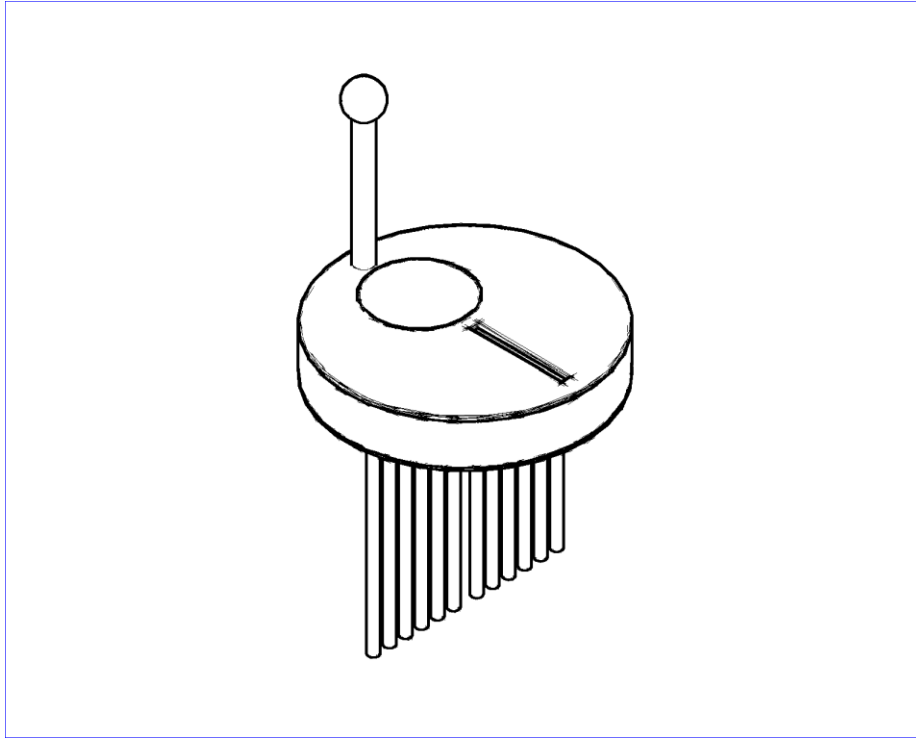


Figura 36: Vista isométrica del diseño propuesto para el techo giratorio del depósito de alimentación.

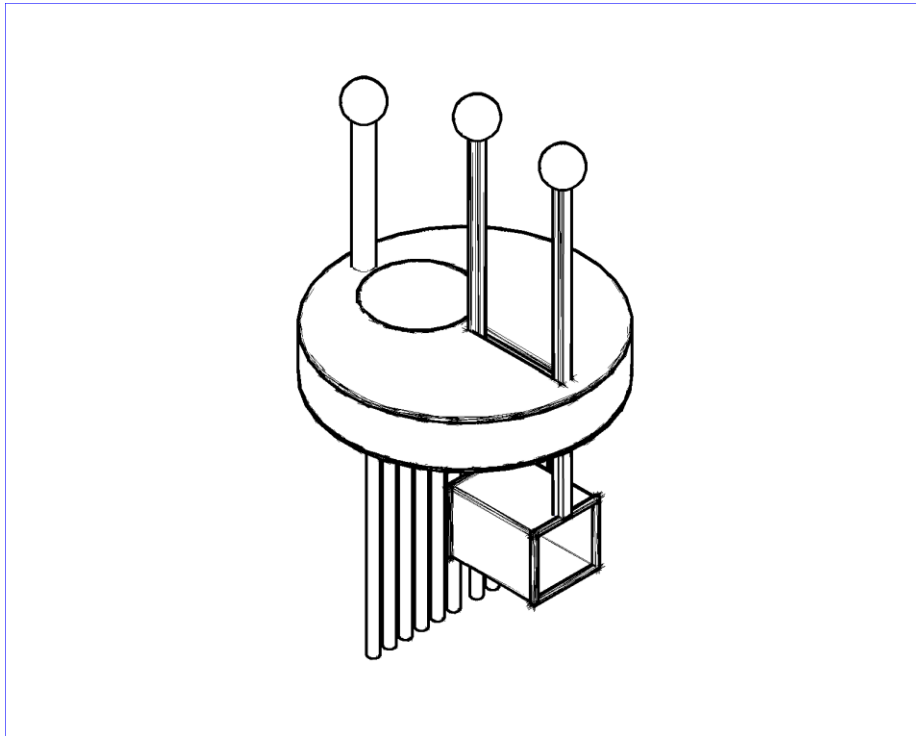


Figura 37: Vista isométrica del diseño propuesto para el techo giratorio del depósito de alimentación. Se incluye vista del sistema de alimentación que comunica el Depósito de alimentación y los Reactores de Digestión Anaeróbica.

12.5 REACTOR DE DIGESTIÓN ANAERÓBICA

En el reactor ocurren las reacciones de transformación y también la mezcla de digestato con la alimentación. La existencia de esta última actividad se explica a continuación:

En capítulos anteriores se ha definido que el digestato producto de la digestión anaeróbica debe reciclarse para ser mezclado con la alimentación y así inocularla. Para lograr lo anterior, se podría realizar lo siguiente: remover el digestato del reactor, luego reciclarlo a un tanque de mezcla, donde también se ingresa la alimentación, y finalmente, ingresar dicha mezcla al reactor. Sin embargo, no es necesario remover el digestato del reactor, pues basta remover solo aquella fracción que no es reciclada, y mezclar la fracción útil con la alimentación en el mismo reactor. De esta forma el proceso es más sencillo.

Para realizar la simplificación mencionada se utilizó la herramienta de recorte TRIZ: la pregunta *¿se necesitan las acciones útiles del componente?* permite concluir la eliminación de las acciones de remoción y reingreso al reactor; y a partir de la pregunta *¿puede el objeto realizar las reacciones útiles?* se decide que el reactor también mezcle. Cabe mencionar que el reactor de todas formas debería mezclar, pues requiere homogeneizar la mezcla reaccionante.

Se diseña solo un reactor de digestión, pues las otras unidades paralelas son iguales.

Los beneficios principales que se desean de este equipo componente son:

1. Que contenga mezcla reaccionante.
2. Que recolecte biogás.
3. Que permita una relación mínima de reciclo/alimentación para que la reacción ocurra.
4. Que homogenice la alimentación con el reciclo de digestato, y homogenice la mezcla reaccionante.

Otros beneficios secundarios, son:

1. Que sea seguro.
2. Que no emita olores.
3. Que no requiera el contacto de las personas con los residuos.
4. Que las personas no perciban los residuos.
5. Que la operación sea sencilla y no requiera mucho esfuerzo.
6. Que resista una mala operación.

A continuación, se resuelve cómo lograr los beneficios principales, considerando que siempre se deben cumplir los secundarios.

12.5.1 Beneficio: contener

¿Qué se requiere para ser realizado?

Basta que cada reactor cuente con un volumen de 5,1 (l), suficiente para contener la fase líquida.

Cabe mencionar que el líquido podría ser corrosivo, así que el material a utilizar en las paredes debe resistir el ataque iónico. Se propone utilizar plástico, porque, en general, es de costo reducido y liviano en comparación con los metales; en este caso se requerirían metales resistentes a la corrosión que son más costosos aún. Por otro lado, se debe procurar que el usuario no tenga

contacto directo con el equipo porque podrían existir zonas calientes. Este contacto no ocurre, porque ya se ha decidido que el equipo esté rodeado de un material aislante para evitar pérdidas de calor.

12.5.2 **Beneficio: recolectar**

¿Qué se requiere para ser realizado?

Se necesita espacio para que se acumule biogás, y una salida para este hacia las columnas de adsorción. Además, se deben evitar las fugas así que el equipo debe ser hermético.

12.5.2.1 *Requerimiento: espacio*

Se aumenta el volumen del reactor de forma tal que el espacio de gas corresponda al 20% del total del reactor.

Para que el reactor sea seguro, además se impone que la presión se encuentre a 1 [atm] aproximadamente, lo que se logra con una salida adecuada.

12.5.2.2 *Requerimiento: salida*

El biogás es transportado por un tubo desde el reactor al adsorbedor. Dicho tubo de conecta con el espacio de gas siendo instalado en la parte superior del reactor, cerca del techo; no puede estar sumergido o cerca de la superficie del digestato, porque entraría digestato.

El tubo de salida y todos los equipos componentes posteriores deben asegurar bajas pérdidas de carga para lograr que la presión no suba de forma considerable en el reactor. Dichos cálculos se han realizado de forma somera en el diseño, y se propone profundizar en este tema en una siguiente etapa de ingeniería.

12.5.2.3 *Requerimiento: hermetismo*

El hermetismo se logra sellando las juntas de las paredes del reactor, y el sistema de acceso de alimentación cuando está siendo utilizada y cuando no. Esto último se detalla en la siguiente sección

12.5.3 Beneficio: relación entre reciclo y alimentación.

12.5.3 **Beneficio: relación entre reciclo y alimentación**

¿Qué se requiere para ser realizado?

Se necesita una entrada de alimentación, y una salida de digestato cuando lo anterior ocurre, de forma tal que la relación entre los volúmenes de ambos cumpla con una proporción mínima, con el propósito de que la reacción ocurra según lo previsto.

12.5.3.1 *Requerimiento: entrada*

El ingreso de alimentación no puede permitir la salida de gas ni líquido (mezcla reaccionante) por esa entrada. Así, la entrada debe ser obstruida para el paso del líquido y gas, pero no para la alimentación.

Si la alimentación ingresa por la parte superior del reactor, los gases pueden escapar fácilmente cuando no exista obstrucción. Por ejemplo: abrir una compuerta para dejar caer la alimentación y luego cerrarla, permite que la alimentación entre de forma controlada al reactor; sin embargo, en el momento en que la alimentación esté cayendo, el biogás puede fugarse, dado que los sólidos no

otorgan una resistencia importante para su paso. Más aún, si no se logra un buen sello una vez que la puerta está cerrada, se podrán fugar los gases de todas formas. El sello es difícil de lograr si la entrada se encuentra inmersa en material sólido; en el ejemplo anterior, los sólidos de la alimentación interferirían en el cierre de las compuertas. Este último problema es posible de solucionar limpiando el entorno de dicha salida antes de realizar el sello, por ejemplo, si la entrada deja caer todos los residuos que se encuentran sobre ella, luego no estará inmersa en ellos. Esto justamente lo permite el sistema de recolección de alimentación del depósito: una fracción de la alimentación, solo la requerida por el reactor, es separada del resto de los residuos y se almacena en otro lugar. Dicho almacenamiento intermedio podría corresponder a la entrada del reactor, así, cuando todo el material caiga al reactor, el almacenamiento quedaría vacío.

Otros sistemas como la constricción de mangueras o el bloqueo con tapones en las salidas también tienen el mismo problema de no impedir la fuga de biogás al momento de ingreso de alimentación.

Si los residuos ingresan por debajo o por el costado del reactor, bajo el nivel del líquido, entonces sellar la obstrucción es complicado en todo momento porque existen materiales sólidos particulados provenientes de la alimentación y de la fase líquida del reactor que impiden un sello correcto, y el líquido podría escaparse hacia el depósito. Sin embargo, no es posible que se escape biogás por allí porque el mismo líquido evita su paso. Para solucionar el problema, podría utilizarse un sistema que dependa de los niveles respectivos de líquido y alimentación, por ejemplo, como un sifón: la alimentación puede pasar del depósito al reactor porque su nivel es mayor; y la fase líquida no puede hacer lo mismo, porque su nivel es más bajo. Sin embargo, esto no funciona porque los residuos no fluyen por propia cuenta, pero sí el líquido del reactor, así que este último fluiría de todas formas hacia el depósito.

Para solucionar el problema, se utilizan las ideas funcionales de las otras soluciones: alimentar por arriba permite que el sello funcione una vez ingresado el alimento, y alimentar por abajo o el costado permite que el mismo líquido impida la salida de biogás. Así, se configura la siguiente solución:

El techo del reactor tiene un espacio vacío tapado con un tapón de goma para los gases no se escapen. Dicho tapón tiene un cuerpo, hacia abajo, con forma de émbolo, que cruza la fase gaseosa y parte de la fase líquida. Alrededor del émbolo, existe una pared que divide el volumen del reactor en dos: un volumen pequeño (un ducto) donde se encuentra el émbolo (no hay espacio para que haya gas ni líquido) y un gran volumen donde se encuentra el biogás y e líquido. Note el lector que la pared del ducto se sumerge en la fase líquida. Cuando se desea alimentar, el émbolo con su tapón sube, dejando el reactor. Así, queda un espacio vacío o abertura en el techo. Del depósito se recolecta la alimentación deseada y se deja caer por la abertura hacia el reactor a través del ducto. El biogás no se fuga por la entrada porque existe una columna de líquido que se lo impide: recuerde el lector que existe una pared sumergida en el líquido, que separa el biogás del sistema del émbolo. Cuando los alimentos caen, el techo queda sin residuos, y el tapón puede volver a ponerse presionándolo contra el techo del reactor, y el émbolo a ocupar su lugar original. Cabe notar que, si el émbolo no existiera, pero sí el ducto, el sistema funcionaría igual, con la salvedad que el líquido podría llenar una fracción del volumen del ducto, para igualar el nivel de líquido, y dicho líquido generaría biogás, que llenaría el espacio donde antes estaba el émbolo; con la existencia del émbolo esto se puede evitar: el émbolo es largo y ocupa el volumen que podría ser llenado con líquido. De

esta manera, el líquido no entra al volumen anterior ni genera biogás en dicha zona. Además, si parte del líquido entra de todas formas, el biogás que se almacena en ese espacio es muy reducido porque el émbolo ocupa casi todo el espacio gaseoso.

El émbolo también sirve para empujar los residuos si se quedan atrapados en el ducto de entrada.

El émbolo es hueco, y debe estar compuesto por un material que resista a la fricción contra el ducto. Se propone un émbolo plástico recubierto con cerámica; podría ser simplemente de metal, pero en ese caso el émbolo sería pesado. Por otro lado, el ducto es de metal.

Cabe mencionar que el techo debe encontrarse aislado, también la pared externa. Se puede utilizar el émbolo como aislante del techo y una pared, si este está compuesto por un aislante. Así, se decide que el interior del émbolo contenga un aislante de calor. Se ha utilizado la herramienta de recorte TRIZ para concluir la decisión anterior, se respondió a la siguiente pregunta: *¿puede otro componente realizar la acción útil?*, que, traduciendo a este contexto, versaría: *¿puede otro componente, a parte del techo y las paredes, aislar el techo y las paredes?*, y la respuesta fue sí, pues un elemento cercano a estos lugares que se encuentre aislado puede aislarlos.

12.5.3.2 *Requerimiento: salida*

La salida de digestato debe ser controlada. Recuerde el lector que, según lo definido en el Capítulo 11 Dimensionamiento, existe una proporción fija entre volumen de residuos alimentado y volumen de digestato requerido. Dicha proporción es una cota mínima, es decir, podría alimentarse más digestato del requerido y la reacción no cambiaría. Es más, podría ser más rápida.

De este modo, para regular el contenido de fase líquida, basta con mantener su volumen constante: si ingresa una alimentación con volumen V_1 , entonces debe salir un volumen igual de digestato del reactor. El volumen de la fase líquida debe ser igual al volumen del caso base más el respectivo volumen del digestato requerido como reciclo. Así, cuando se alimente un volumen de materia prima menor al caso base, el digestato que permanece en el reactor será mayor al requerido. Se opta por mantener dicho volumen constante porque facilita la operación, y reduce las posibilidades de error.

Para controlar la salida de digestato, puede utilizarse un tapón que selle la salida de digestato cuando se ha alcanzado el volumen deseado de fase líquida. Por ejemplo, cuando se ingrese alimentación, podría levantarse el tapón para que salga el digestato, y a medida que el nivel de líquido baja, el tapón sella la salida debido a la presión que ejerce el líquido sobre el mismo, tal como funcionan las cadenas del estanque del WC. Esta idea fue probada mediante un piloto de baja resolución, y se concluyó que la columna de digestato es insuficiente para empujar el tapón y cerrar la salida. Además, el sello que podría lograrse no es bueno, debido a partículas sólidas que interfieren.

Otra idea es poner una válvula al fondo del reactor, y que el usuario descargue el digestato hasta lograr el volumen deseado. El problema es que el sistema no autorregula el nivel de líquido, y resulta posible una operación incorrecta (el equipo podría ser vaciado).

Un sistema que se autorregula fácilmente son los sifones: un extremo del sifón puede ser conectado en alguna pared del reactor, que se encuentre bajo el nivel del líquido, y el otro extremo quedar libre, fuera del reactor, al mismo nivel del líquido; una vez que el volumen de líquido aumenta, el

sifón se desborda y provoca que el nivel baje a su volumen original. Este sistema funciona porque el digestato es líquido. El digestato, finalmente, puede caer en un depósito.

Se debe tener presente que en este caso no existe tapón alguno y que es el digestato el que bloquea la salida del biogás por el sifón. Sin embargo, el biogás, con el tiempo suficiente, podría ser transferido a través del digestato y salir por el sifón. Para evitar esto, se calcula el largo que debe tener el sifón para que la columna de digestato bloquee la eventual transferencia (ver Anexo U Cálculo columna de digestato del sifón para más detalles).

Finalmente, se escoge el sistema del sifón para sacar digestato del reactor. Se propone que el material del sifón sea plástico, pues no se corroe, es liviano y tiene un costo reducido en comparación con otras alternativas.

Cabe mencionar que la salida de digestato no puede permitir que los alimentos ingresados en el reactor salgan de este (es decir, la alimentación no puede entrar al sifón). Esto se resuelve con el dispositivo de agitación, discutido en la siguiente sección 12.5.4 Beneficio: homogenizar.

12.5.4 Beneficio: homogenizar

¿Qué se requiere para ser realizado?

Entre los supuestos del dimensionamiento se encuentra la agitación constante, que proviene de los datos utilizados como referencia durante el ajuste de parámetros cinéticos. Dichos datos fueron obtenidos de experimentos que disponían de mezcla completa.

Agitar constantemente no es posible en el reactor, porque no se cuenta con energía de manera continua. Cabe preguntarse si los efectos de la agitación pueden ser logrados de otra forma. Los mencionados efectos son mezcla completa y altas velocidades de transferencia, lo que permite suponer que limitan las reacciones.

Para obtener mezcla completa se deben distribuir uniformemente los compuestos y células de la fase líquida en el reactor, lo que puede ser realizado inmovilizándolos de forma homogénea en el reactor, evitando su acumulación en algún lugar particular. Respecto a la transferencia de masa, esta podría ser rápida si los reactantes se encuentran cerca entre sí.

En el sistema biológico presentado, una vez que los microorganismos se encuentran cerca de su respectivo sustrato, es probable que se mantengan allí y no migren a otros lugares, si es que la concentración de ese sustrato es suficiente o no existen diferencias de concentración con otros puntos del reactor. Además, los microorganismos cuentan con sistemas propios de movilidad, por lo que la transferencia de estos no se rige completamente por las ecuaciones de transporte. Con lo anterior, si fuese posible asegurar que los sustratos se encuentran inmovilizados, posiblemente la disponibilidad de reactantes esté garantizada y el sistema sea homogéneo. Esto, sin embargo, no se puede asegurar en el reactor en estudio; para promover dicha condición se opta por incluir superficies a lo largo del reactor para evitar la estratificación de los sustratos, sin embargo, se desconoce cómo podrían distribuirse los sustratos solubilizados. Tomando en cuenta la gravedad, los sustratos podrían caer al fondo del reactor. Aunque verosímil, esto solo es una suposición.

Por otro lado, los microorganismos podrían ser inmovilizados, pero esto es imposible en el contexto donde se lleva a cabo el proceso.

Para contrarrestar la distribución de sustratos solubilizados, mejorar la distribución de los sustratos sólidos y mejorar las transferencias, se incluye agitación. Pero esta agitación solo podrá ocurrir una vez al día o un par de veces. ¿Es suficiente? No es posible obtener la respuesta sin una experimentación. Tampoco puede concluirse que agitar una vez al día sea insuficiente, por lo explicado anteriormente.

Cabe mencionar que durante el ajuste de parámetros cinéticos se utilizó el experimento mencionado, y no uno que se adaptara mejor a las condiciones que pueden ser logradas en el reactor, porque no se cuenta con información mejor adaptada ni composiciones de salida, haciendo imposible el ajuste de parámetros en otras condiciones.

Finalmente, para un correcto análisis futuro de la agitación, se requiere realizar experimentos simulando las condiciones del reactor, y corregir con ello las cinéticas asumidas.

A continuación, se explica cómo se logra la distribución de la alimentación en el reactor y la agitación.

Distribución de alimentos

Se utiliza el concepto de *retener*, siendo este sencillo pues no requiere energía. Así, a lo alto del reactor se incluyen superficies alargadas, delgadas y planas, como varas horizontales, para que los residuos puedan posarse una vez que caigan desde la entrada de la alimentación.

Agitación

Entre las alternativas que ofrece la base de datos de efectos TRIZ para agitar un sólido, con el propósito de mezclar, se encuentran: agitar (girando un eje), sacudir, burbujear, y mover un turbulador.

La idea más utilizada en la industria es agitar un eje con paletas. La dificultad de lo anterior radica en la disponibilidad de un espacio en el techo del equipo por donde cruce el eje, y para sellar se requiere un fluido viscoso o sólido deformable (por ejemplo, grasa o polímero) entre el eje y el contorno de dicho espacio, y este material debe ser renovado cada cierto tiempo. Esto último no es deseado. Además, tal tipo de agitación no es apropiada para equipos con forma irregular, diferentes a cilindros. Se descarta, por tanto, esta idea.

Sacudir el reactor, esto es, mover de arriba abajo o hacia los costados, provocaría que las paredes movieran el líquido en su interior, promoviendo su mezcla. Sin embargo, no es factible agitar el reactor completo porque no se desea cambiarlo de posición. Entonces, podría moverse solo una de las paredes, lo que puede ser logrado deformando una pared: una fracción del fondo del equipo puede ser móvil (una bolsa en forma de acordeón), y para agitar se expande hacia abajo y hacia arriba, modificando el volumen del reactor. De forma análoga, se puede provocar lo mismo con otra de las paredes. El movimiento debe ser vigoroso para lograr mezclar, y esto es costoso para el usuario, así que esta idea es también descartada.

Un típico burbujeo corresponde a un patrón de movimiento tipo *gaslift* que consiste en un cilindro ubicado de forma vertical al centro del reactor, por el cual se burbujean gases; el líquido que se encuentra dentro del cilindro se moverá por el arrastre que generan las burbujas subiendo, y saldrá

por arriba del cilindro, bajará por el costado externo del cilindro interior, donde no hay burbujas. Por abajo del cilindro, finalmente, entrará el líquido nuevamente, cerrando un ciclo.

Burbujear no es muy recomendado en reactores de digestión anaeróbica porque dificulta considerablemente las transferencias de masa, pero se puede reducir si el tiempo de agitación es corto. Si se deseara implementar esta estrategia, se podría utilizar el mismo biogás generado y, en tal caso, se requerirían dos salidas de biogás: una hacia el reactor (reciclo) y otra hacia las columnas de adsorción; para la agitación se debería abrir la salida hacia el reactor y el resto del tiempo se debería mantener abierta la otra salida. En este caso, un error en la operación (abrir y cerrar válvulas) podría hacer estallar el reactor, así que por seguridad se descarta.

Se puede simular un sistema *gaslift* reemplazando las burbujas por otros elementos, por ejemplo, flotadores. Esta idea se probó en un prototipo de baja resolución y se concluyó que no logra agitación, porque el número de repeticiones del evento debe sobrepasar las decenas, y la frecuencia debe ser corta (segundos de diferencias desde un evento a otro), tal como se comportaría un conjunto de burbujas. Esto implica que las personas, para emular el efecto, deberían realizar una actividad rápida y repetitiva, lo que no se desea porque podría resultar molesto.

Los objetos turbulantes son cuerpos geométricos que, al moverse, generan turbulencia tras de sí. Una forma de provocar este efecto es tirar un flotador hacia el fondo del reactor, y dejar que luego suba. A partir de un prototipo de baja resolución, se determinó que el área transversal del objeto debe ser más de un 70% el área transversal del reactor. Esto incomodaría si siempre estuviese flotando, pues interrumpe la transferencia de biogás hacia la fase gaseosa. El flotador podría, sin embargo, reducir su tamaño una vez acabada la agitación. No se pudo solucionar este último problema. Además, para tirar el flotador se requiere una varilla o similar que salga del reactor; atravesar una pared no es factible por las mismas razones que descartan el uso de un eje de agitación, otra opción es que la varilla salga por el sifón hacia el exterior, pero esto es complicado de lograr; se probaron sistemas hidráulicos, pero su sello es difícil de lograr y un fallo en el sistema no podría ser fácilmente reparado.

El objeto turbulante podría no requerir moverse a lo largo de todo el reactor, sino que solo una fracción. Se hizo una prueba con un prototipo de baja resolución, simulando una puerta en el fondo del reactor; esta puerta, además de tener el efecto turbulador, mueve el fluido porque lo aplasta. Este sistema resulta ser conveniente y sencillo, y solo requiere mover hacia arriba y hacia abajo el extremo de la puerta menor de 5 [cm] para generar movimiento en todo el líquido, especialmente en el fondo, que es donde se espera se acumulen más sustratos sólidos.

Para mover la puerta, se descarta la idea de las varillas por las razones expuestas anteriormente. Se opta por deformar el suelo del equipo, similar a la idea del movimiento de una pared del equipo. Una fracción menor del fondo es de un material flexible, como teflón, que puede ser deformado. Este se empuja con un émbolo accionado por el movimiento de una palanca manual. El movimiento es sencillo y requiere poco esfuerzo, y la operación podría tomar 10 [s] por reactor. La mayor fragilidad de esta solución se encuentra justamente en el teflón, pero podría tener una duración de más de 10 años, considerando que su duración habitual es de 6 meses de uso continuo en una bomba de diafragma [57].

El sistema de agitación se aprovecha como recurso para tapan la salida de digestato cuando se alimentan los residuos, permitiendo que estos no se depositen en el sifón. Cuando la puerta está abajo, tapa la salida, pero deja espacio para que pueda salir líquido; cuando la alimentación ingresa, esto es suficiente para que no entren al sifón.

12.5.5 Diseño propuesto para Reactores de Digestión Anaeróbica

El diseño propuesto para los reactores de Digestión Anaeróbica se encuentra disponible en la Figura 38. El sistema de agitación de los reactores es presentado en la Figura 39. El émbolo para la alimentación de los reactores se muestra en la Figura 40. Los respectivos planos serán presentados en la sección 12.12 Configuración Final del Equipo.

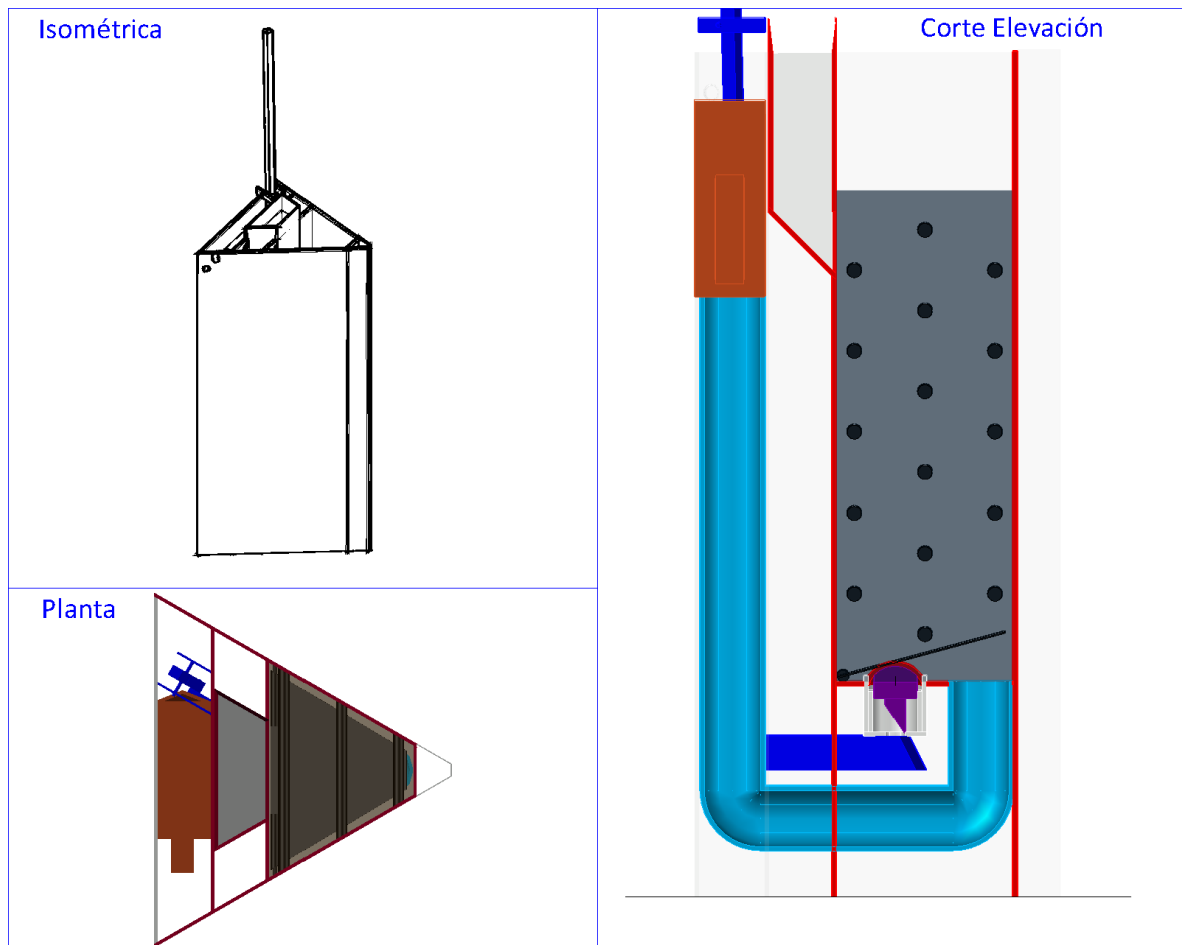


Figura 38: Vistas del diseño propuesto para el Reactor de Digestión Anaeróbica. Se presenta uno de los 6 reactores. Izquierda Arriba, una vista isométrica; Izquierda Abajo, una vista en planta. Derecha, vista en elevación de corte transversal. Se han marcado en gris el nivel de la mezcla reaccionante, a la derecha. Cruzan varias varas para la distribución de compuestos en diferentes alturas del reactor, simbolizados con círculos negros, correspondientes a varas que entran en la figura. El sistema de agitación se encuentra al fondo, en morado, un émbolo que levanta una frontera de teflón, para levantar a su vez una puerta en el fondo del reactor. Tal sistema es accionado por un sistema de palancas, marcado en azul y detrás de otras partes del equipo. La salida del digestato se ha simbolizado en celeste, saliendo por el fondo y flectando a la izquierda, llegando al depósito de digestato, marcado en anaranjado. La posición del émbolo de alimentación se ha marcado en rojo, entre el reactor y el depósito de digestato, y tiene una forma diagonal en su parte inferior.

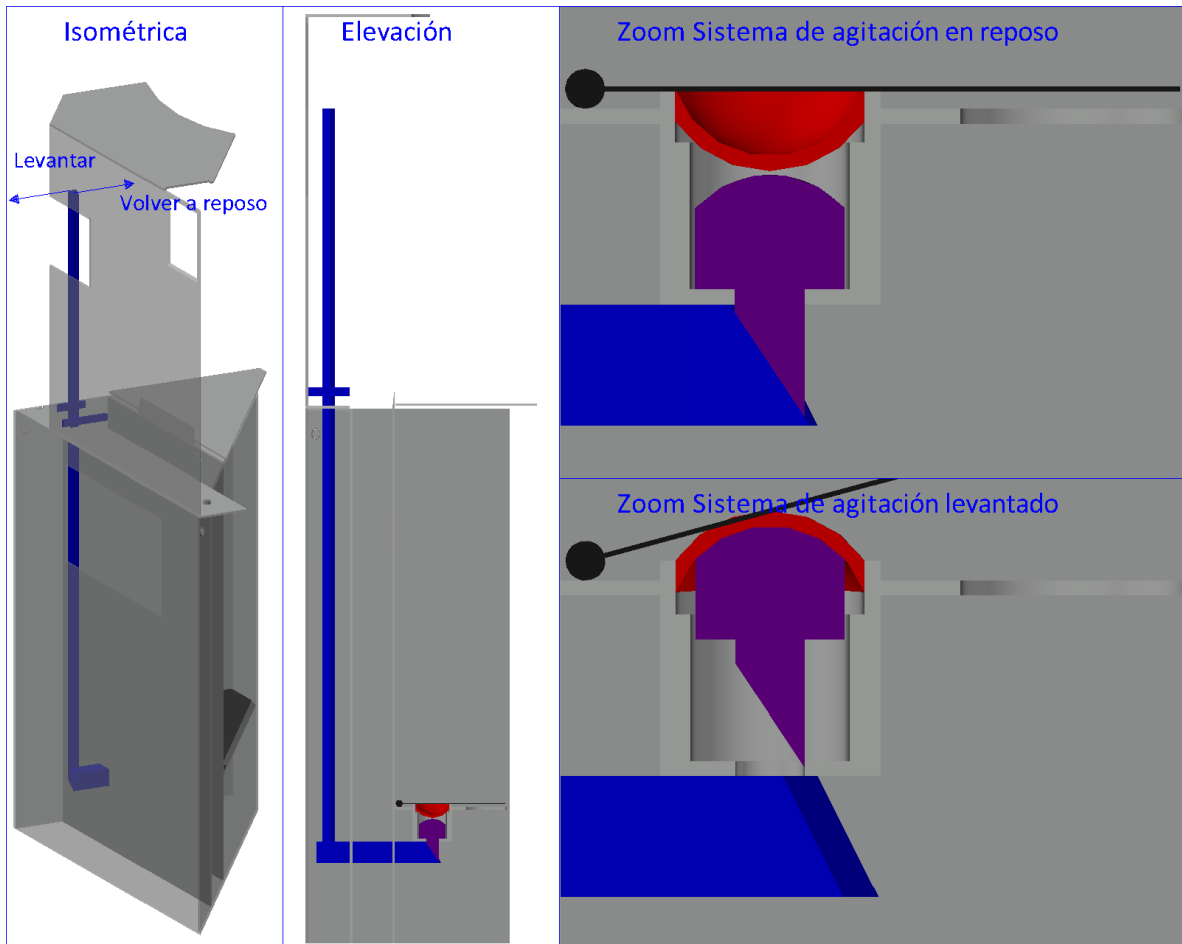


Figura 39: Vistas del diseño propuesto para el sistema de agitación del Reactor de Digestión. El sistema de agitación se encuentra al fondo, en morado, un émbolo que levanta una frontera de teflón, para levantar a su vez una puerta en el fondo del reactor. Tal sistema es accionado por un sistema de palancas, marcado en azul.

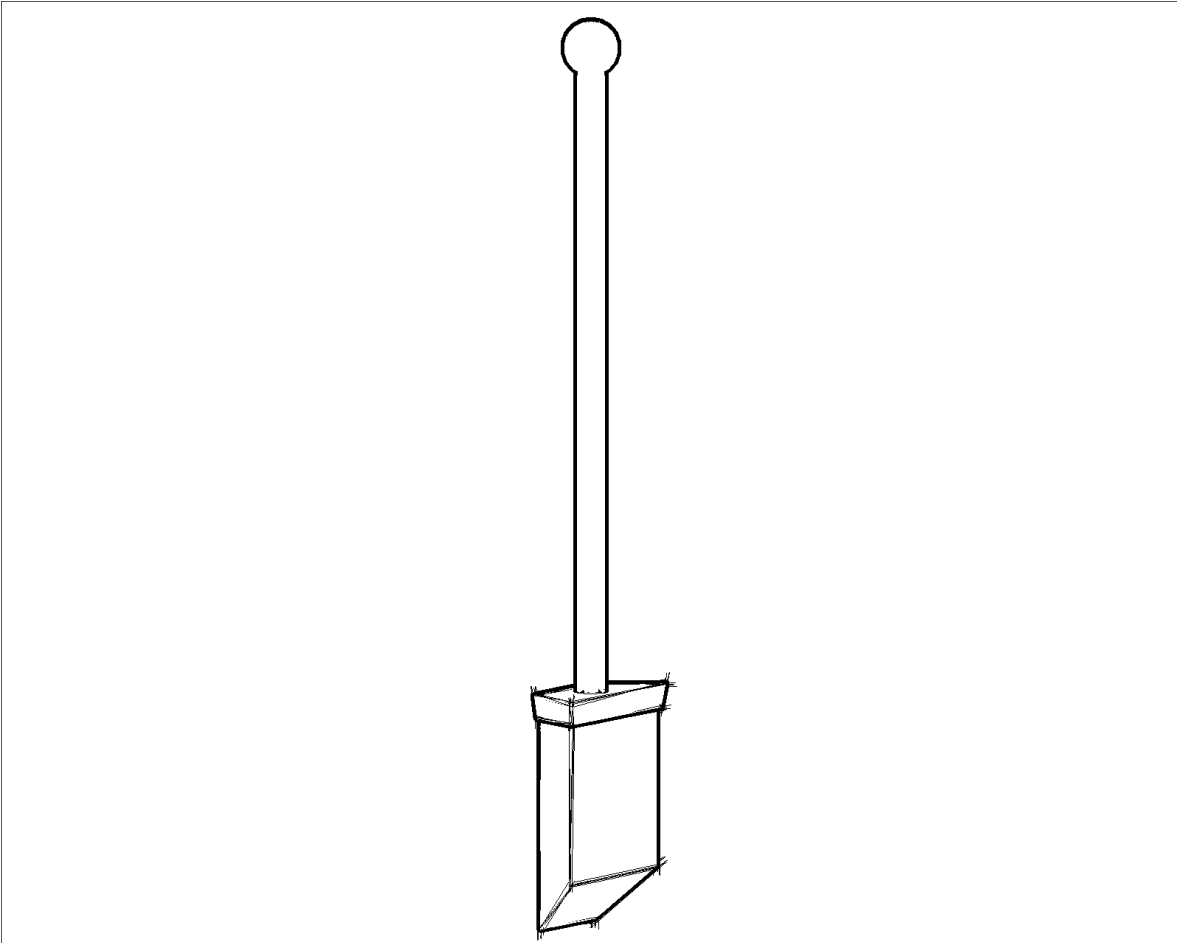


Figura 40. Vista isométrica del émbolo de alimentación de cada reactor.

12.6 ADSORBEDOR

Los beneficios principales que se desean de este componente son:

1. Que limpie el biogás.
2. No se pierda biogás.
3. Que recolecte biogás

Otros beneficios secundarios, son:

1. Que sea seguro.
2. Que la operación sea sencilla y no requiera mucho esfuerzo.
3. Que resista una mala operación.

Cabe mencionar que la operación del equipo puede requerir otros componentes y que podría costar dinero (\$1.000 [CLP] al mes máximo).

A continuación, se resuelve cómo lograr los beneficios principales, considerando que siempre se deben cumplir los secundarios.

12.6.1 Beneficio: limpiar

¿Qué se requiere para ser realizado?

El biogás debe entrar al componente de adsorción, contactarse con el adsorbente, carbón activado, y salir. Además, se requiere renovar el carbón cada un año, según lo determinado en el Capítulo 11 Dimensionamiento.

12.6.1.1 *Requerimiento: entrar, contactar y salir*

Durante el dimensionamiento se ha asumido que la adsorción ocurre muy rápido, lo que podría no ser cierto. Se procura, en consecuencia, que el carbón se distribuya dentro de columnas lo más altas posibles, a fin de maximizar el tiempo de contacto. Dicha columna debe ser angosta para evitar cortocircuitos del biogás.

El biogás entra a una columna vertical, y sale por arriba. La columna debe encontrarse en sentido vertical para que el flujo se distribuya uniformemente por el área; si estuviese dispuesta de forma horizontal, se esperaría que el biogás estuviese más concentrado en la parte superior debido a su densidad. La salida debe estar arriba y no por un costado, porque en este último caso el gas no se distribuiría simétricamente al existir una salida más cercana. Sin embargo, una salida superior requeriría un tubo hacia arriba, y este no cabe en el equipo, según las dimensiones y formas que el resto de los componentes configuran (ver planos en la sección 12.12 Configuración Final del Equipo). Lo anterior se resuelve cerrando la columna con una tapa con doble pared: el gas sale por un agujero en la primera pared, pero no puede escapar al exterior porque existe una segunda pared; este par de paredes dirigen al biogás a un costado, donde se encuentra el tubo que, finalmente, dirige a los gases al siguiente equipo.

La columna es muy larga, así que se opta por poner 6 columnas en paralelo, una para cada reactor. Cabe mencionar que el material de las columnas puede ser plástico, porque es económico y liviano.

Los ductos flexibles de salida de cada Adsorbedor se encuentran conectados con otro ducto flexible que recolecta el biogás, y este luego se dirige hacia el Depósito de biogás.

Para que este equipo componente sea seguro, la presión que alcanza debe ser cercana a 1 [atm] para evitar explosiones. Esto se logra generando bajas pérdidas en el proceso aguas abajo. Este cálculo debe ser realizado en profundidad en las próximas etapas de ingeniería.

12.6.1.2 *Requerimiento: renovar carbón*

Para simplificar el recambio del carbón, este se encontrará dentro de un cartucho que se puede ingresar y sacar de la columna.

Con el propósito de evitar fugas, antes de cambiar el adsorbente se debe cortar el flujo de gases. Para esto, se utilizan válvulas de corte *Cornelius Keg*, que permiten separar dos extremos de respectivos ductos, sellando uno de ellos. El ducto que proviene del reactor cuenta con una válvula que se conecta con otro ducto que entra a la columna, y cuando estos se separan, el primer ducto queda sellado. Se instalará otra de estas válvulas en el ducto de recolección, que se conecta con otro que sale de la columna, y cuando estos se separan, el primero se sella. Se prefieren este tipo de válvulas porque son sencillas y reducen el riesgo de una mala operación, y permiten separar ductos flexibles, lo que resulta conveniente si se desea sacar un reactor del equipo.

Cabe mencionar que el costo de carbón activado podría rodear los \$11.000 CLP [58], valor que se encuentra bajo la cota establecida.

12.6.2 Diseño propuesto para el Adsorbedor

El diseño propuesto para el Adsorbedor se encuentra disponible en la Figura 41. Sus planos serán presentados en la sección 12.12 Configuración Final del Equipo.

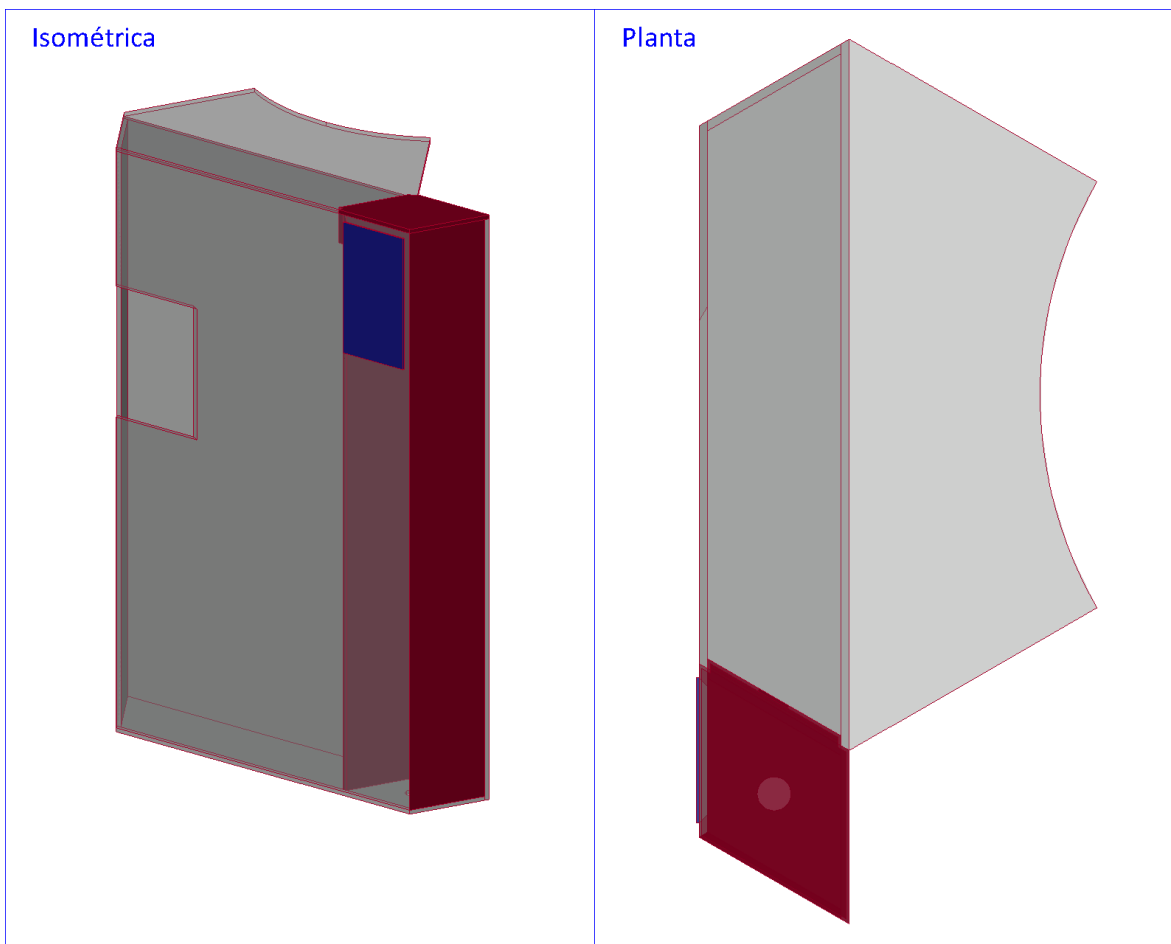


Figura 41: Vistas del diseño propuesto para el Adsorbedor. Se incluyen vistas de las paredes del equipo que rodean al Adsorbedor, y se marcan en rojo las paredes que contienen a este último. En azul se representa la puerta de ingreso del carbón activado para su recambio.

12.7 DEPÓSITO DE BIOGÁS

Los beneficios principales que se desean de este componente son:

1. Que acumule biogás y permita su salida a la cocina.
2. Que sea seguro.
3. Que resista a las condiciones ambientales.
4. Que proteja al resto del equipo de las condiciones ambientales.
5. Que se adapte al espacio disponible

A continuación, se resuelve cómo lograr los beneficios principales, considerando que siempre se deben cumplir los secundarios.

12.7.1 Beneficio: acumular

¿Qué se requiere para ser realizado?

Requiere una entrada, que se conecte con el ducto de recolección de biogás, y una salida que se conecte un ducto flexible desde el equipo hasta la cocina.

Además, debe contar con un espacio de $1 [m^3]$ para contener al biogás.

12.7.2 Beneficio: seguro

¿Qué se requiere para ser realizado?

Para que sea seguro no deben existir fugas de biogás, ni peligro de explosión y no debe encontrarse a altas temperaturas para no generar quemaduras en el usuario.

12.7.2.1 *Requerimiento: no fugarse*

El sistema debe estar bien sellado para evitar fugas, y también debe ser resistente a daños para que no se rompa.

Se decide que el almacenamiento consista en una membrana flexible con refugio (ver Capítulo 8 Estado del Arte), esto es, una bolsa plástica expandible donde se almacena el biogás, que se encuentra dentro de una carcasa sólida de plástico. La carcasa protege a la membrana de cualquier golpe y de la radiación solar. Lo ventajoso de que el biogás se almacene en la membrana es que, si la carcasa se daña, la membrana no.

12.7.2.2 *Requerimiento: sin peligros de explosión*

Si el biogás aumenta su temperatura, su presión podría subir y provocar una explosión. Para evitar un alza de temperatura del biogás, el calor proveniente del ambiente y de la radiación solar debe ser bloqueado (radiación infrarroja). Esto puede hacerse con un aislante, y para mejorar dicha aislación sin ocupar mucho espacio adicional, se podría instalar una superficie reflectora de radiación infrarroja, reduciendo el alza de temperatura del aislante. También se podría construir un techo, pero tal solución ocuparía mucho espacio.

Los metales son reflectores de la radiación infrarroja [59], así que se opta por utilizar una pared de aislante recubierta con una lámina de aluminio.

También, se debe procurar que el biogás sea consumido para que no se acumule por mucho tiempo. Se decide informar al usuario sobre el nivel de llenado del almacenamiento: la membrana funciona como un sensor de llenado que el usuario puede observar a través de un visor que se encuentra en la carcasa. El visor incluye sugerencia de uso de biogás, por ejemplo: si el biogás se encuentra lleno hasta el nivel 1, entonces queda biogás para 1 hora de consumo en la cocina; o si se encuentra en el nivel 10, entonces el biogás debe usarse inmediatamente.

Cabe mencionar que, en condiciones normales de funcionamiento, la presión del equipo debe acercarse a $1 [atm]$. Si es mayor, una explosión podría ser muy dañina. Esta presión se podría asegurar provocando pérdidas de carga reducidas en todo el equipo; se sugiere un análisis en profundidad durante las próximas fases de diseño.

12.7.2.3 *Requerimiento: no altas temperaturas*

La superficie del equipo no debe tener una temperatura muy alta, para no quemar al usuario. Las temperaturas altas son provocadas por la transferencia de calor radiante, proveniente de la radiación infrarroja directa, así que la solución podría ser bloquearla con un techo o una superficie reflectora. Nuevamente, el techo ocuparía mucho espacio. La superficie reflectora podría reducir considerablemente la temperatura de la superficie, pudiendo llegar hasta los 50[°C] bajo condiciones de radiación de la Región Metropolitana [60], temperatura que no quema a las personas ni animales.

Es muy importante que el metal de aluminio no se encuentre pulido, porque en ese caso brillaría mucho (reflejaría la radiación visible) y sería molesto para las personas.

12.7.2.4 *Beneficio: resistir condiciones ambientales.*

Debido al material de la carcasa, el equipo puede resistir condiciones ambientales adversas como lluvia, viento y radiación.

12.7.3 **Beneficio: proteger**

¿Qué se requiere para ser realizado?

El depósito de biogás debe rodear al resto del equipo, protegiéndolo de las condiciones ambientales. Esto lo puede lograr por su constitución modular, característica que se explica en el siguiente beneficio, y es capaz de cubrir 4 de las caras del manto del equipo.

12.7.4 **Beneficio: adaptarse**

El equipo es grande, así que es importante que su forma sea flexible, para adaptarse a diferentes lugares según requiera el usuario. Por tal razón, se decide hacer el equipo articulado: existen 4 depósitos, con sus respectivas membranas y carcasas con visor, que se conectan uno con otro con bisagras, de forma tal que los módulos pueden ser dispuestos contra una pared (en fila) o en un rincón (agrupados en un paralelepípedo). El primer depósito recibe el biogás proveniente del ducto flexible de recolección y cuenta con otro ducto flexible que se conecta con el siguiente equipo, y así sucesivamente.

La modularidad del equipo permite su adaptación a la forma externa del resto del equipo, donde se encuentran los reactores.

12.7.5 **Diseño propuesto para el Depósito de biogás**

El diseño propuesto para el Depósito de biogás se encuentra disponible en la Figura 42. Sus planos serán presentados en la sección 12.12 Configuración Final del Equipo.

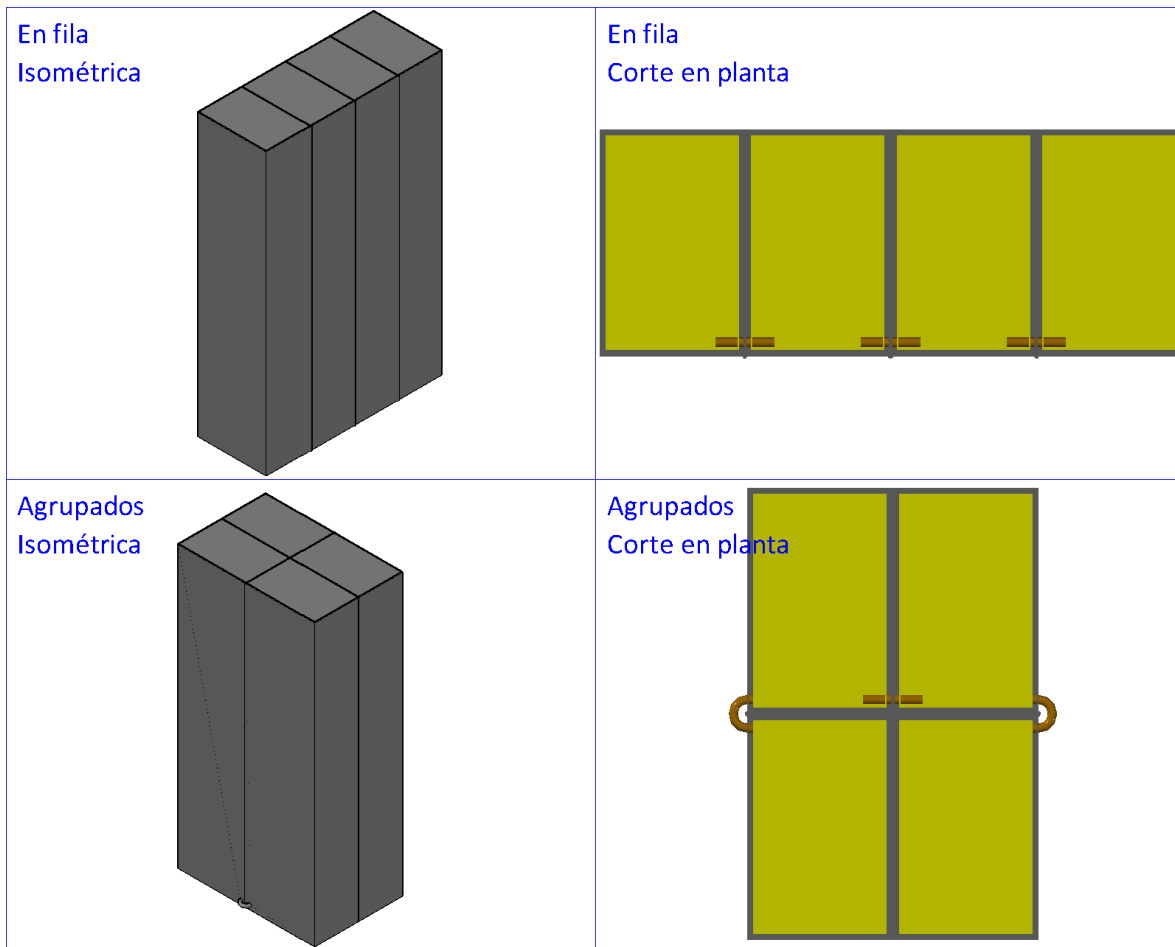


Figura 42. Vistas del diseño propuesto para el Depósito de biogás. Los cuatro módulos pueden ser dispuestos en fila o agrupados. Se ha simbolizado en gris la carcasa externa; en amarillo, la membrana interna que contiene al biogás; y en anaranjado, los tubos que conectan internamente el sistema para el giro relativo de los módulos.

12.8 COMBUSTIÓN

La combustión no ha sido dimensionada porque corresponde a un equipo secundario del proceso. Este corresponde a una cocina, que debe tener la particularidad de capturar sus gases de combustión para dirigirlos al equipo. Esto se puede realizar encerrando la zona donde se realiza la combustión, y así también encerrando los gases producidos; en dicho caso, la superficie del cuerpo que encierra es la que se utilizaría para calentar las ollas para cocinar, funcionando como un platillo caliente.

Existe un tubo que sale de la cocina se dirige al equipo, y existe otro tubo que sale del equipo que contiene los gases de combustión que ya se han utilizado, y los libera en un lugar cercano a la cocina, para evitar que existan salida de gases calientes en un lugar que no sea habitual para las personas, y así reducir los peligros.

12.9 INSPECCIÓN Y SEPARACIÓN

Estas etapas tampoco han sido dimensionada. Cabe recordar que debe ser incluida entre la salida del digestato desde el reactor al almacenamiento, es decir, entre el sifón y el depósito de digestato. Ideas sobre cómo incluir esta etapa se mencionan en la sección Depósito de digestato.

12.10 DEPÓSITO DE DIGESTATO

Los beneficios principales que se desean de este componente son:

1. Que acumule digestato y permita sacarlo.

Otros beneficios secundarios son:

1. No emite olor.
2. Resiste una mala operación.
3. Que la operación sea sencilla y no requiera mucho esfuerzo.

12.10.1 Beneficio: acumular y sacar

¿Qué se requiere para ser realizado?

Se requiere una entrada de digestato, un volumen para almacenarlo y una salida.

12.10.1.1 *Requerimiento: entrar*

El digestato proviene del rebalse de un tubo (sifón). Este digestato cae al depósito donde es acumulado. Este podría ser solo uno para todos los reactores o uno para cada reactor. En la sección 12.10.1.3Requerimiento: salir, se concluye que es uno para cada reactor, así que el depósito se encuentra al final de cada sifón.

12.10.1.2 *Requerimiento: almacenar*

Para almacenar se requiere un contenedor con un volumen suficiente para almacenar 3 días de digestato. Esto implica un volumen total de 2,54 [L] según lo determinado durante el dimensionamiento, que es dividido en 6 contenedores, uno para cada reactor. Los contenedores deben encontrarse cerrados para evitar salida de olores.

No se requiere ninguna característica especial para el material del contenedor, así que podría ser plástico u otro.

12.10.1.3 *Requerimiento: salir*

Si el depósito es uno para todos los reactores, entonces sería complicado sacarlo para ser descargado por la forma o lugar en el que se encontraría dentro del equipo (se debe encontrar en un lugar central a los sifones). Por esta razón, sería necesaria una válvula de descarga en otro contenedor externo.

Todo lo anterior puede ser evitado si cada reactor cuenta con un depósito pequeño y accesible, y también liviano. Este contenedor podría vaciarse directamente en la tierra, disponiendo el digestato como fertilizante.

La inspección puede ser realizada en el depósito, y quitar algún material inadecuado de forma manual sería sencillo o se podría incluir una rejilla en el almacenamiento para que los materiales no deseados queden arriba, entre otras cosas.

12.10.2 Diseño propuesto para el Depósito de digestato

El diseño propuesto para el Depósito de digestato se encuentra disponible en la Figura 43. Sus planos serán presentados en la sección Configuración Final del Equipo.

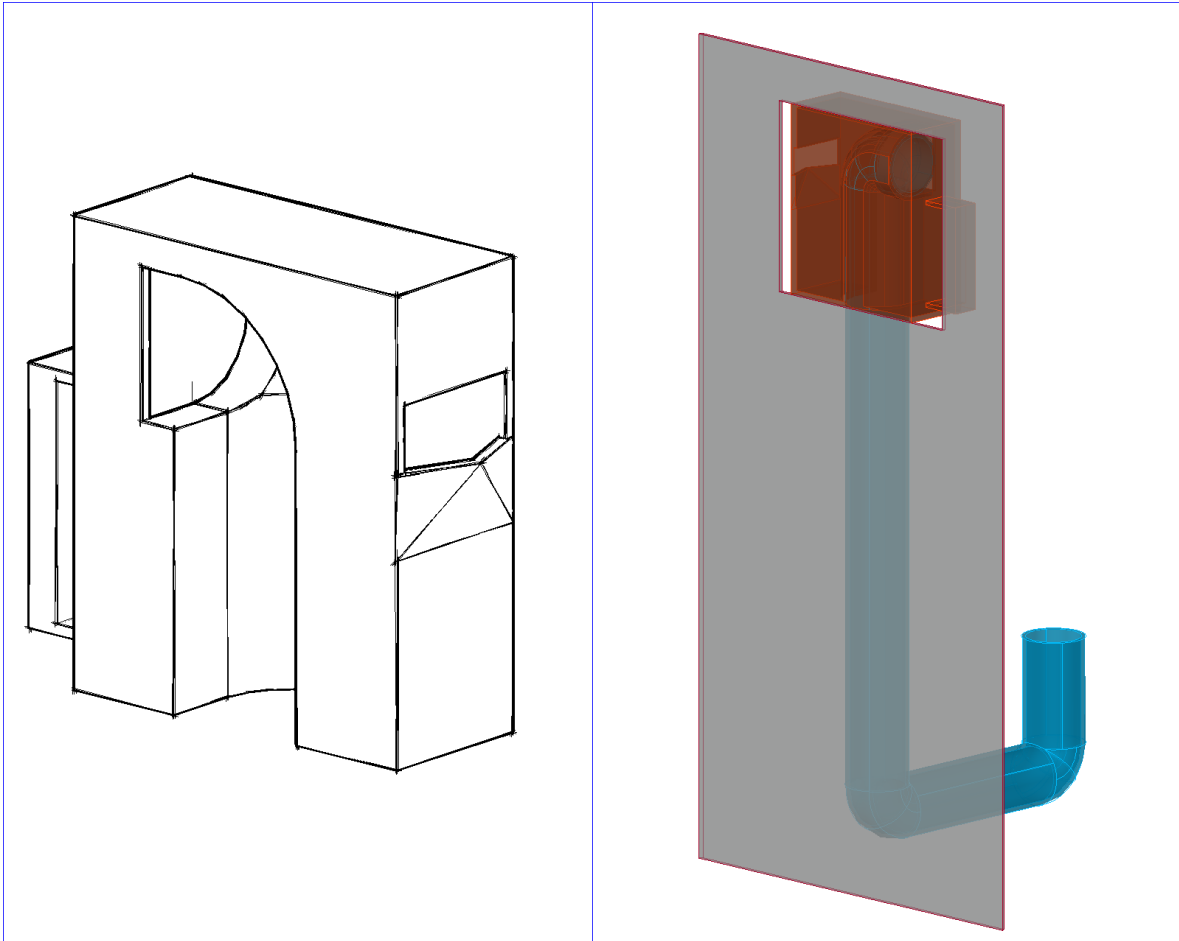


Figura 43. Vistas del diseño propuesto para el Depósito de digestato de cada reactor. El depósito para la recepción del digestato se ha marcado en anaranjado a la derecha, enmarcado en la pared del equipo que lo contiene. El depósito de digestato recibe el ducto que transporta la salida del reactor, de color celeste en la figura. A la izquierda se representa una vista isométrica del Depósito de digestato, con un asa para la manipulación, un orificio para el encaje del tubo que transporta el digestato, y una salida frontal para facilitar la operación del depósito de manera similar a un jarro.

12.11 MEDIDAS PARA LOS REQUERIMIENTOS TÉRMICOS

Como ya se ha mencionado en este capítulo, para mantener la temperatura mesofílica en el reactor, este y el depósito de alimentación se aíslan térmicamente y, además, este último se calienta con un intercambiador de calor que usa como fluido térmico los gases de combustión provenientes de la cocina.

El aislante asumido corresponde a lana mineral, que tiene una conductividad de $0,02 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$.

Los gases de combustión generados se transportan por un tubo aislado (con grosor de aislante 1,1 [cm]) hacia un serpentín que rodea la alimentación. Se asume que los gases de combustión ingresan al tubo a una temperatura de 787°C [61], y salen a 560°C, aproximadamente. Los gases ingresan al serpentín, que cubre la base de la alimentación y parte del manto, y permiten calentar la alimentación desde 25 [°C] a 55 [°C]. Se estima que los alimentos pierden calor por 8 [h] llegando a una temperatura de 50°C con una aislación de [5 cm], en este cálculo, sin embargo, no se han considerado las pérdidas de calor por evaporación, que podrían bajar la temperatura de forma considerable (al menos 5 [°C]).

Respecto a los reactores, suponiendo que la alimentación ingresa a 45 [°C], entonces se estima alcanza una temperatura final de 43[°C] con una aislación de 5 [cm]. Considerando que existe evaporación, la temperatura se reduce; suponiendo 5[°C] de reducción extra se lleva a 38[°C]. Así, las temperaturas que se presentan en el reactor son aceptables, pues se encuentran en el rango mesofílico. De todas formas, se requiere un cálculo más preciso.

Cabe mencionar que no existen aislantes entre las paredes de los reactores.

Los cálculos de esta sección se encuentran en Anexo V Cálculos de los requerimientos térmicos.

12.12 CONFIGURACIÓN FINAL DEL EQUIPO

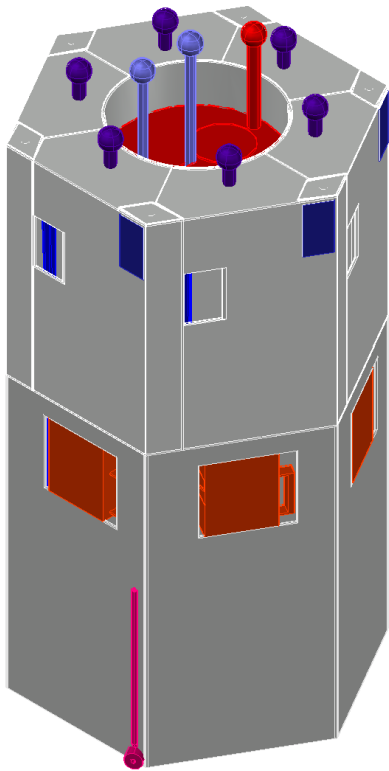
Para finalizar con el diseño del equipo, los componentes se distribuyen con el objetivo de ocupar el menor volumen posible, procurando que su altura sea adecuada para que una persona pueda operarlo, tanto los vástagos para alimentar, la palanca para agitar y el depósito de digestato que se remueve. Los cálculos de los volúmenes de los equipos componentes se encuentran en el Anexo W Cálculos de volúmenes y formas de componentes.

También se ha tenido presente la configuración de las paredes del equipo de forma tal que los reactores sean removibles del equipo por separado, así, es más fácil su traslado y, de fallar algún reactor, puede repararse más fácilmente o reemplazarse por otro. De este modo, cada uno de los reactores se acopla al sistema compuesto por el depósito de alimentación, las columnas de adsorción. Además, las conexiones de gas han sido pensadas para facilitar los desacoples.

Cabe mencionar que el equipo se sostiene sobre los reactores, por lo que sus paredes deben ser de un plástico estructural, con un grosor estimado de 3 [mm]. Con esto, es posible desacoplar del equipo 1 o 2 reactores a la vez, si se sacan más, posiblemente el equipo se desequilibre.

El diseño propuesto para el equipo completo se encuentra disponible en la Figura 44. El detalle de vistas se encuentra disponible en las siguientes secciones, que presentan los planos de cada componente y del equipo completo.

Isométrica



Planta

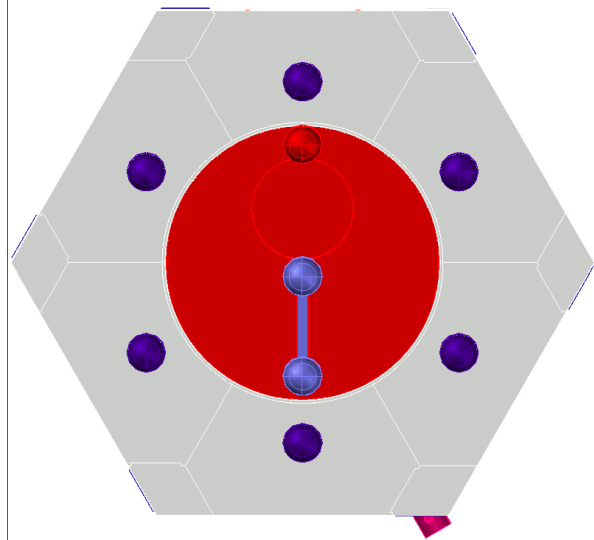
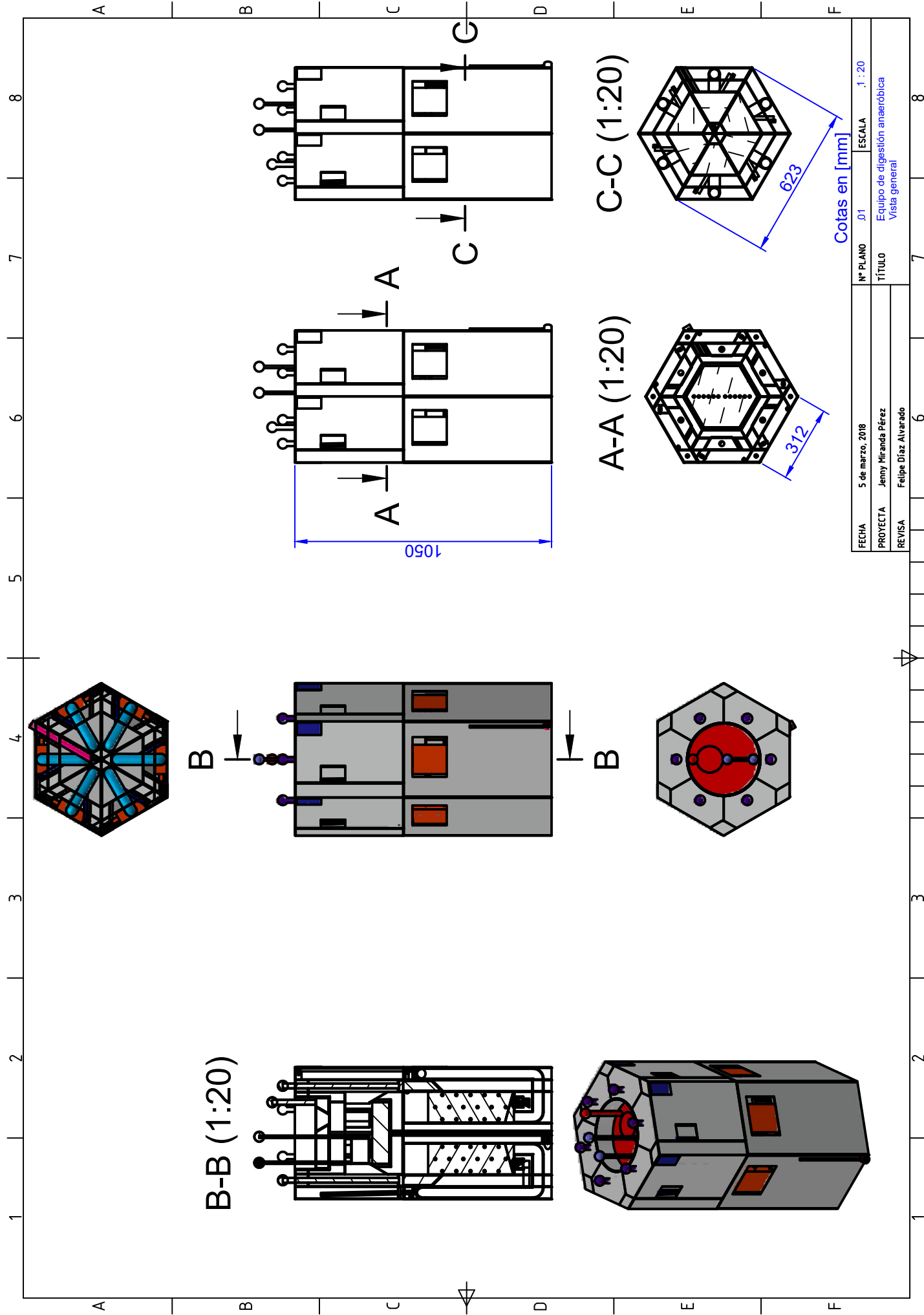


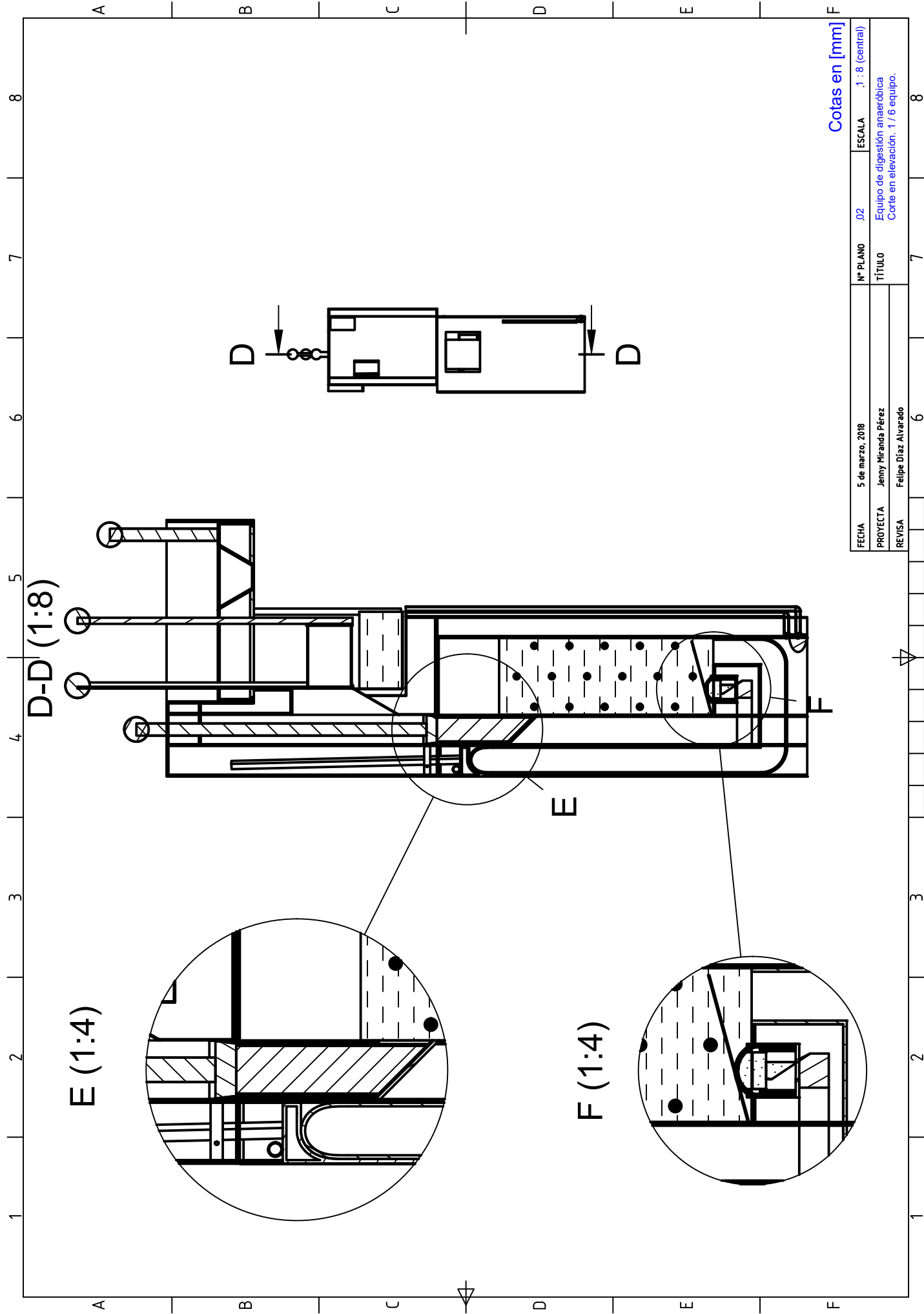
Figura 44. Vista general del diseño propuesto para la producción de biogás.



Cotas en [mm]

FECHA	5 de marzo, 2018	N° PLANO	.01	ESCALA	1:20
PROYECTA	Jenny Miranda Pérez	TÍTULO	Equipo de digestión anaeróbica		
REVISA	Felipe Díaz Alvarado	Vista general			





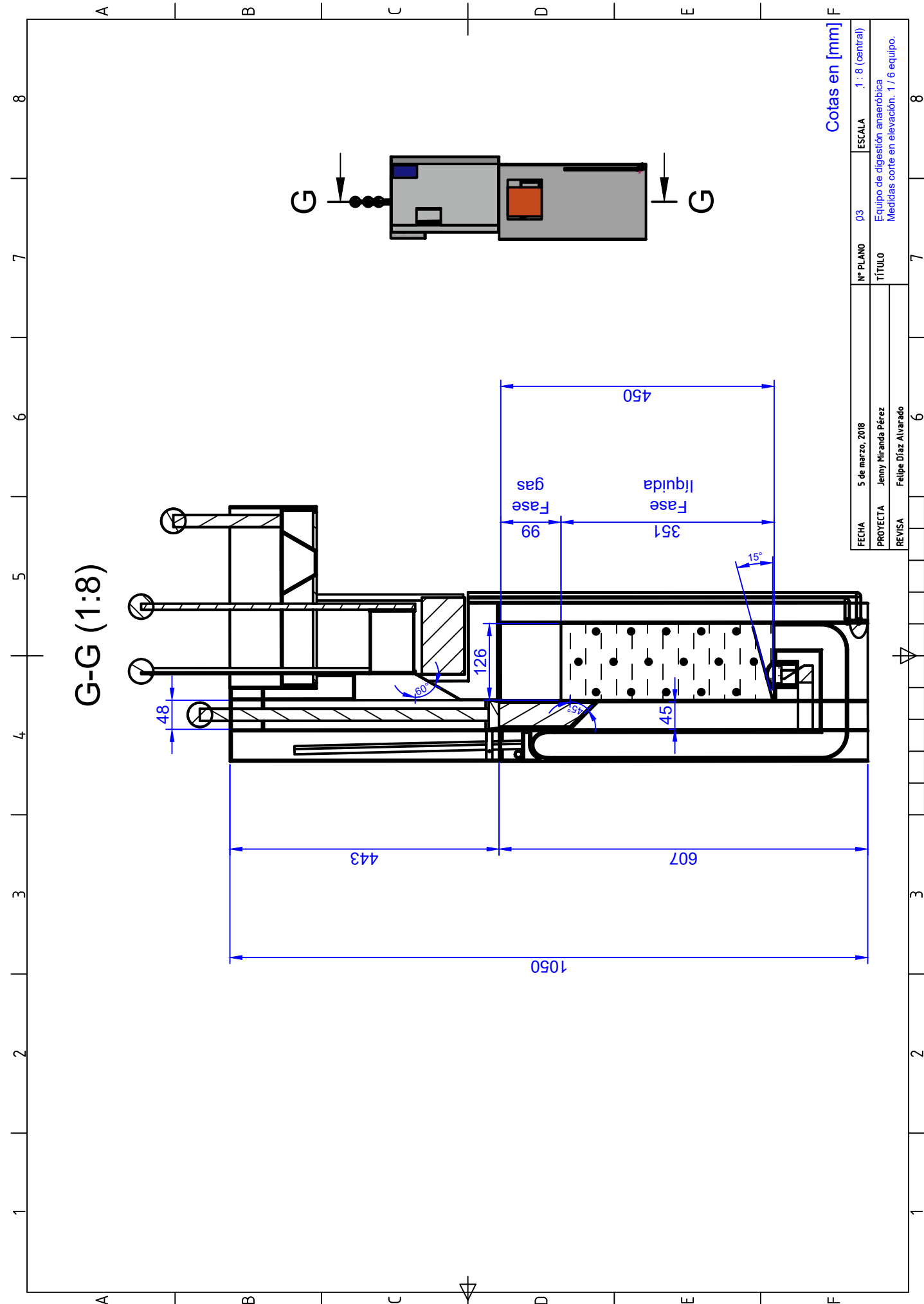
E (1:4)

D-D (1:8)

F (1:4)

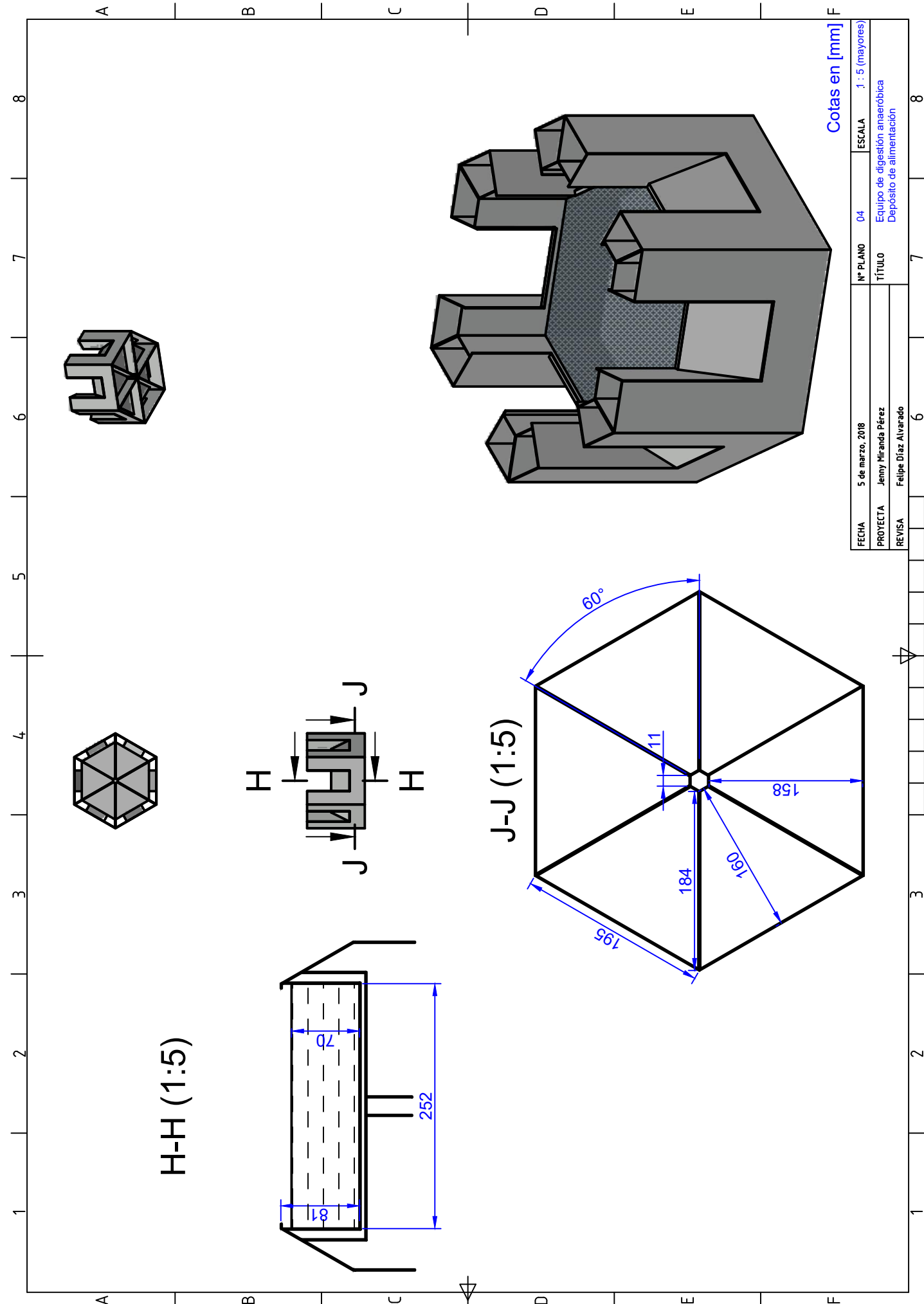
Cotas en [mm]

FECHA	5 de marzo, 2018	Nº PLANO	02	ESCALA	1 : 8 (central)
PROYECTA	Jenny Miranda Pérez	TÍTULO	Equipo de digestión anaeróbica Corte en elevación. 1 / 6 equipo.		
REVISAR	Felipe Díaz Alvarado				



FECHA	5 de marzo, 2018	N° PLANO	03	ESCALA	1 : 8 (central)
PROYECTA	Jenny Miranda Pérez	TÍTULO	Equipo de digestión anaeróbica		
REVISÓ	Felipe Díaz Alvarado		Medidas corte en elevación. 1 / 6 equipo.		

Cotas en [mm]



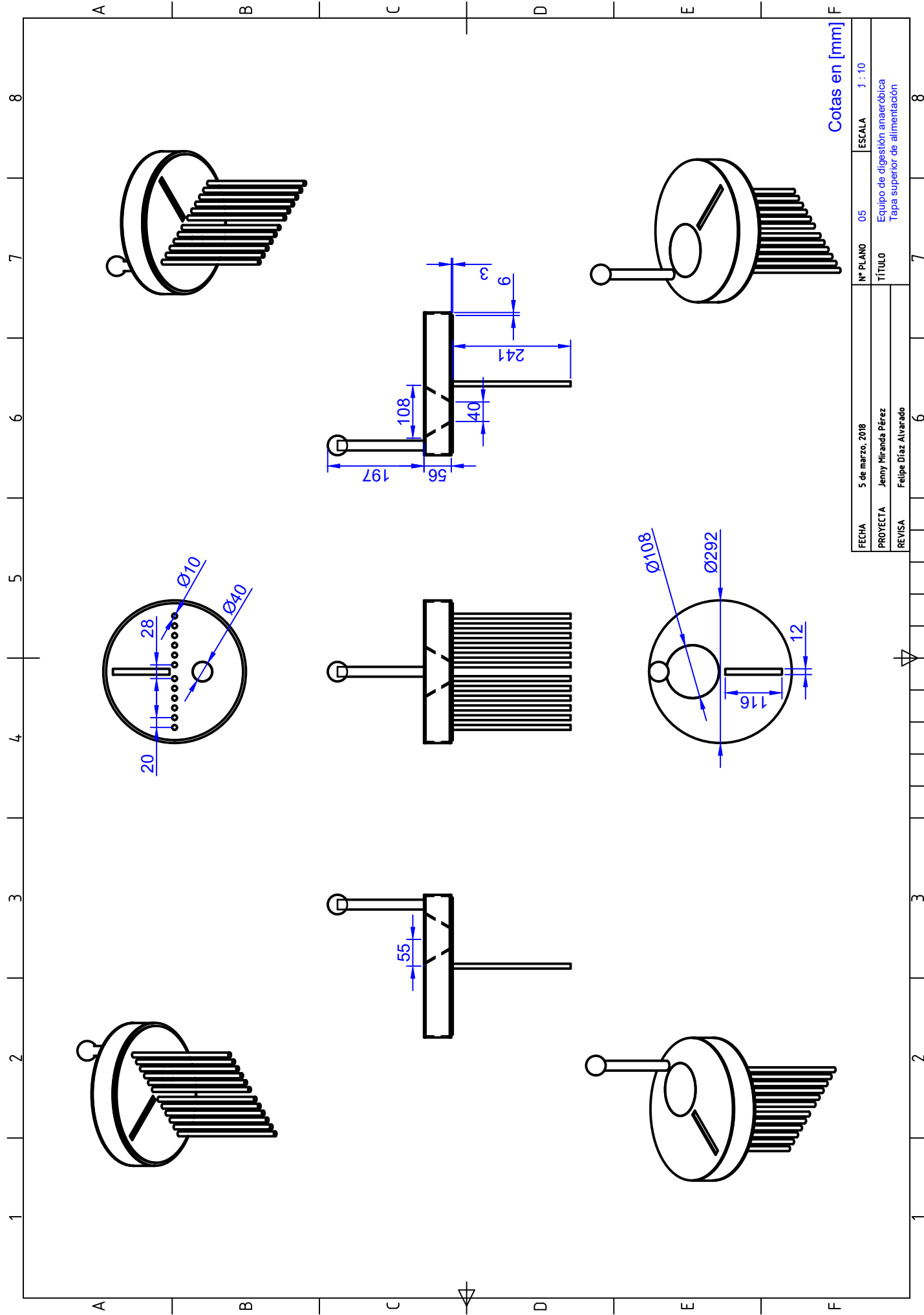
H-H (1:5)

J-J (1:5)

Cotas en [mm]

FECHA	5 de marzo, 2018	N° PLANO	04	ESCALA	1 : 5 (mayores)
PROYECTA	Jenny Miranda Pérez	TÍTULO Equipo de digestión anaeróbica Depósito de alimentación			
REVISAR	Felipe Díaz Alvarado				

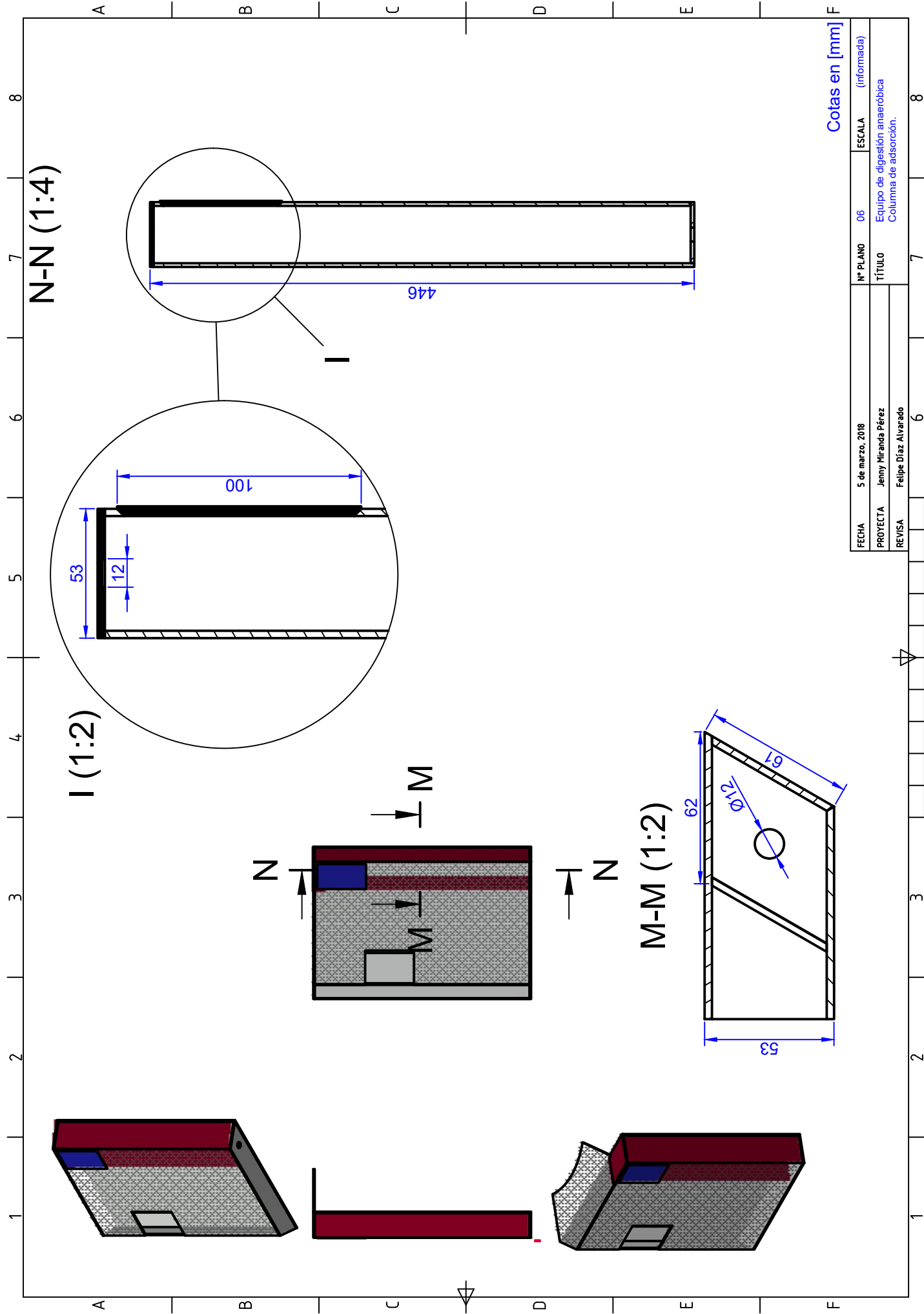




Cotas en [mm]

FECHA	5 de marzo, 2018	N° PLANO	05	ESCALA	1 : 10
PROYECTA	Jenny Miranda Pérez	TÍTULO			
REVISAR	Felipe Díaz Alvarado	Equipo de digestión anaeróbica Tapa superior de alimentación			

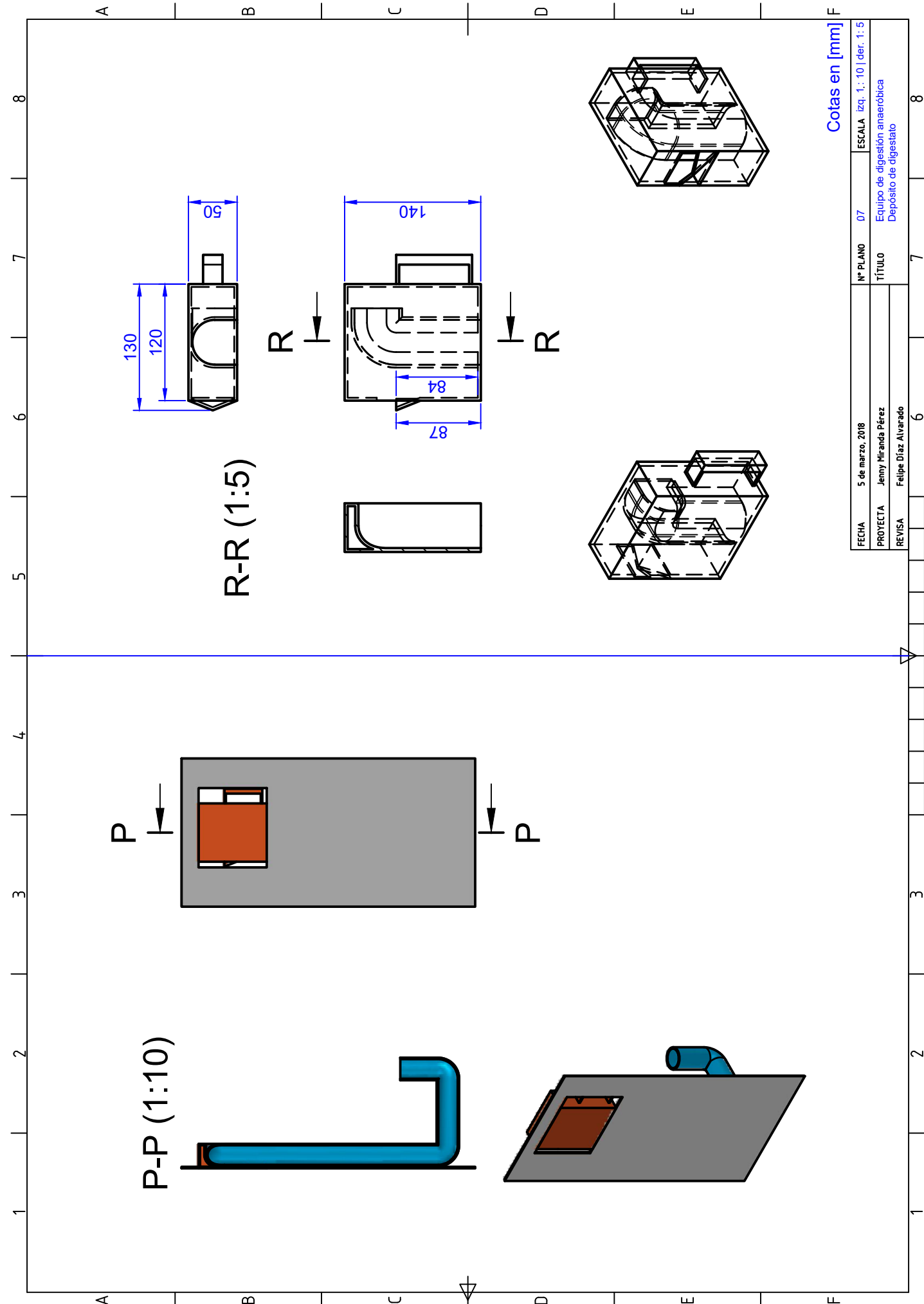




Cotas en [mm]

FECHA	5 de marzo, 2018	N° PLANO	06	ESCALA	(informada)
PROYECTA	Jenny Miranda Pérez	TÍTULO	Equipo de digestión anaeróbica		
REVISÓ	Felipe Díaz Alvarado		Columna de adsorción.		

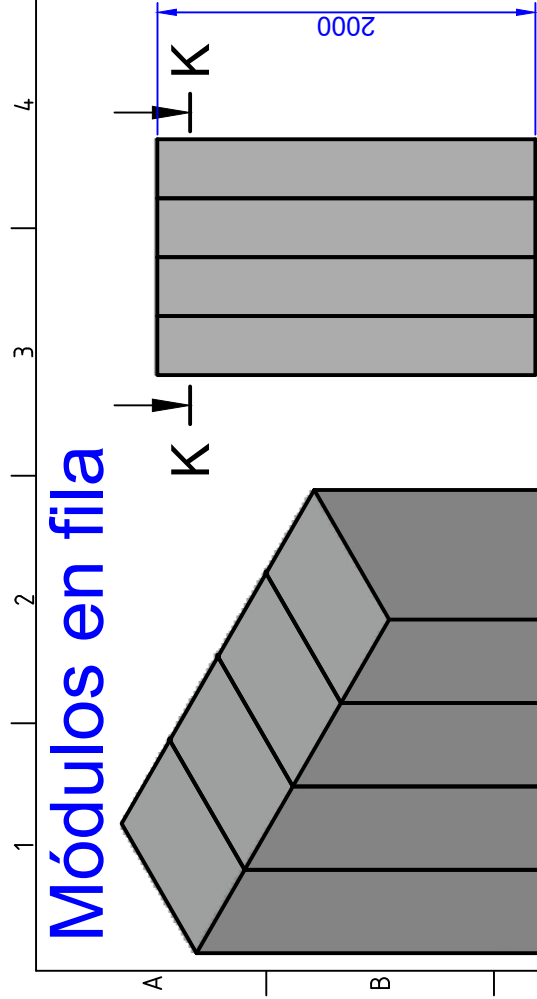




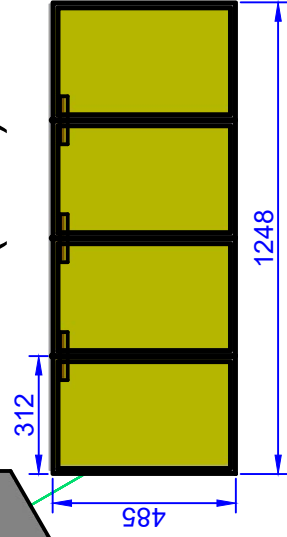
Cotas en [mm]

FECHA	5 de marzo, 2018	N° PLANO	07	ESCALA	izq. 1.: 10 der. 1.: 5
PROYECTA	Jenny Miranda Pérez	TÍTULO			
REVISA	Felipe Díaz Alvarado	Equipo de digestión anaeróbica Depósito de digestato			

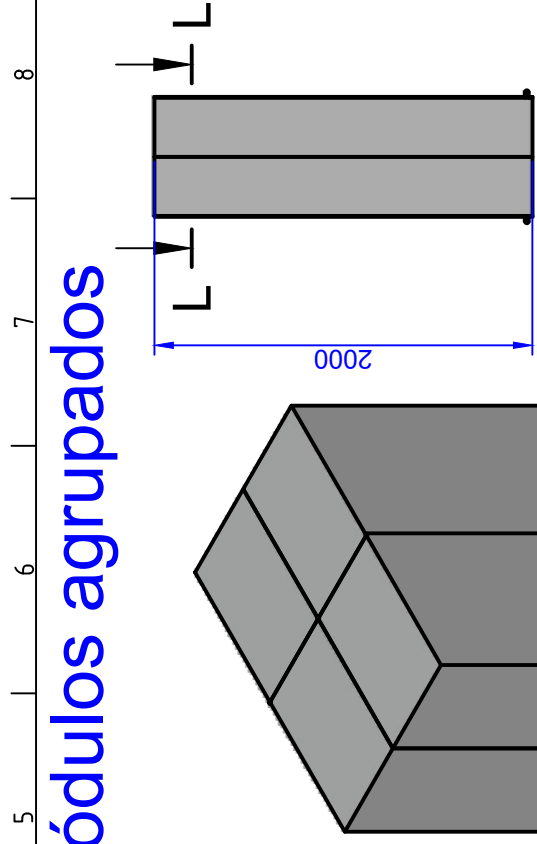
Módulos en fila



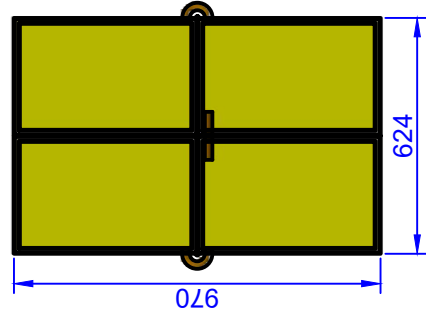
K-K (1:20)



Módulos agrupados

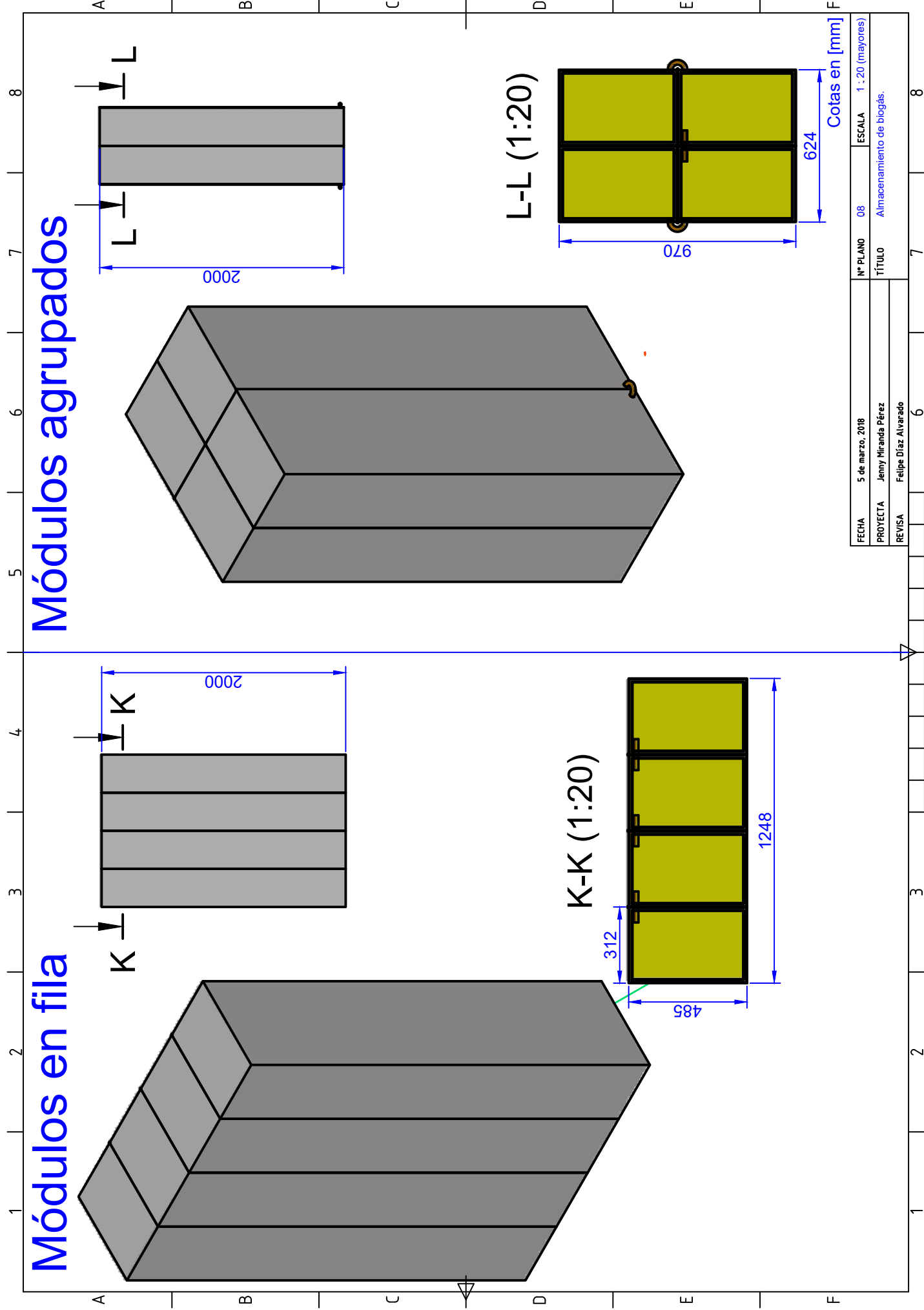


L-L (1:20)



Cotas en [mm]

FECHA	5 de marzo, 2018	Nº PLANO	08	ESCALA	1 : 20 (mayores)	
PROYECTA	Jenny Miranda Pérez	TÍTULO				Almacenamiento de biogás.
REVISA	Felipe Díaz Alvarado					



12.13 REFLEXIONES FINALES SOBRE EL DISEÑO

¿Cumple el diseño con las características mínimas? Se considera que cumple la mayoría, pero no todas:

1. El equipo tiene una **forma atractiva** y la sección de almacenamiento tiene forma y materiales llamativos, así que se concluye que es atractivo visualmente.
2. Genera digestato, así que se emite al menos una **sustancia positiva al ambiente**.
3. El equipo es **seguro**, pues tiene medidas para evitar escapes de gas y explosiones.
4. **No daña** objetos porque su forma externa tiene ángulos abiertos y no tiene puntos ni rincones prominentes.
5. Utiliza solo energías provenientes de la **actividad física humana**, y la **operación** es realizada por las personas: agitación de residuos, agitación de fase líquida del actor, alimentación de residuos y conminución de residuos.
6. La **operación es sencilla** considerando la complejidad de las operaciones realizadas, sin embargo, podrían ser mejoradas.
7. El equipo requiere de **otras materias primas**, cuyo **costo** rodea los \$11.000 [CLP], menor a la cota establecida.
8. La operación sí puede tomar un máximo **de 10 [min] al día**: la conminución toma 5 [min] y las demás acciones pueden ser ejecutadas en menos de 5 [min].
9. Los residuos **no requieren transporte** adicional al necesario para llevarlo al equipo, así que esta característica se cumple.
10. El equipo **no emite olores**, gracias a las medidas consideradas de sellos, y las personas no se **contactan con los residuos** en ningún momento, excepto cuando los generan, y tampoco son **perceptibles** dentro del equipo.
11. Se genera el **mínimo de emisiones negativas**, que corresponden a los gases de combustión, que de todas formas serían generados; y al carbón activado, luego de ser utilizado, una vez al año.
12. Finalmente, el **tamaño no es reducido**: el equipo (sin el depósito de biogás) ocupa un volumen de 331[l] y con depósito de biogás 1.330 [l]. Con este tamaño, posiblemente no pueda ser instalado en cualquier vivienda, y no se logra este objetivo. Se ha procurado, sin embargo, que la forma del depósito sea adaptable.

Cabe preguntarse si es posible que el equipo sea pequeño. Inicialmente, en el dimensionamiento, el sistema sin depósito de biogás tenía un volumen de 40 [l] aproximadamente, que se encuentra dentro de los rangos aceptables. Pero el volumen del depósito resultó ser muy grande. Luego del diseño, se agregaron más materiales, provocando con ello el aumento de tamaño del equipo. Posiblemente, la configuración del reactor, el depósito de alimentación y digestato, y columnas de adsorción puedan ser mejor configuradas para ocupar un volumen menor, pero todavía existirían los volúmenes extras debido a los aislantes.

Respecto al volumen de almacenamiento de biogás, este puede reducirse aumentando la presión del sistema y reduciendo el número de días de almacenamiento. Eso último podría ser factible si la conducta de consumo de biogás de las personas fuese constante y conocido, sin embargo, no lo es. El tiempo de respaldo en el almacenamiento podría ser reducido, pero causaría molestias importantes para algunas personas al verse forzadas a ocupar el biogás cada día; además, esto rompería el principio de respetar las relaciones entre espíritu y materia, establecido en la estrategia

de diseño. Sobre el aumento de presión en el sistema, esto podría realizarse con equipos auxiliares, muy sofisticados para el contexto domiciliario y altamente demandantes de energía. Por otro lado, la aislación podría reducirse si se contara con más energía para calentar, por ejemplo, la solar, pero no ha sido asumida como un recurso en este trabajo para adaptar el equipo a cualquier vivienda.

Así, dado el contexto y sus restricciones, no es posible que el equipo sea pequeño e instalable en cualquier vivienda. Para cumplir dicho objetivo, lo más conveniente sería cambiar el proceso de transformación o diseñar un equipo comunitario para las viviendas con espacio reducido. En este último caso, el objetivo del biogás podría ser redefinido para cubrir alguna necesidad de toda la comunidad, y podría quedar a cargo de alguna organización.

Otra alternativa, es que la solución sea diseñada considerando contextos locales: generar diferentes soluciones según contextos (no una solución masiva), permitiendo con ello el aprovechamiento de los recursos de cada contexto y reduciendo las restricciones. Note el lector que la solución propuesta en este trabajo es masiva para que todas las viviendas de la RM puedan implementarla, y para ello toma como restricciones las características más adversas de todos los contextos y utiliza solo los recursos más básicos.

Respecto al diseño del equipo, las **ideas centrales** afectaron de forma importante la forma final restringiendo la configuración de los componentes:

1. La primera idea central da cuenta del **tipo de operación del equipo**. Un sistema CSTR no hubiese requerido la lógica de operación diaria, ni tampoco hubiese requerido un depósito de alimentación, lo simplifica el diseño. Sin embargo, su costo habría estado ligado con la agitación, que debería haberse configurado de manera continua, constituyendo un problema importante y complejo. De todas formas, un reactor CSTR no es deseado porque no asegura la misma conversión para todas las partículas, pues fácilmente pueden existir cortocircuitos. En ese caso, habría que evaluar con mayor detención si es adecuado aplicar el digestato en la tierra.
2. Sobre las **pérdidas de calor en el sistema**, se hubiese preferido calentar el reactor y no el depósito de alimentación, pues es una acción más directa, pero no se realizó por el plazo de tiempo disponible. En ese entonces, sin embargo, se desconocía el efecto importante que provocaría la decisión de calentar la alimentación: rodear al depósito de los reactores. Cabe preguntarse, además, si proteger a la alimentación de pérdidas de calor es una idea tan fuerte como para configurar la forma del equipo completo. Se requiere un análisis más profundo de las transferencias de calor y alternativas de solución para poder dar respuesta a lo anterior.
3. Considerando que el **tamaño del equipo** es grande, modularizarlo en dos secciones es una idea bastante conveniente, pues permite más libertad al usuario para decidir la ubicación del equipo y factibiliza la **implementación** del equipo en algunos contextos.
4. La **forma** que adquirieron los reactores es poco simétrica, lo que provocó que las formas de los demás componentes fuesen también poco proporcionadas, lo que dificulta su construcción. Una alternativa que podría solucionar lo anterior es que los reactores también tengan forma de hexágonos.

El diseño realizado puede progresar, y se destacan las siguientes ideas:

1. La **operación del equipo** podría ser más simple, sin requerir de la precisión del usuario; usar palancas en vez de émbolos sería más sencillo.
2. El equipo cuenta con **espacios** subutilizados, como el sistema de recolección que provoca que el depósito tenga un volumen de gas grande que no es aprovechado la mayor parte del tiempo. Lo mismo aplica para el émbolo del reactor.
3. La **configuración final** del equipo no es ordenada: se prestó mucha atención al diseño de los componentes centrales, el depósito de alimentación y el reactor, y si se hubiese tenido una visión de conjunto, la distribución de las demás partes sería más armónica. Optimizar el espacio es complejo y requiere de esto último, pero es difícil tener dicha visión en la primera iteración del diseño del equipo.

Finalmente, cabe preguntarse si el equipo corresponde una solución TRIZ y Upcycle:

1. Respecto a **TRIZ**:

Se utilizaron en reiteradas oportunidades las herramientas y, de manera transversal en el diseño, se utilizó la lógica de solucionar el problema de forma conceptual y luego real, considerando los beneficios finales. Por otro lado, el pensamiento TRIZ ayudó a no mantener fija la primera idea, o retener aquella más común, o bien mantener la idea más popular en el grupo de diseño. Alrededor de cientos de veces se debió abandonar una idea y pasar a otra completamente distinta, con principios de funcionamiento incluso contrarios a la idea anterior, con el objetivo de obtener los beneficios deseados.

El problema abordado no fue sencillo, y la metodología permitió abordar el desafío y lograr una solución muy diferente a lo conocido actualmente. Posiblemente, sin la metodología de diseño se hubiese intentado adaptar las soluciones usuales para resolver el problema, aunque estas no tuviesen cabida porque no logran cumplir los beneficios que requiere el contexto específico abordado en este trabajo.

Se considera que el diseño no está completamente acabado, pues puede mejorarse considerablemente y la aplicación de TRIZ puede ser más íntegra. El resultado es, sin embargo, aceptable considerando la etapa de diseño.

Cabe mencionar que se ha omitido la etapa de generar múltiples soluciones: se optó por diseñar un equipo y no configurar versiones paralelas, para cumplir con los plazos establecidos. Este paso hubiese permitido discriminar la mejor solución final y se tendría un equipo mejor acabado.

2. Respecto a **Upcycle**:

Durante el diseño del equipo se cumplió notablemente el principio de situarse en el contexto, en particular en el contexto humano, pues el foco de atención siempre fue que la operación y la forma del equipo fuesen adecuadas para las personas. Además, entender las limitaciones del diseño ayudó a liberar con mayor facilidad las ideas que no resolvían el problema, en otras palabras, que no resultaban realistas.

Se destaca un flujo positivo: el atractivo del equipo. Se cumplió, además, el principio de intercambio de conocimientos y, es más, fue una de las herramientas que más ideas aportó al diseño, constituyendo uno de sus pilares.

Se considera que aún falta mucho para poder integrar la lógica Upcycle en el diseño, puesto que se requiere integrar con mayor profundidad los principios.

Como se ha mencionado, el diseño puede ser mejorado perfeccionando el funcionamiento y distribución de los componentes, y también profundizando la aplicación de las metodologías Upcycle y TRIZ. Más aún, queda por definir materiales apropiados y diseñar las operaciones unitarias de combustión e inspección y separación. Se estima que un diseño bien acabado, incluyendo ingeniería de detalle, podría tomar dos iteraciones más del diseño del equipo.

Teniendo presente todo lo anterior, se considera que el resultado obtenido es satisfactorio.

PARTE III

CIERRE DE LA SOLUCIÓN

Capítulo 13

REFLEXIONES SOBRE EL PROCESO CREATIVO

El Trabajo de Título ha estado sostenido en una metodología fundada en las estrategias de diseño Upcycle y TRIZ, que han sido aplicadas en sucesivos pasos presentados en los capítulos anteriores. Ya finalizando este trabajo, cabe preguntarse sobre la utilidad de dichas estrategias y su pertinencia en la ingeniería de procesos.

Las estrategias de diseño, si bien proponen una serie de pasos, son poco estructuradas y muy genéricas.

TRIZ explica en qué consisten cada uno de los pasos, pero los objetivos son poco específicos y queda a la interpretación de cada diseñador cómo llevarlos a cabo con las herramientas entregadas. Entender los pasos para un problema orientado en la ingeniería de procesos no es sencillo. En este trabajo se ha propuesto la estructura mencionada en la sección 2.3 Metodología de Trabajo, que ordena cada uno de los capítulos, con el fin de abordar los pasos, pero dicha estructura podría ser otra si otra persona los hubiese estructurado. Así, adaptar la metodología TRIZ a la ingeniería de procesos es un problema abierto.

Por otro lado, Upcycle propone metas generales que considerar en la solución y qué tener presente, pero no cómo lograrlas a través del diseño. La estrategia Upcycle plantea las bases mínimas sobre las cual construir una solución sustentable, por lo que es, más bien, una filosofía de diseño que un método de resolución, y quizá lo más oportuno es que sea entendida como tal. Queda sin resolver cómo poder integrar dichas bases.

A pesar de las dificultades encontradas en la aplicación de las estrategias, estas fueron de utilidad en el diseño del equipo. Sobre TRIZ, la idea que más influyó en el diseño fue la lógica de definir los beneficios deseados, pues permitió enfocar la atención a los objetivos, sin perderlos de vista; todo lo demás es innecesario. Perder de foco el objetivo es fácil en los grupos de diseño, porque se intentan resolver problemas derivados del original, que en realidad no son el problema central y que fácilmente podrían no existir con otra idea de resolución. TRIZ permitió generar soluciones muy diferentes a las convencionales; estas últimas siempre tienen un valor importante, pero deben ser consideradas como buenas ideas, y no necesariamente como las soluciones obvias a los problemas.

Sobre Upcycle, el aspecto más importante en el trabajo corresponde al respeto hacia el contexto humano, el usuario del equipo; esto influyó fuertemente en cómo realizar la operación del equipo y, con ello, discriminar en los sistemas más adecuados para resolver el funcionamiento del equipo. Sin embargo, esto pudo haber sido mejor logrado si se hubiese tenido la opinión de los futuros usuarios respecto al funcionamiento: qué es para ellos difícil de realizar y qué no. Esto último hubiese sido entender el contexto humano profundamente.

El equipo ha sido diseñado para un contexto verosímil, pero virtual, que recoge las características más limitantes de cada vivienda, para que la solución sea implementable en cualquiera de estas realidades. Esto provoca, sin embargo, que la solución no sea la mejor posible para cada contexto porque desaprovecha los recursos y exagera restricciones de algunos. El primer paso Upcycle, situarse en el contexto humano y natural, permite reflexionar sobre lo anterior: ¿para quién va dirigida la solución?, ¿para la mayoría?, ¿para la minoría? o ¿para todos? En TRIZ falta dicha claridad, porque tomando una decisión u otra, es o no posible aprovechar todos los recursos disponibles.

Se considera que el valor de las estrategias presentados corresponde a dejar explícito en qué debe fijarse el diseñador para resolver un problema, que son aspectos que podrían pasarse por alto fácilmente si nunca se han considerado antes.

¿Es pertinente utilizar las metodologías en la ingeniería de procesos? A juicio de la diseñadora, es siempre pertinente si se desea generar una solución que será implementada en la realidad.

¿Es pertinente el diseño en la ingeniería de procesos? En esta especialidad, las máquinas cumplen un rol primordial, en estas ocurren los cambios proyectados en la materia prima. Un ingeniero de procesos tiene claridad sobre cómo ocurren estos cambios y qué condiciones necesitan para llevarse a cabo. Fenómenos como las transferencias de masa y calor, la mezcla, entre otros, ocurren a nivel molecular, pero se ven altamente afectadas por el nivel macromolecular. En el trabajo, muchas de las formas y posiciones de los componentes del equipo tuvieron sus razones en dichos fenómenos. Para otros especialistas sería más sencillo olvidar las condiciones requeridas por el proceso y el efecto de las formas en estos. Sin embargo, hubo otros problemas asociados a partes y piezas que permiten manipular el equipo, directamente relacionados con la mecánica, que pudieron haber sido mejor resueltas con un especialista de esta área. Para obtener un diseño bien acabado, hasta la etapa de ingeniería de detalles, por supuesto, requiere de otros expertos.

Además de todo lo anterior, el diseño permite comprender la complejidad de la realidad y, con ello, qué supuestos es responsable asumir en el dimensionamiento de equipos. Una vez realizado el diseño del equipo es mucho más fácil comprender qué supuestos son posibles de lograr en la realidad, así, si se realizaran nuevamente los cálculos, los supuestos tomarían un peso importante y no podrían ser todos asumidos.

Con todo lo anterior se responde: sí, el diseño es pertinente en la ingeniería de procesos.

Ahora bien, una razón aún más fundamental que las presentadas anteriormente es: si la ingeniería de procesos resuelve problemas reales, entonces requiere del diseño para que dichas soluciones se lleven a cabo.

En un ejercicio cotidiano de ingeniería de procesos las soluciones propuestas están basadas en ideas concebidas hace décadas, pero la sociedad y la naturaleza han cambiado desde entonces, luego ¿ha entregado esta disciplina las mejores soluciones posibles a los problemas que aquejan al planeta? Considerando la situación actual, posiblemente no. Estará de acuerdo el lector en que vale la pena repensar las soluciones desde el diseño.

Así, un ejercicio responsable de la ingeniería moderna podría dedicar esfuerzos en actualizar las metodologías de resolución de problemas. Aún queda mucho por mejorar las técnicas de diseño.

Capítulo 14

CONCLUSIONES GENERALES

Este trabajo ha buscado concebir y diseñar un equipo que permita aprovechar los residuos a nivel domiciliario, utilizando las herramientas de diseño Upcycle y TRIZ, para su adaptación a usuarios en diferentes contextos de la Región Metropolitana (RM). El propósito de lo anterior ha sido aportar en la resolución del problema de manejo de los residuos sólidos municipales en la zona.

En el análisis del contexto del problema, se utilizó información de la literatura y bases de datos del Estado, y también se realizó una encuesta para resolver la ausencia de información. Esta encuesta no es representativa de la RM y puede ser mejorada aumentando la muestra, pero constituye una solución responsable frente a la falta de datos y la necesidad de definir un contexto para el diseño. Se obtuvo los resultados presentados en la Tabla 73.

Tabla 73: Conclusiones del análisis del contexto.

Flujo promedio de residuos por vivienda	1,6 $\left[\frac{kg}{día}\right]$.
Composición de los residuos	Plásticos (5,5%), orgánicos (46,6%), vidrios (20,9%), papeles y cartones (5,7%), metales (4,9%) y otros (16,5%).
Características físicas y sociales más restrictivas	Espacio reducido, carencia de agua potable, energías (combustibles y electricidad) e infraestructura, presencia de personas muy jóvenes y ancianas, condiciones ambientales adversas, carencia de luz solar y objetos, y molestia en las personas por trasladar sus residuos.
Otras informaciones	La mayoría de los usuarios separaría sus residuos.

Luego, las características del equipo son las que se muestran en la Tabla 74. Los beneficios corresponden a las características deseadas; los costos, a gastos aceptables para lograr dichos beneficios; y los daños, a cualquier otra característica aceptada, mas no es buscada.

Tabla 74: Conclusiones sobre las características del contexto.

Beneficios	Aprovechar residuos en beneficio de las personas y/o naturaleza, poder ser instalado en cualquier vivienda de la RM, tratar un tipo de residuo, ser atractivo visualmente, emitir al menos una sustancia positiva al medio ambiente, ser seguro para personas y objetos, y resistir condiciones ambientales adversas y una operación deficiente.
Costos	Espacio, energía proveniente del esfuerzo físico de las personas, otras materias primas además de los residuos, dinero para la operación (máximo \$1.000[CLP] al mes) y tiempo para la operación (máximo 10 [min] al día).
Daños	Molestias diferentes a: olores desagradables, traslado de residuos, y contacto con los residuos u otro tipo de percepción. Emisiones negativas e interferir con la conducta normal de los usuarios.

A partir de un análisis de impacto ambiental y social, y considerando los residuos que se disponen en relleno sanitario, se concluyó que los residuos a tratar por el equipo son los residuos orgánicos (residuos de alimento, poda y jardín). Se escogió un caso base de $600 \left[\frac{g}{día} \right]$ a partir de los flujos de residuos generados en las viviendas, considerando el posible tamaño del equipo y el tiempo de residencia del proceso.

Se definió que el equipo genere biogás para cocinar a partir del proceso biológico de digestión anaeróbica, tomando en consideración un análisis de factibilidad del proceso, utilidad del producto y posibles impactos de la decisión.

Se realizó un estudio de los fundamentos de la digestión anaeróbica, y se concluyó la necesidad de reducir el tamaño de partícula de la materia prima hasta $1 - 2 [mm]$ y de limpiar el biogás generado debido a la presencia de ácido sulfhídrico, principalmente; y que el digestato producido (subproducto líquido) no requiere postratamiento y puede ser aplicado en la tierra. Además, se logró establecer las condiciones mínimas de la materia prima y del proceso, entre ellas: proporción promedio de carbono y nitrógeno de la materia prima igual a 30 y humedad mínima del 55%, y temperatura mesofílica ($35 - 40^{\circ}C$).

El análisis del Estado del Arte permitió concluir que la separación de residuos y la agitación pueden ser logradas gracias a la baja escala del equipo; y que los reactores más apropiados para llevar a cabo el proceso son batch con agitación y PFR.

A partir de los fundamentos del proceso, se determinaron las operaciones unitarias incluidas en el límite de batería del equipo y se dimensionaron los componentes del equipo que permiten llevarlos a cabo. En la Tabla 75 se muestran los resultados. Cabe destacar que las dimensiones volumétricas no incluyen las paredes, aislantes, etc. A partir de lo anterior, se concluyó que el tamaño total del equipo es $1.040 [l]$, valor que se encuentra sobreestimado. Además, se determinó que el biogás generado por el proceso es, en promedio, $9,8 \left[\frac{l}{día} \right]$, con un rendimiento de $193 \left[\frac{l}{kg \text{ materia prima}} \right]$.

Tabla 75: Conclusiones sobre las operaciones unitarias y dimensionamiento.

	Operación unitaria	Componente	Dimensiones
Materia prima	Dosificación	No requiere equipo	-
	Conminución	Molino de cuchillos	Potencia: 42.595 $\left[\frac{kg}{día}\right]$ Tiempo de operación: 5,14 $\left[\frac{min}{día}\right]$
	Almacenamiento de la alimentación	Depósito de alimentación	Volumen: 3,82 [l]
	Mezcla de residuos		
	Mezcla con agua	Operación innecesaria	
	Mezcla con digestato	Reactor de digestión anaeróbica	Volumen: 30,6 [l] Tiempo de residencia: 6 [días] Flujo de reciclo (digestato): 3 $\left[\frac{l}{día}\right]$
	Digestión anaeróbica		
Biogás	Adsorción	Columnas de adsorción	Masa adsorbente: 1,50 [kg]
	Almacenamiento de biogás	Depósito de biogás	Volumen: 1.000 [l]
	Combustión de biogás	Operación no abordada	
Digestato	Inspección	Operación no abordada	
	Separación	Operación no abordada	
	Almacenamiento de digestato	Depósito de digestato	Volumen: 2,5 [l]

Considerando todo lo anterior, se diseñó el equipo utilizando las metodologías Upcycle y TRIZ. Se obtuvo un equipo de 1331 [l], compuesto por secciones separadas: la sección 1 que reúne todos los componentes excepto el depósito de biogás, y la sección 2 que corresponde a este último. Las características generales de ambas se muestran en la Tabla 76.

Tabla 76: Conclusiones ligadas al diseño del equipo.

Sección 1	Es un prisma hexagonal, cuya relación altura:ancho es de 3,3 y tiene un volumen total de 331 [l] .
	El depósito de alimentación ocupa el centro del hexágono, y la rodea un serpentín que permite calentar los residuos antes de entrar al reactor.
	Contiene 6 reactores batch donde se lleva a cabo la digestión anaeróbica, que se ubican alrededor del depósito de alimentación, completando la figura hexagonal.
	Existe una columna de adsorción y un depósito de digestato para cada reactor, y se han ubicado en espacios entre las unidades principales, mencionadas anteriormente.
	Las unidades principales están cubiertas por aislantes para evitar pérdidas de calor.
	La agitación de los reactores y el depósito de alimentación, y el transporte de residuos entre unidades, ocurren gracias a la operación del usuario, a través del uso de vástagos y palancas.
Sección 2	El depósito de biogás está compuesto por 4 módulos conectados, para adaptar la forma del equipo a diferentes espacios. Cada módulo tiene forma de paralelepípedo cuya relación ancho:largo:alto es 1: 1,5: 6,4. El volumen total es de 1.000 [l]

El equipo cumple con todas las características proyectadas, excepto con tener un tamaño reducido. Si bien el equipo está bien adaptado a lugares espaciosos, la principal deuda es la adaptación a entornos pequeños. Para lograr la adaptación a diferentes contextos de forma cabal, se proponen soluciones comunitarias para viviendas con espacios restringidos, cambiar el tipo de tratamiento o generar soluciones locales (no masivas).

Para lograr un diseño acabado se propone realizar dos iteraciones más del diseño. Siendo esta la primera fase, se considera que el resultado obtenido se encuentra completo, está bien sostenido y es satisfactorio. La solución puede ser mejorada en las próximas fases simplificando la operación, y optimizando el uso de espacios y la disposición de los componentes de los equipos. También se deberán resolver las operaciones unitarias inconclusas.

Las metodologías de diseño fueron integradas en el trabajo, y permitieron obtener una solución muy distinta a las tradicionales respecto a su funcionamiento, formas y adaptación al usuario.

Respecto a las metodologías de diseño, se concluye que ambas son generales y poco estructuradas, y deben ser mejoradas para su aplicación en la ingeniería de procesos. Se destacan como aspectos relevantes del diseño el respeto hacia el contexto humano y el enfoque en los objetivos, promovidos por Upcycle y TRIZ, respectivamente.

Finalmente, la ingeniería de procesos podría profundizar su ejercicio en el diseño para dar mejores respuestas para los problemas actuales del planeta, en todo ello las metodologías utilizadas en este trabajo podría cumplir un rol importante.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] BENÍTEZ, M. 2010. Primer reporte del manejo de residuos sólidos en Chile. Comisión Nacional del Medio Ambiente-Gobierno de Chile. [en línea]. : 64. <http://www.sinia.cl/1292/articles-49564_informe_final.pdf>
- [2] ORGANIZACION DE LAS NACIONES UNIDAS. Glosario de estadísticas del medio ambiente. 1997.
- [3] MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE. 2011. Capitulo 3: Residuos. Informe del estado del medio ambiente 2011. : 135–165.
- [4] TCHOBANOGLOUS, George et al. 1982. Desechos sólidos: Principio de ingeniería y administración. : 216.
- [5] HOORNWEG, Daniel y BHADA, Perinaz. 2012. What a Waste. A Global Review of Solid Waste Management. Urban development series knowledge papers [en línea]. 281(19): 44 p. ISSN 1742-4658. 10.1111/febs.13058
- [6] WILLIAMS, Paul T. 2005. Waste Treatment and Disposal [en línea]. 1-380 p. ISBN 0470849126. 10.1002/0470012668
- [7] BANCO INTER-AMERICANO DE DESARROLLO. 2009. Manejo de Residuos Sólidos. : 54.
- [8] SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN AMBIENTAL. Tecnologías De Tratamiento Y Disposición Final De Residuos Sólidos Domiciliarios. 2001.
- [9] MINISTERIO DEL MEDIO AMBIENTE, Chile. Ley 20920: ESTABLECE MARCO PARA LA GESTIÓN DE RESIDUOS, LA RESPONSABILIDAD EXTENDIDA DEL PRODUCTOR Y FOMENTO AL RECICLAJE. 2016
- [10] TRIZ INNOVATION CENTRE. TRIZ [en línea]. <<https://www.triz.co.uk/what>>.
- [11] ILEVARE, Imoh M. et al. 2013. A review of TRIZ, and its benefits and challenges in practice. Technovation [en línea]. 33(2–3): 30–37. ISSN 01664972. 10.1016/j.technovation.2012.11.003
- [12] BUKHMAN, Isak. 2012. TRIZ Technology for Innovation.
- [13] TRIZ. Método TRIZ [en línea]. <<http://www.triz.net/metodoQuees.html>>.
- [14] THE EUROPEAN TRIZ ASSOCIATION. TRIZ academic institutions [en línea]. <http://etria.eu/documents/TRIZ_academic_institutions.pdf>.
- [15] BRAUNGART, Michael. sin fecha. About Michael Braungart [en línea]. <<http://www.braungart.com/en/content/about-michael-braungart>>
- [16] MCDONOUGH, William y BRAUNGART, Michael. sin fecha. The Upcycle: Beyond Sustainability - Designing for Abundance.
- [17] MCDONOUGH, William. Cradle to Cradle Products Innovation Institute [en línea]. <<http://www.mcdonough.com/organizations/cradle-cradle-products-innovation-institute/>>.

- [18] MCDONOUGH, William. Creators of Cradle to Cradle®, MBDC, Partner with L'Oréal USA to Achieve Sustainability Milestones in Beauty Industry [en línea]. <<http://www.mcdonough.com/creators-cradle-cradle-mbdc-partner-loreal-usa-achieve-sustainability-milestones-beauty-industry/>>.
- [19] MCDONOUGH, William. MBDC Assesses First Cradle to Cradle Certified™ GOLD T-Shirts [en línea]. <<http://www.mcdonough.com/mbdc-assesses-first-cradle-cradle-certified-gold-t-shirts/>>.
- [20] TRIZ INNOVATION CENTRE. Contradiction Matrix [en línea]. <https://www.triz.co.uk/files/oxfordtriz_contradictions_matrix.pdf> [consulta: 22 marzo 2018].
- [21] INE CELADE. Chile: Censo Nacional de Población y Vivienda [en línea]. <<http://espino.ine.cl/cgi-bin/RpWebEngine.exe/PortalAction?&MODE=MAIN&BASE=CPCHL2KCOM&MAIN=WebServerMain.inl>>.
- [22] ADIMARK. MAPA SOCIOECONÓMICO DE CHILE: Nivel socioeconómico de los hogares del país basado en datos del Censo [en línea]. <http://www.adimark.cl/medios/estudios/mapa_socioeconomico_de_chile.pdf> [consulta: 10 septiembre 2017].
- [23] ADÁN, Daniela. Diseño de un modelo de evaluación de competencias específicas y genéricas a partir de un perfil de egreso. Caso de estudio: Carrera de Ingeniería Civil Química de la Universidad de Chile [en línea]. 2014. <<http://www.repositorio.uchile.cl/handle/2250/116879>>
- [24] OECD. OECD Glossary of Statistical Terms - Ecological impact Definition [en línea]. <<https://stats.oecd.org/glossary/detail.asp?ID=718>> 2001 [consulta: 9 diciembre 2017].
- [25] FRISCHKNECHT, Rolf et al. 2006. Swiss Ecological Scarcity Method : The New Version 2006. Cycle [en línea]. (May 2014): 4. <<http://www.esu-services.ch/download/Frischknecht-2006-EcologicalScarcity-Paper.pdf>>
- [26] JIMÉNEZ, Tatiana. 2016. EVALUACIÓN AMBIENTAL DE ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS DE APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE RESIDUOS FORESTALES MEDIANTE ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA [en línea]. [consulta: 5 marzo 2018]. Universidad de Chile. 94 p. <<http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/139908/Evaluacion-ambiental-de-alternativas-tecnologicas-de-aprovechamiento-energetico-de-residuos-forestales.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>
- [27] EPA AUSTRALIA. 2016. Environmental Protection Authority Statement of Environmental Principles, Factors and Objectives [en línea]. [consulta: 9 diciembre 2017]. <http://www.epa.wa.gov.au/sites/default/files/Policies_and_Guidance/Statement_of_Environmental_Principles%2C_factors_and_objectives_Dec16_1.pdf>
- [28] VALENZUELA-VENEGAS, Guillermo et al. 2016. Sustainability indicators for the assessment of eco-industrial parks: classification and criteria for selection. Journal of Cleaner Production [en línea]. 133: 99–116 [consulta: 5 marzo 2018]. ISSN 0959-6526. 10.1016/J.JCLEPRO.2016.05.113
- [29] CUETO, Andrés. 2017. EVALUACIÓN DE TECNOLOGÍAS PARA LA REUTILIZACIÓN,

VALORIZACIÓN Y DISPOSICIÓN DE RESIDUOS ORGÁNICOS. Universidad de Chile. 117 p.

- [30] BELMAR, Angelo. 2014. Diseño de un reactor continuo de gasificación de biomasa [en línea]. Universidad de Chile. <<http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/132303/Diseno-de-un-reactor-continuo-de-gasificacion-de-biomasa.pdf?sequence=1>>
- [31] HAUG, Roger Tim. 1993. The practical handbook of compost engineering. Lewis Publishers. 717 p. ISBN 9780873713733.
- [32] HIJOSA, Carmen. Piñatex [en línea]. <<https://www.ananas-anam.com/>> [consulta: 13 noviembre 2017].
- [33] MEERKERK, Koen y DE BOON, Hugo. The Project – Fruit leather Rotterdam [en línea]. <<http://fruitleather.nl/home/project/>> [consulta: 13 noviembre 2017].
- [34] PACHECO, Gina et al. 2014. Bioplásticos. BioTecnología [en línea]. 18(2): 27–36. <http://www.smbb.com.mx/revista/Revista_2014_2/bioplasticos.pdf>
- [35] HEE-OCK BOO, SUNG-JIN HWANG, CHUN-SIK BAE, SU-HYUNPARK, BUK-GU HEO, Shela Gorinstein. 2012. Extraction and characterization of some natural plant pigments. Industrial Crops and Products [en línea]. 40: 129–135 [consulta: 13 noviembre 2017]. ISSN 0926-6690. 10.1016/J.INDCROP.2012.02.042
- [36] CELIZ, Álvaro et al. 1983. Agronomía colombiana. [en línea]. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Agronomía [consulta: 13 noviembre 2017]. ISSN 0120-9965. <<http://www.redalyc.org/html/1803/180314729012/>>
- [37] URQUIZA, Anahí. Pobreza energética en Chile: ¿un problema invisible? - Universidad de Chile [en línea]. <<http://www.uchile.cl/noticias/136618/pobreza-energetica-en-chile-un-problema-invisible>> [consulta: 16 noviembre 2017].
- [38] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. 2014. Energy Prices and Taxes. Quarterly Statistics. [en línea]. (Second Quarter 2014): 384. ISSN 0256-2332. 10.1787/energy_tax-v2013-4-en
- [39] EL CRONISTA. Chile y Colombia, los países que más pagan por energía en América Latina [en línea]. <<https://www.cronista.com/ripe/Chile-y-Colombia-los-paises-que-mas-pagan-por-energia-en-America-Latina-20160825-0034.html>> 2016 [consulta: 16 noviembre 2017].
- [40] ORGANIZACIÓN PARA LA COOPERACIÓN Y EL DESARROLLO ECONÓMICOS (OCDE). sin fecha. Todos Juntos. ¿Por qué reducir la desigualdad nos beneficia? [en línea]. [consulta: 15 noviembre 2017]. <www.oecd.org/social/inequality-and-poverty.htm>
- [41] WELLINGER, Arthur et al. 2013. The Biogas Handbook: Science, Production and Applications. 1st ed. 512 p. ISBN 9780857097415.
- [42] ENVIRONMENT CANADA. 2013. Technical Document on Municipal Solid Waste Organics Processing [en línea]. 220 p. ISBN 9781100217079. <www.ec.gc.ca>
- [43] HAUG, Roger. 1993. The Practical Handbook of Compost Engineering. 752 p. ISBN 9780873713733.
- [44] UNITED STATES DEPARTMENT OF CULTURE AGRICULTURAL RESEARCH SERVICE. USDA Food Composition Database [en línea]. <<https://ndb.nal.usda.gov/ndb/>> [consulta: 5 marzo 2018].

- [45] TOWLER, Gavin y SINNOTT, R. K. 2012. Chemical Engineering Design. 1320 p. ISBN 9780080966601.
- [46] GREEN, Don W. y PERRY, Robert H. 2008. Perry's Chemical Engineers' Handbook [en línea]. Eighth Edi. New York. McGraw-Hill. 2700 p. 9780071422949
- [47] NEVILLE, Vernon et al. sin fecha. Influence of crank length and crank-axle height on standing arm-crank (grinding) power [en línea]. 42(2): 381–387 [consulta: 24 febrero 2018]. <<https://dspace.lboro.ac.uk/2134/6746>>
- [48] APPELS, Lise et al. 2008. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. Progress in Energy and Combustion Science [en línea]. 34(6): 755–781. ISSN 03601285. 10.1016/j.peccs.2008.06.002
- [49] FILLMORE, Lauren et al. 2014. Anaerobic Digestion Model N°1. 1(13).
- [50] KRISCHAN, J. et al. 2012. Design and scale-up of an oxidative scrubbing process for the selective removal of hydrogen sulfide from biogas. Journal of Hazardous Materials [en línea]. 215–216: 49–56 [consulta: 24 febrero 2018]. ISSN 0304-3894. 10.1016/J.JHAZMAT.2012.02.028
- [51] TIPPAYAWONG, N. y THANOMPONGCHART, P. 2010. Biogas quality upgrade by simultaneous removal of CO₂ and H₂S in a packed column reactor. Energy [en línea]. 35(12): 4531–4535 [consulta: 24 febrero 2018]. ISSN 0360-5442. 10.1016/J.ENERGY.2010.04.014
- [52] MINISTERIO DE ENERGÍA. Decreto 119: APRUEBA REGLAMENTO DE SEGURIDAD DE LAS PLANTAS DE BIOGÁS E INTRODUCE MODIFICACIONES AL REGLAMENTO DE INSTALADORES DE GAS [en línea]. 2016. <<https://www.leychile.cl/N?i=1099847&f=2017-07-01&p=>>
- [53] BANDOSZ, Teresa J. 2002. On the Adsorption/Oxidation of Hydrogen Sulfide on Activated Carbons at Ambient Temperatures. Journal of Colloid and Interface Science [en línea]. 246(1): 1–20 [consulta: 25 febrero 2018]. ISSN 0021-9797. 10.1006/JCIS.2001.7952
- [54] HOME BIOGAS INC. Homebiogas | Household Biogas Digester System [en línea]. <<https://homebiogas.com/>> [consulta: 25 febrero 2018].
- [55] GOLDEN LIGHT KITCHENWARE MFG. LTD. PS-323H:manual grinder - 佛山市顺德区高达莱日家用电器有限公司-官网 - golden-light - 一家手动厨房用品制造企业. [en línea]. <http://www.golden-light.com/en/?PRODUCTS/NEW_PRODUCTS/PS-323H%3Amanual_grinder> [consulta: 27 febrero 2018].
- [56] SUSHI ROBOTS. KS360 - Mezclador del arroz - KUBOTA | Sushi Robots [en línea]. <<http://sushi-robots.eu/es/producto/ks360-mezclador-del-arroz-kubota/>> [consulta: 28 febrero 2018].
- [57] ARO. Long Life PTFE Fluid Kits [en línea]. <<https://www.arozone.com/en/products/diaphragm-pumps/diaphragm-pump-accessories/diaphragm-pump-service-kits/llptfe-fluid-kits.html>> [consulta: 1 marzo 2018].
- [58] MERCADO LIBRE. Carbón Activo Material Filtrante [en línea]. <https://articulo.mercadolibre.cl/MLC-453645545-carbon-activo-material-filtrante-filtros-agua-y-aire-_JM> [consulta: 1 marzo 2018].

- [59] MOHELNIKOVA, Jitka. 2009. Materials for reflective coatings of window glass applications. *Construction and Building Materials* [en línea]. 23(5): 1993–1998 [consulta: 2 marzo 2018]. ISSN 0950-0618. 10.1016/J.CONBUILDMAT.2008.08.033
- [60] GIL, S. et al. 2006. Experimental estimation of the luminosity of the Sun. *American journal of physics*. : 728–733.
- [61] SOUTHERN CALIFORNIA GAS COMPANY. 2012. Calculate Available Heat for Natural Gas Fuel For Industrial Heating Equipment and Boilers [en línea]. [consulta: 1 marzo 2018]. <http://www.gosolarcalifornia.ca.gov/tools/newCalcSys/Description/Calculate_available_heat.pdf>
- [62] GOBIERNO DE CHILE. Conceptos censales: Viviendas y Hogares – Censo 2017 [en línea]. <<http://www.censo2017.cl/capacitacion-censo/soy-censista/modulo-2-a-quienes-debemos-censar/que-es-una-vivienda/>> [consulta: 10 septiembre 2017].

Anexo A DOCUMENTOS UTILIZADOS EN LA ENCUESTA

A.1 ENCUESTA: GENERACIÓN DE RESIDUOS COMUNES

A.1.1 Versión A

ENCUESTA: GENERACIÓN DE RESIDUOS COMUNES

Con esta encuesta quisiera recoger información sobre los residuos generados en tu casa y tu opinión sobre ellos. Esta información es anónima y será utilizada exclusivamente con fines académicos para una memoria de título. Agradezco tu tiempo.

Puedes mandarme la respuesta de la encuesta por mail o en una hoja. Las fotos me las puedes enviar por mail o whatsapp (el medio que desees). Si tienes dudas, contáctame.

1 FOTOGRAFÍAS

- a) Envíame una foto del **basurero principal de la casa y su entorno**.

Por ejemplo:



Ejemplo 1



Ejemplo 2

- b) Envíame una foto de tu **basura** (la del basurero principal)

Por ejemplo:



2 REGISTRO DE RESIDUOS

Fíjate en tu basura desde el lunes 17 de julio hasta el domingo 23 de julio. Después responde a las siguientes preguntas.

- a) Durante **un día** cualquiera de la semana, registra los residuos que botas al basurero principal. Indica los tipos de residuos y sus cantidades, como en el ejemplo. Puedes expresar las cantidades como tú quieras (gramos, puñados, unidades, litros, tazas, etc.)

Por ejemplo:

Plásticos
<ul style="list-style-type: none">- 5 bolsas- 1 botella de 1 litro- 3 envases de yogur
Restos de comida húmeda
<ul style="list-style-type: none">- 500 gr entre sopa, leche, jalea, yogurt vencido.- 1 taza de puré
Restos de comida sólida
<ul style="list-style-type: none">- 1 brócoli descompuesto- 3 cáscaras de plátano- 1 bistec- 300 gr entre arroz, papas, ensaladas, bolsas de té
Restos de poda y jardinería, y maderas
<ul style="list-style-type: none">- 2 kg de ramas- 1 bolsa de supermercado llena de hojas- 1 cajón de madera
Vidrios
<ul style="list-style-type: none">- 1 vaso- 1 botellas de litro y medio- 2 ampolletas
Papeles y cartones
<ul style="list-style-type: none">- 1 revista- 1 caja de cartón de pizza mediana- 1 caja de leche de 1 litro
Metales
<ul style="list-style-type: none">- 3 latas de bebida- 1 trozo de fierro de 50 cm- 10 clavos y tornillos
Otros
<ul style="list-style-type: none">- 1 plato roto- 500 gr de arena para gato- 3 pañales- 1 paño de cocina- 1 puñado de polvo y tierra (cabe en mi mano cerrada)

Responde aquí:

Plásticos
Restos de comida húmeda
Restos de comida sólida
Restos de poda y jardinería, y maderas
Papeles y cartones
Vidrios
Metales
Otros

b) ¿Durante esta semana, cuántas veces sacaste la basura (del basurero principal) al depósito de tu edificio o a la calle para que se la llevara el camión? ¿Cuál era el nivel de llenado del basurero cuando te llevaste la basura?

Por ejemplo:

En la semana saqué la basura 3 veces. La primera vez, el basurero estaba a la mitad, la segunda vez estaba completamente lleno y la tercera vez estaba 3/4 lleno.

Responde aquí:

¡Gracias!

ENCUESTA: GENERACIÓN DE RESIDUOS COMUNES

Con esta encuesta quisiera recoger información sobre los residuos generados en tu casa y tu opinión sobre ellos. Esta información es anónima y será utilizada exclusivamente con fines académicos para una memoria de título. Agradezco tu tiempo.

Puedes mandarme la respuesta de la encuesta por mail o en una hoja. Las fotos me las puedes enviar por mail o whatsapp (el medio que desees). Si tienes dudas, contáctame.

1 FOTOGRAFÍAS

- a) Envíame una foto del **basurero principal de la casa y su entorno**.

Por ejemplo:



Ejemplo 1



Ejemplo 2

- b) Envíame una foto de tu **basura** (la del basurero principal)

Por ejemplo:



2 REGISTRO DE RESIDUOS

Fíjate en tu basura desde el lunes 17 de julio hasta el domingo 23 de julio. Después responde a las siguientes preguntas.

- a) ¿Qué residuos botaste **en tres días**? Cada vez que botes un residuo, registra el tipo y su cantidad, como en el ejemplo. Puedes expresar las cantidades como tú quieras (gramos, puñados, unidades, litros, tazas, etc.) Completa una ficha para cada día.

Por ejemplo:

DÍA 1

Fecha : 17/07/2017

Plásticos
- 5 bolsas - 1 botella de 1 litro
Restos de comida húmeda
- 250 ml de yogurt o 2 envases de yogurt llenos - 200 gr de puré de papa - 200 ml de jalea - 100 ml de sopa
Restos de comida sólida
- 100 gr restos de ensalada - 1 brócoli descompuesto - 3 cáscaras de plátano - 1 bistec
Restos de poda y jardinería, y maderas
- 2 kg de ramas - 1 bolsa de supermercado llena de hojas - 1 cajón de madera
Vidrios
- 1 vaso roto - 1 botellas de litro y medio - 2 ampollitas
Papeles y cartones
- 1 diario - 1 caja de cartón de pizza mediana - 2 bolsas de papel
Metales
- 3 latas de bebida - 1 trozo de fierro de 50 cm - 10 clavos y tornillos
Otros
- 3 pañales - 1 puñado de polvo y tierra (cabe en mi mano cerrada) - 1 paño de cocina

DÍA 1

Fecha:

Plásticos
Restos de comida húmeda
Restos de comida sólida
Restos de poda y jardinería, y maderas

Vidrios
Papeles y cartones
Metales
Otros

DÍA 2

Fecha de inicio:

Plásticos
Restos de comida húmeda
Restos de comida sólida
Restos de poda y jardinería, y maderas

Vidrios
Papeles y cartones
Metales
Otros

DÍA 3

Fecha de inicio:

Plásticos
Restos de comida húmeda
Restos de comida sólida
Restos de poda y jardinería, y maderas

Vidrios
Papeles y cartones
Metales
Otros

b) ¿Durante esta semana, cuántas veces sacaste la basura (del basurero principal) al depósito de tu edificio o a la calle para que se la llevara el camión? ¿Cuál era el nivel de llenado del basurero cuando te llevaste la basura?

Por ejemplo:

En la semana saqué la basura 3 veces. La primera vez, el basurero estaba a la mitad, la segunda vez estaba completamente lleno y la tercera vez estaba 3/4 lleno.

Responde aquí:

¡Gracias!

A.2 ENCUESTA: GENERACIÓN DE RESIDUOS PARA RECICLAJE

ENCUESTA: GENERACIÓN DE RESIDUOS PARA RECICLAJE

Completa esta encuesta exclusivamente para los residuos que reciclas.

1 FOTOGRAFÍAS

- Envíame una foto de todos los **basureros para reciclaje y su entorno**.
- Envíame una foto de tus **residuos a reciclar**.

2 REGISTRO DE RESIDUOS A RECICLAR

Fijate en tu basura desde el lunes 17 de julio hasta el domingo 23 de julio. Después responde a las siguientes preguntas.

- ¿Cuántos residuos juntaste **esta semana** para reciclar? Indica los tipos de residuos y sus cantidades, como en el ejemplo.

Por ejemplo:

Plásticos
- 3 botellas (tipo 1) de 1 litro
- 5 envases plásticos de comida (tipo 6)
Restos de comida húmeda
- 250 ml de yogurt o 2 envases de yogurt llenos
- 100 ml de sopa
Restos de comida sólida
- 100 gr restos de ensalada
- 1 brócoli descompuesto
- 1 bistec
Restos de poda y jardinería, y maderas
- 2 kg de ramas
- 1 bolsa de supermercado llena de hojas
- 1 cajón de madera
Vidrios
- 1 frasco de mermelada de medio litro
- 1 botella de litro
Papeles y cartones
- 2 diarios
- 5 hojas de papel
- 2 cajas de cartón de zapato
Aluminio
- 3 latas de cerveza

Responde aquí:

Plásticos
Restos de comida húmeda
Restos de comida sólida
Restos de poda y jardinería, y maderas
Vidrios
Papeles y cartones
Aluminio

d) Habitualmente, ¿cada cuántos días llevas tus residuos al punto limpio o compostera?

Tipo de Residuo a reciclar	Número de días
Orgánicos	
Plásticos (tipo 1)	
Plástico (otros)	
Papeles y cartones	
Vidrios	
Aluminio	

¡Gracias!

A.3 ENCUESTA: APRECIACIÓN PERSONAL

ENCUESTA: APRECIACIÓN PERSONAL SOBRE RESIDUOS

Con estas preguntas busco recoger tu percepción de los residuos que generas en casa. Por favor, responde las siguientes preguntas considerando la opinión de las personas que viven contigo.

- a) Sinceramente, ¿separas o separarías al menos un residuo para reciclar?

Responde aquí:

- b) De las siguientes características de la basura, marca las **dos que más te molesten**. Si no te molestan, no respondas esta pregunta.

Me molesta que:...

- Genere mal olor
- Ocupe tanto espacio
- Sea fea o desagradable a la vista
- Sea un foco de enfermedades
- Atraiga plagas (ratones, moscas, etc.)
- Sea asquerosa
- Tenga que sacar la basura
- Los animales escarben/jueguen en la basura
- La basura se caiga y tenga que recogerla
- La basura esté cerca de los niños
- La bolsa de la basura se rompa
- Otros (especifica): _____

¡Gracias!

Anexo B ANÁLISIS DE LA MUESTRA PARA ENCUESTA

B.1 LISTA DE POSIBLES ENCUESTADOS

La lista de posibles encuestados, incluyendo los valores de sus parámetros se encuentra en: <https://goo.gl/WTZWyt>, pestaña *Posibles encuestados*.

B.2 CÁLCULO DISTRIBUCIÓN DE VIVIENDAS SEGÚN NSE

Los cálculos de la distribución de viviendas según su nivel socioeconómico se encuentran en: <https://goo.gl/WTZWyt>, pestaña *Prop. viviendas NSE*.

Anexo C RESULTADOS COMPLETOS DE LA ENCUESTA

C.1 RESPUESTAS DE LA ENCUESTA

Los resultados obtenidos de la encuesta, de todas las personas encuestadas se encuentran en: <https://goo.gl/q1ojNk>, pestaña *Respuestas encuesta*.

C.2 CARACTERIZACIÓN DE RESIDUOS: VOLÚMENES Y MASAS

Se cuantifica la masa y volumen de diferentes tipos de residuos, como envases, restos de comida, bolsas, etc., para calcular el flujo másico y volumétrico generado por los encuestado. Los cálculos y resultados se encuentran en: <https://goo.gl/q1ojNk>, pestañas *Lista residuos: otros*; *Lista residuos: metales*; *Lista residuos: papeles y cartones*; *Lista residuos: vidrios*; *Lista residuos: orgánicos*; y *Lista residuos: plásticos*.

C.3 RESIDUOS GENERADOS

La cuantificación del flujo de residuos generado por sector, incluyendo residuos destinados a reciclaje, se encuentra en: <https://goo.gl/q1ojNk>, pestaña *Resultados: R. generados*.

C.4 BIENES MATERIALES

El resumen de los bienes materiales asociados a cada sector, se encuentra en: <https://goo.gl/q1ojNk>, pestaña *Resultados: Bienes materiales*.

C.5 CONDUCTA DE GENERACIÓN

Los cálculos y resultados asociados a las molestias que generan los residuos en las personas, se encuentra en: <https://goo.gl/q1ojNk>, pestaña *Resultados: Cond. generación*.

Anexo D CÁLCULOS SOBRE LA ELECCIÓN DEL RESIDUO

D.1 CÁLCULOS SOBRE EL IMPACTO AMBIENTAL

Los cálculos y resultados asociados al impacto ambiental que generan los diferentes tipos de residuos se encuentran en: <https://goo.gl/q1ojNk>, pestaña *Criterio: Impacto ambiental*.

D.2 CÁLCULOS SOBRE EL IMPACTO SOCIAL DEL TRANSPORTE

Los cálculos y resultados asociados al impacto social del transporte de los diferentes tipos de residuos se encuentran en: <https://goo.gl/q1ojNk>, pestaña *Criterio: Impacto social transporte*.

D.3 CÁLCULOS SOBRE EL IMPACTO SOCIAL DE LA TECNOLOGÍA EN PLANTA

Los cálculos y resultados asociados al impacto social que generan las tecnologías de tratamiento asociado a los diferentes residuos se encuentran en: <https://goo.gl/q1ojNk>, pestaña *Criterio: Impacto social tecnología*.

D.4 CÁLCULOS SOBRE LAS MOLESTIAS

Los cálculos y resultados asociados a las molestias que generan los residuos en las personas se encuentran en: <https://goo.gl/q1ojNk>, pestaña *Criterio: Molestia*.

D.5 CÁLCULOS DE RESIDUOS NO TRATADOS

Los cálculos y resultados asociados a los flujos de residuos que no tratados, es decir, que se disponen en relleno sanitario se encuentran en: <https://goo.gl/q1ojNk>, pestaña *Criterio: Molestia*.

D.6 CÁLCULOS PARA EL ANÁLISIS MULTICRITERIO

Los cálculos y resultados del análisis multicriterio se encuentran en: <https://goo.gl/q1ojNk>, pestaña *Análisis multicriterio*.

Anexo E COMPOSTAJE

E.1 FUNDAMENTOS DEL COMPOSTAJE

En este capítulo se abordan los fundamentos fisicoquímicos y biológicos de los procesos de compostaje. Este estudio junto con el de Estado del Arte, permiten determinar la pertinencia de incluir este proceso en el equipo en desarrollo, junto con la digestión anaeróbica,

Los datos de compostaje se han obtenido de [43] y [42].

El compostaje corresponde a la descomposición bacteriana de materia orgánica bajo condiciones aeróbicas (con O_2), que produce compost.

El compost es un producto estable, libre de patógenos y semillas de plantas, que puede ser aplicado en la tierra beneficiosamente, por lo que se utiliza como abono para la agricultura, paisajismo y aplicaciones hortícolas. El compostaje es parte del ciclo del carbono, que permite equilibrar el carbono en la Tierra.

A continuación, se detallan las características de la materia prima utilizada, el proceso de degradación y sus condiciones, y las características del producto generado.

E.1.1 Materia prima

La biomasa que se utiliza para producir biogás puede ser la siguiente: lodos de plantas de tratamiento de aguas y otras industrias, estiércol de animales, residuos de poda y jardín, aguas negras, residuos agrícolas y de alimentos, y residuos sólidos municipales. También han sido compostados residuos industriales peligrosos como residuos pesticidas y lodos de petróleo.

Recuerde el lector que la materia que será digerida en el equipo son residuos orgánicos domiciliarios, que están constituidos por residuos de alimentos, poda y jardín.

Las características de la materia prima que influirán en el proceso de digestión son:

- Humedad: la humedad es necesaria como medio de transporte de moléculas y para soportar la actividad microbiana.
- Contenido de sólidos: los sólidos secos corresponden a moléculas orgánicas (proteínas, lípidos y carbohidratos) e inorgánicas (cenizas o inertes) sin considerar el agua. La materia orgánica se denomina sólidos volátiles (SV). El compostaje no es capaz de degradar toda la materia orgánica presente en el sustrato, porque existen compuestos muy resistentes a la descomposición. La materia orgánica que sí es degradable se denominan sólidos volátiles degradables.
La materia orgánica que es degradable por el compostaje se define como sólidos volátiles degradables.
- Acidez (pH): la acidez puede tener efectos inhibidores sobre los microorganismos.
- Contenido de nutrientes: La materia prima debe proveer de nutrientes para el crecimiento de los microorganismos. Los componentes con mayor demanda son *C* y *N*, y en menor proporción se requieren *P*, *S*, *K*, entre otros.

En la Tabla 77 se muestra el contenido de nutrientes de algunos tipos de materia prima utilizados en el compostaje. Cabe destacar que la relación *C:N* considera todo el carbono presente en el sustrato. En la Tabla 78 se muestra esta misma relación, pero solo considerando el carbono que es degradable por el compostaje.

Tabla 77: Contenido de nutrientes de varios sustratos de compostaje. Elaboración propia con datos de [43].

Material	Nitrógeno en forma N [% peso seco]	Fósforo en forma P_2O_5 [% peso seco]	Potasio en forma K [% peso seco]	Proporción C: N
Pasto (verde)	[2,4; 6]			[12; 15]
Pasto y hierba	2,0	1,1	2,0	
Residuos vegetales no leguminosos	[2,5; 4]			[11; 12]
Restos de café	2,1	0,3	0,3	
Cáscaras de huevo	1,2	0,4	0,1	
Restos de pescado	[2,0; 7,5]	[1,5; 6,0]		
Basura	[2,0; 2,9]	[1,1; 1,3]	[0,8; 2,2]	
Restos de carne	[5; 7]			
Cáscaras de papa	1,5			25
Hojas (frescas)	[0,5; 1,0]	[0,1; 0,2]	[0,4; 0,7]	41
Aserrín	0,1			[200; 500]
Residuos de alimentos	3,2			15,6
Residuos de jardín	1,95			22,8
Cenizas de madera		[0,1; 2,0]	[4,0; 10]	

Tabla 78: Proporciones C/N para residuos municipales en base a las fracciones biodegradables y de orgánicos totales. Elaboración propia con datos de [43].

Componente	Proporción C/N basado en:	
	Carbono orgánico biodegradable	Carbono orgánico total
Residuos de alimentos	12,4	15,6
Papel mixto	143,1	227,1
Residuos de jardín	14,5	22,8
Residuos mixtos	34,4	59,9

E.1.2 Pretratamiento

Al igual que en el caso de la fermentación anaeróbica (ver Pretratamiento), la biomasa se pretrata para reducir su tamaño, pues esto aumenta la disponibilidad de átomos de carbono para los microorganismos, lo que incrementa la posibilidad de que el sustrato sea degradado. Nuevamente, los materiales lignocelulósicos presentan resistencia a la degradación por su composición química, por lo que fragmentarlos es conveniente.

Algunos autores recomiendan un tamaño de partícula entre 3 a 5 milímetros. Se debe tener precaución con tamaños menores, pues pueden provocar que los espacios de aire que existen entre partículas, fundamentales para el compostaje, se reduzcan. Las hojas y pasto ya poseen un tamaño reducido así que se requiere poco pretratamiento, en cambio las ramas provenientes de poda sí necesitan ser reducidas de tamaño. Generalmente la conminución se realiza de forma mecánica.

En el pretratamiento también se separan los materiales indeseables de los compostables. Además, podría existir un post tratamiento para remover plásticos, vidrios o metales que no fueron eliminados en el pretratamiento.

Además, la materia prima usualmente es mezclada con otros elementos para regular la humedad y los espacios con aire libre de la alimentación, para que ocurra el compostaje en las siguientes etapas. Se puede adicionar agua, agentes de carga, compost o acondicionadores, o bien suministrar calor o aire para los fines mencionados (más detalles en la sección Acondicionamiento físico). También se agregan acondicionadores secos para aumentar la energía de la alimentación (más detalles en la sección Temperatura). Esta fase puede ocurrir antes del compostaje o de forma paralela.

E.1.3 Tratamiento: Compostaje

El proceso de compostaje cuenta con una serie de pasos, que son explicados a continuación. Seguir explicación con la Figura 45.

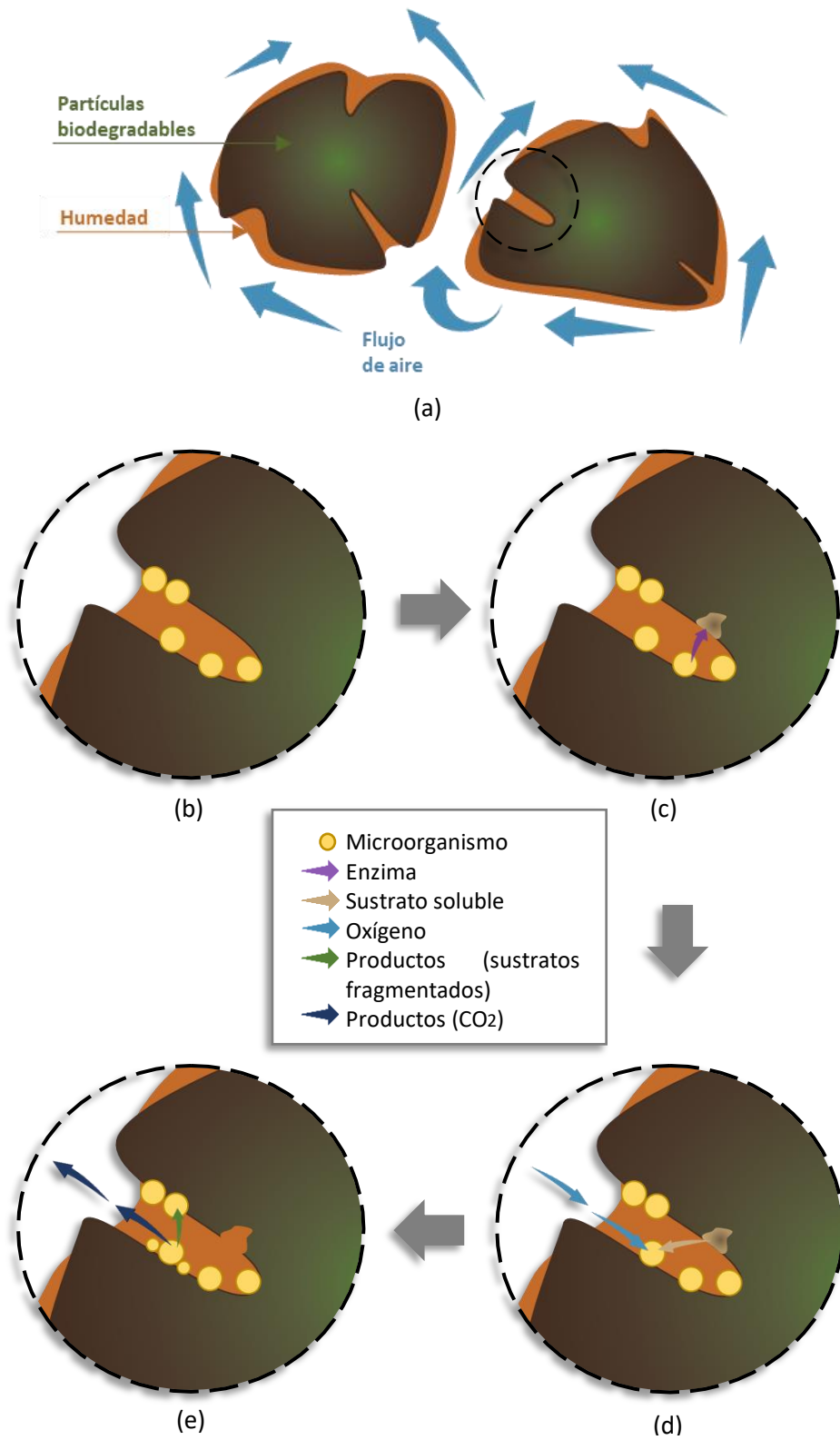


Figura 45: Diagrama de los pasos involucrados en el compostaje. (a) Esquema general basado en [42]; (b), (c), (d) y (e) Zoom del área punteada con progresión de pasos, elaboración propia.

Para estudiar los pasos, asuma el lector que la materia prima se encuentra en un ambiente aeróbico lista para ser digerida, como se muestra en (a). Sobre la materia prima, fijas al sustrato sólido, existen microorganismos, y en el proceso proliferarán aquellos aeróbicos. En (b) se muestra un acercamiento a la materia prima, donde se ven microorganismos.

El proceso inicia cuando las enzimas hidrolíticas son liberadas por las bacterias hidrolíticas, y viajan a través del agua hasta el sustrato sólido que es degradado y solubilizado (ver (c)). Estos sustratos solubles se transportan por el líquido hasta las superficies de las células de bacterias e ingresan a ellas (ver (d)).

El O_2 viaja desde el seno del aire hasta los espacios entre partículas, y cruza la interfase hacia el líquido. Se transporta por el líquido hasta llegar a las superficies de las células e ingresan a ellas (ver (d)).

Los sustratos solubles que se encuentra dentro de los microorganismos son metabolizados y el O_2 es consumido para ello. Los microorganismos degradan al sustrato para obtener nutrientes para crecer, generando productos que luego son secretados por las células al medio. Se generan moléculas de CO_2 y sustratos fragmentados que no fueron asimilados por los microorganismos, principalmente. Estos sustratos se transportan por el medio, y podrían ser digeridos por otras células. Los sustratos fragmentados no digeridos conformarán el compost. El CO_2 producido viaja por el fluido hasta su superficie y cruza la interfase hacia el seno del medio gaseoso, formando parte de este último; todo esto ocurre debido al equilibrio líquido - gas que debe existir dentro del sistema (ver (e)).

El agua presente en el medio fluido que se encuentra en la interfase líquido gas se evapora tomando calor del medio y cruza la interfase hasta el seno de la fase gaseosa, formando parte de ella, impulsado por el equilibrio líquido - gas.

Al igual que en el caso de digestión anaeróbica, los pasos generales del proceso son la metabolización microbiana y la transferencia de masa.

Los pasos ocurrirán si existen condiciones favorables en el medio. Para fortalecer la metabolización se debe asegurar que existen microorganismos, un ambiente aeróbico, pH y temperatura adecuados, nutrientes y tiempo para que ocurran los cambios. Por otro lado, para que la transferencia de masa ocurra, se debe asegurar una humedad y temperatura favorables, y tiempo. Mezclar el medio fortalece los pasos, por ejemplo, el movimiento permite que la transferencia sea más rápida.

Cabe mencionar que el pretratamiento, cuyo objetivo es aumentar la disponibilidad de moléculas de carbono, aumenta la probabilidad de que las enzimas hidrolíticas lleguen a la superficie del sustrato, es decir, se fortalece la transferencia de masa.

En la sección Microorganismos se explican las reacciones de la metabolización y los microorganismos involucrados. En la sección Ambiente Microbiano se detallan las condiciones expuestas anteriormente; y en Cinética de los procesos, las ecuaciones que describen las cinéticas involucradas de las reacciones y transportes. Más adelante, en la sección Estado del Arte, el lector

se familiarizará con tipos de digestores, cuya lógica de diseño recae en lograr estas condiciones y potenciarlas para que el proceso ocurra.

E.1.3.1 *Microorganismos*

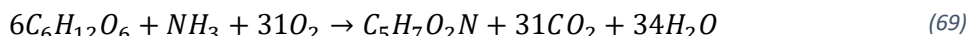
El proceso se puede dividir en dos fases: compostaje activo y maduración. Cada una ocurre gracias a una gran variedad de microorganismos aeróbicos presentes, pertenecientes al dominio de las bacterias y al reino *fungi*, principalmente. Las bacterias del género *actinomyces* suelen ser identificadas en el transcurso del proceso.

Compostaje activo

En el compostaje activo los sustratos fáciles de descomponer se degradan rápidamente gracias a las bacterias.

El primer paso es la liberación de enzimas hidrolíticas por bacterias hidrolíticas para descomponer y solubilizar al sustrato. Posteriormente, el resto de los microorganismos consumen estos sustratos solubles, utilizándolos como nutrientes para su crecimiento.

Por ejemplo, la glucosa ($C_6H_{12}O_6$), proveniente de la hidrólisis azúcares más complejos, y el amoníaco (NH_3), proveniente de la hidrólisis de proteínas, son consumidos en conjunto con oxígeno (O_2) para generar biomasa de microorganismos ($C_5H_7O_2N$), dióxido de carbono y agua, tal como muestra la siguiente reacción:



El O_2 es fundamental pues el oxígeno es la molécula aceptora de electrones utilizada por los microorganismos. Más detalles en Medio Aeróbico.

En el compostaje activo existen altos niveles de actividad biológica con una alta demanda de oxígeno, que provoca una rápida alza en la temperatura en el medio, creciendo hasta $55 - 65^\circ C$ en 24 horas. Las altas temperaturas son fundamentales en el proceso, pues destruyen la población de microorganismos patógenos, reduciéndola a niveles aceptables e inactivan semillas.

Maduración

Luego del compostaje activo, en la fase de maduración los microorganismos, principalmente *fungi* y *actinomyces*, degradan estructuras orgánicas más complejas, como lignocelulosa presente en la madera y plantas, y se genera un humus estable. La población de microorganismos se reduce junto con la demanda de oxígeno y la temperatura. El producto final debe estar estable (con baja actividad biológica) y madura (bajos niveles de elemento tóxicos como amoníaco y ácidos).

En la Tabla 79 se muestran los microorganismos presentes según la temperatura del proceso de compostaje. En la Figura 46 esto último se muestra de forma gráfica, identificando la fase de compostaje, donde se ha incluido una etapa de almacenamiento.

Tabla 79: Población de microorganismos durante el compostaje. Elaboración propia con datos de [43].

Microorganismo	[N° microorganismos] [g húmedo de compost]			Número de especies identificadas
	Mesofílico Temperatura inicial < 40°C	Termofílico 40 – 70°C	Mesofílico Descendiendo desde 70°C	
Bacteria				
Mesofílico	10^8	10^6	10^{11}	6
Termofílico	10^4	10^9	10^7	1
Actinomyces				
Termofílico	10^4	10^8	10^5	14
Fungi				
Mesofílico	10^6	10^3	10^5	18
Termofílico	10^3	10^7	10^6	16

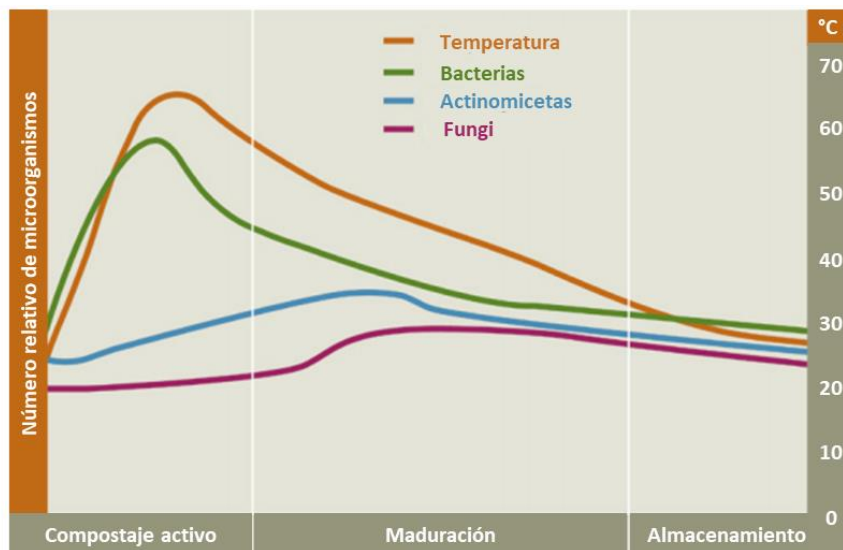


Figura 46: Variaciones teóricas de la temperatura y población de microorganismos en el proceso de compostaje. Traducido de [42].

E.1.3.2 Ambiente microbiano

Medio aeróbico y humedad

Los microorganismos involucrados en el compostaje requieren O_2 para metabolizar al sustrato. Esto es porque se utiliza al oxígeno como átomo aceptor de electrones: el oxígeno recibe electrones de otros átomos debido a su alta electronegatividad, generando enlaces. En el caso del compostaje, se produce un enlace entre oxígeno e hidrógeno, formando H_2O , y entre el oxígeno y el carbono del sustrato, formando CO_2 . Cabe mencionar que el oxígeno es el aceptor de electrones por excelencia en los medios biológicos.

La humedad es necesaria para soportar la actividad microbiana y como medio de transporte de moléculas.

Por lo tanto, se requiere agua y aire en el sistema. La demanda de aire es abordada en Requerimientos de Aireación. La necesidad de humedad es explicada en esta sección, junto con el rol de los espacios de la materia prima.

E.1.3.2.1 Espacios de aire y humedad

No basta solo con la presencia agua y aire en el sistema, sino que además estas moléculas deben estar en contacto con los microorganismos y, en particular, el agua también debe estar en contacto con el sustrato. Los poros del sustrato y los espacios entre partículas proveen de espacio que pueden ser llenados con aire y/o con agua. Si existen pocos poros o espacios, el aire y agua que podrá contactarse con los microorganismos será reducido. Por otro lado, si los espacios disponibles son muchos, pero están llenos con agua, la transferencia de oxígeno hasta el microorganismo se verá dificultado, complicando el contacto del O_2 con la bacteria; en el caso contrario, donde hay espacios llenos de aire, si se agrega agua posiblemente esta molécula desplace al gas debido a su densidad y, nuevamente, la transferencia de oxígeno hasta la bacteria tendrá una peor cinética. Es fundamental, entonces, contar con suficientes espacios sin agua (también llamados espacio de aire libre) para que sean llenados con aire. Se remarca al lector que los espacios de aire libre son espacios o poros en el sustrato que potencialmente pueden ser llenados con aire.

Dado que la actividad microbiana requiere de agua y de aire, se debe realizar un trade off entre espacios de aire y contenido agua para obtener condiciones de aireación y humedad favorables.

Para entender las definiciones matemáticas de espacio libre y porosidad, considere el lector el siguiente esquema (Figura 47) que representa la mezcla de compostaje, compuesta por tres fases.

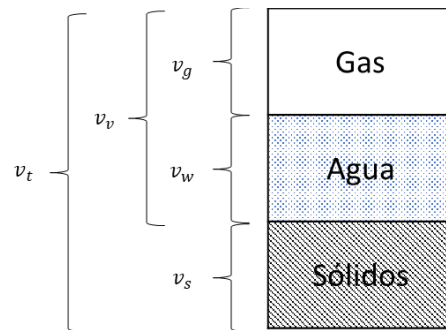


Figura 47: Diagrama de una matriz de compost, compuesta por sólidos, líquido y gas. Basado en [43].

La porosidad se define como: $n = \frac{v_v}{v_t}$

El espacio de aire libre se define como: $FAS = \frac{v_g}{v_t}$

Según estudios, la humedad óptima del papel es 65,92%; de los descartes mixtos es 66,13% ; de la basura es 60,79%; de una mezcla de basura y lodos es 53,18%; y de los residuos de carne de 57,09%. Estos valores óptimos tienden a encontrarse en un rango de FAS entre 30 y 35%. La mayor tasa de consumo de oxígeno se encuentra con una humedad del 67% y un FAS de 30% para los descartes mixtos; y la tasa suele mantenerse alta en rangos de 20 a 35% de FAS. Para una mezcla de lodos y basura debe mantenerse un FAS de al menos 30%. En general, para los sistemas de

compostaje se recomienda un FAS del 30%; no es necesario un FAS tan alto si el sistema está siendo continuamente agitado, pues siempre se está exponiendo nueva superficie al aire.

Otros autores señalan una humedad óptima según la etapa en la que se encuentra el proceso. En la fase de compostaje activo de 55 a 65% de humedad y en fase de maduración de 45 a 55%, y si el compost se almacena, se recomienda un contenido de agua entre 40 y 45%.

Dado que en el proceso se va evaporando agua, es necesario agregar para cumplir con los requerimientos de humedad.

Cabe mencionar que la densidad del bulk del sistema se reduce cuando el contenido de agua disminuye, pues los espacios se llenan con aire que tiene una menor densidad.

Algunos sustratos se compactan debido a su propio peso, reduciendo los espacios de aire libre. Esto puede evitarse si el sistema es agitado o volteado. También se debe tener cuidado con el tamaño de las partículas del sustrato, pues pequeños tamaños provocan que haya menos espacios entre partículas, reduciendo el FAS.

E.1.3.2.2 Acondicionamiento físico

Si la materia prima no cumple con la humedad y FAS requeridos, deben ser acondicionadas para lograrlo.

Los sustratos secos suelen tener espacios de aire, pero déficit de agua, por lo que se agrega agua a la entrada. En el proceso se perderá agua debido al calentamiento del sistema, por lo que se necesita agregar agua nuevamente.

Los sustratos húmedos tienen agua en exceso y falta de espacio de aire. Para reducir el contenido de agua y aumentar los espacios de aire los sustratos pueden mezclarse con otros elementos o se puede evaporar agua. A continuación, se explican las técnicas utilizadas:

- **Compost:** El sustrato se mezcla con compost (que se encuentra más seco que el sustrato), formando una mezcla con menor contenido de humedad que el sustrato, por lo que aumentan los espacios que pueden llenarse con aire. Se recicla más compost a medida que se desea obtener una mezcla más seca, si el compost es menos seco o si el sustrato es muy húmedo.
- **Acondicionadores:** Se agregan materiales orgánicos o inorgánicos formando una mezcla más seca. Se requieren grandes volúmenes de acondicionadores para lograr un FAS adecuado. Se debe tener precaución con el tamaño de partícula de los acondicionadores, pues si es muy pequeño puede tapar los espacios y poros, reduciendo los espacios, aunque la humedad sea la adecuada.
- **Agentes de carga:** Un agente de carga es un material orgánico o inorgánico de suficiente tamaño para proveer un soporte estructural y mantener espacios de aire. Los agentes de carga forman una matriz 3D de partículas sólidas capaces de soportarse a sí mismas a través del contacto partícula-partícula.

Si el agente es orgánico, absorbe agua secando al sustrato, lo que es beneficioso. Además, se degrada generando más compost, lo que podría ser perjudicial debido a que se requiere

más espacio. Si el agente es inorgánico, no existe degradación y podría no existir absorción de agua, dependiendo del tipo de material.

Los chips de madera de 1 a 2 pulgadas son agentes de carga más comúnmente utilizado. Otros son neumático triturado, cáscara de maní, poda de árboles, incluso rocas (no recomendado).

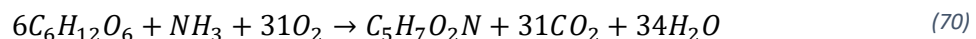
- Compost y acondicionadores: Se pueden mezclar ambos elementos para obtener el FAS requerido. Una ventaja de esto es que no se necesita tanto acondicionador.
- Secar con aire: Dado el equilibrio líquido-gas dentro del sistema, el agua líquida se evaporará saturando el aire de agua y secando al sustrato. La convección natural o forzada provoca un recambio de aire y, por lo tanto, nueva evaporación de agua. A medida que la velocidad del aire crece, el agua evaporada aumenta.
Se debe tener precaución con la emanación de olores.
- Secar con calentamiento: Si el sistema está muy caliente el equilibrio líquido-gas del agua se desplaza hacia el gas, por lo tanto, se evapora más agua. El calor suele ser suministrado por el propio proceso de compostaje (más detalles en Temperatura).

Nutrientes

Se ha determinado empíricamente que las bacterias tienen una composición en el rango de $C_5H_7O_2N$ a $C_5H_9O_3N$, además cuentan con P, S, K, Mg, Na, Ca, Fe, Cu, Mn y Mo.

El C y el N representan la mayor demanda de nutrientes, la relación másica óptima entre ambos ($C:N$) se encuentra entre 30:1 y 15:1, valores que han sido obtenidos como se explica a continuación:

Suponga el lector que el sustrato a degradar corresponde a glucosa ($C_6H_{12}O_6$). El rendimiento de células suele encontrarse dentro del rango: $1 - 2 \left[\frac{g \text{ células}}{g \text{ glucosa}} \right]$. Asumiendo $1 \left[\frac{g \text{ células}}{g \text{ glucosa}} \right]$ se obtiene la siguiente reacción que representa el consumo de sustrato y la generación de microorganismos:



La reacción anterior permite deducir que se necesita una relación másica $C:N$ de 30: 1. Si se asume un rendimiento de $2 \left[\frac{g \text{ células}}{g \text{ glucosa}} \right]$ se obtiene una relación de 15: 1.

Tales proporciones han sido validadas empíricamente. Se sabe que una relación $C:N$ entre 30: 1 y 35: 1 ocurre un compostaje rápido; sobre este rango (es decir, menos N) el N limita y la velocidad del proceso se reduce; y bajo este rango (es decir, más N) la cinética se mantiene alta, pero existe un exceso de nitrógeno que se pierde con la volatilización de NH_3 .

Se destaca que las relaciones $C:N$ mencionadas consideran el carbono que es degradable, así, es de utilidad considerar los valores que se muestran en la Tabla 78 sobre el contenido de C y N de diferentes sustratos.

Para alimentar al proceso una proporción óptima de C y N es conveniente mezclar diferentes tipos de sustratos.

Algunos autores recomiendan una proporción *C: N* dependiendo de la etapa del compostaje: en la fase de compostaje activo entre 25: 1 a 30: 1 y en la fase de maduración de 18: 1 a 23: 1, y el compost almacenado de 15: 1 a 20: 1.

pH

Una alta concentración del ion de hidrógeno (H^+) o de ion hidroxilo OH^- son muy tóxicas para los microorganismos, pues afectan en la estructura física de las proteínas, consecuentemente perdiendo la actividad enzimática. Se recomienda un rango de pH de 6,5 a 8.

La mayoría de las bacterias no sobreviven en un medio muy ácido como pH 3; en medios básicos bajo 10,5 las bacterias se ven afectadas y a 11,5 la mayoría muere. Los sustratos que suelen tener pH extremo son los lodos provenientes de planta de tratamiento de agua. El pH oscila entre 5 y 6,5 o en torno a 10 si se hay presencia de arcilla en el lodo.

El pH de la alimentación no suele ser ajustado porque el proceso compostaje cuenta con un sistema buffer que amortigua la acidez dejándola neutra. Esto ocurre gracias a la presencia de un ácido débil y una base débil generados en el proceso, CO_2 y NH_3 , respectivamente.

El ajuste natural de acidez toma tiempo, produciendo una fase lag en los microorganismos. Si se desea evitar esta fase el pH puede ser regulado agregando ácidos y reciclando CO_2 a sistemas básicos o agregando bases en sistemas ácidos, también puede reciclarse compost que ya se encuentra neutralizado.

Temperatura

El compostaje genera calor, y parte de él se libera al ambiente que está más frío, pero no todo porque el compost es un aislante y dificulta la transferencia de calor. Existe pérdidas de calor cuando el sistema es volteado o agitado.

La temperatura es una variable que afecta la actividad microbiana. La temperatura óptima del proceso se encuentra entre los $60^\circ C$. Para la fase compostaje activo se recomienda mantener una temperatura de 55 a $60^\circ C$ y en la fase de maduración una temperatura menor a $50^\circ C$, y el compost almacenado debe mantenerse a temperatura ambiente. La temperatura suele ser limitada hasta los $75 - 85^\circ C$ para evitar la inactivación de los microorganismos por la desnaturalización de sus enzimas. Mantener una temperatura sobre los $45^\circ C$ es el mecanismo principal para inactivar los patógenos y destruir semillas que se podrían encontrar en el compost.

Al inicio del proceso la materia prima se encuentra fría (a temperatura ambiente) por lo que los microorganismos sufren un lag inicial, es decir, su actividad se ve reducida. Es posible que la energía que se genera en la fase lag sea menor a la que se pierde hacia el ambiente, lo que produce que la temperatura baje; así que se debe tener preocupación con las pérdidas de calor. Mezclar el contenido del reactor es buena idea para calentar la entrada que se encuentra fría.

Los sustratos húmedos cuentan con una alta concentración de agua. El agua, debido al equilibrio líquido-gas dentro del sistema, tiende a evaporarse para pasar a la fase gaseosa, y para ello toma energía del entorno. Entonces, parte del calor generado por el proceso se utiliza para evaporar agua y no para aumentar la temperatura del entorno. Así, la temperatura podría no encontrarse dentro de los rangos óptimos, sino que sería menor. Por otro lado, los sustratos secos tienen una baja

humedad por lo que se evapora poca agua, así, la energía consumida con ese propósito es reducida y no afecta a la temperatura del sistema.

Note el lector que es beneficioso reducir el agua de los sustratos húmedos para obtener un contenido de óptimo. Sin embargo, este secado podría tener consecuencias negativas en la temperatura del sistema. Para solucionar el problema se puede hacer lo siguiente:

- Agregar acondicionadores secos cuyo compostaje provee energía extra para suplir la faltante, sin aportar más humedad. Los agentes de carga podrían cumplir la misma función, además de ofrecer un soporte estructural para aumentar los espacios con aire.
- Deshidratar el sustrato previo al compostaje.
- Reducir el aire suministrado: La evaporación se ve potenciada si el aire del sistema se recambia (convección), así que se debe evitar suministrar mucho aire. El problema de esto es que el compostaje se ve dificultado por el exceso de agua. Además, se genera un compost húmedo, por lo que debería existir un post tratamiento para ajustar su humedad, como secarlo exponiéndolo al ambiente o a una fuente de energía, o mezclarlo con acondicionadores secos.
- Mezclar con compost no es efectivo, porque el agua seguirá presente y el compost no aporta nueva energía.

Para ambos tipos de sustratos, se debe tener precaución con evaporar un exceso de agua y secar al sólido más de lo requerido.

Contrario a lo anterior, también es posible que la generación de calor provoque un aumento de temperatura considerable, superando los límites recomendados. En ese contexto, se debe extraer calor del sistema, lo que se puede lograr haciendo circular aire. Al suministrar aire ocurren dos cosas: i) la evaporación se ve potenciada por lo que más calor es consumido evitando alzas de temperatura, como ya ha sido mencionado, y ii) el aire al estar más frío que el sistema toma calor de este, enfriándolo. Más detalles sobre el aire requerido para remover calor se encuentran en Requerimientos de aireación.

Requerimientos de aireación

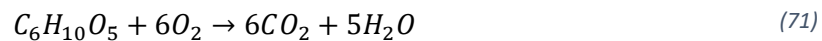
El lector habrá notado que el aire cumple varias funciones importantes dentro del proceso de compostaje.

En Medio Anaeróbico y Humedad se ha expuesto la necesidad de aire para suministrar el oxígeno requerido para los microorganismos y para remover humedad del sustrato; y en Temperatura para remover calor. A continuación, se ahonda en dichas necesidades:

- La demanda de aire para remover agua del sustrato depende de la masa de agua que se desea remover y la capacidad del aire para contener dicha agua. Debido al equilibrio líquido-gas del sistema, el agua se evapora continuamente, hasta que el aire se satura de agua (alcanza la concentración máxima permitida a las condiciones de temperatura y presión del sistema); en ese punto el sistema ya no puede evaporar más agua. Para seguir evaporando, entonces, se debe suministrar nuevo aire. Considere el lector que a mayor temperatura la concentración de saturación del aire aumenta, por lo que es beneficioso que el aire alcance altas temperaturas para poder contener más humedad.

Cabe mencionar que no es necesario que el aire se sature para poder recambiar aire. De hecho, suministrar aire a una alta velocidad permite que la tasa de remoción de agua aumente, pero en estas condiciones no es posible que el aire se sature pues el tiempo dentro del sistema es reducido, por lo que se requiere una masa total de aire mayor que en el caso anterior. Tener un flujo de aire con tales condiciones puede constituir un gasto por el uso de ventiladores.

- La demanda de aire para remover calor depende de cuánto calor se desea remover o, en otras palabras, de la temperatura que se desea del sistema. Cuando el sistema se contacta con aire frío, debido al equilibrio térmico comienza a ceder su calor provocando que el aire se caliente; lo mismo ocurre con el vapor de agua presente. Una vez que líquido y gas se encuentran a una misma temperatura, cesa la transferencia de calor. Entonces, para que el sistema siga perdiendo calor se debe renovar el aire. Nótese que la evaporación de agua también consume calor aportando en la reducción de la temperatura.
Al igual que en el caso anterior, no es necesario que líquido y gas alcancen el equilibrio térmico para renovar el calor, es más, una alta velocidad del aire permite que la tasa de remoción de calor crezca, pero conlleva al requerimiento de una masa mayor de aire, y todo esto constituye gastos.
- La demanda de aire de las bacterias puede ser determinada asumiendo que en el compostaje se descompone totalmente la materia prima en CO_2 . Suponiendo que la materia prima es celulosa, la reacción de descomposición es:



Por lo tanto, la masa requerida es $1,19 \left[\frac{g O_2}{g SV_{biodegradables}} \right]$ aproximadamente, que es equivalente a $7,20 \left[\frac{g aire}{g SV_{biodegradables}} \right]$. Este valor se encuentra sobreestimado, pues la bacteria no descompone totalmente el sustrato en CO_2 , sino que parte se transforma en biomasa de la bacteria, que tiene una menor proporción de oxígeno que el dióxido de carbono.

Por otro lado, la masa de oxígeno calculada debe estar en contacto con los microorganismos, por lo que debe encontrarse en la fase líquida, y para ello se transfiere desde el medio gaseoso al líquido. Dicha transferencia no es completa, es decir, no todo el oxígeno gaseoso se transfiere a la fase líquida, así que es necesario suplir aire en exceso para lograr obtener una concentración adecuada de oxígeno en el líquido. Una velocidad alta del aire promueve que la transferencia de oxígeno al líquido sea más rápida, pero se requiere más aire del proyectado inicialmente pues no se alcanza a aprovechar todo el oxígeno posible debido a su reducido tiempo dentro del equipo.

Como regla general, para sustratos húmedos el aire para remover calor y para remover humedad son similares y mucho más grandes que el necesario para la actividad bacteriana. Mientras que, para sustratos secos, el aire requerido para remover calor es levemente mayor que para remover humedad, siendo este último levemente mayor que el necesario para la actividad microbiana.

Existen diversos mecanismos para poder airear el sistema de compostaje. Los ventiladores son aparatos que generan convección forzada del aire, permitiendo que alcance altas velocidades, que favorece las transferencias de calor y masa. La convección natural, por otro lado, provoca movimientos de aire, pero a una velocidad menor.

En la convección natural existen dos formas de que el oxígeno entre en los poros y espacios del sustrato: por difusión molecular y por advección natural, que ocurren en simultáneo:

- **Difusión molecular:** Corresponde de las colisiones constantes y aleatorias entre moléculas del fluido, resultando un movimiento de las moléculas desde una zona de alta concentración de ellas hasta una de baja concentración. El oxígeno se mueve desde el aire hasta el sustrato debido a este gradiente de concentraciones. Por otro lado, el agua y dióxido de carbono generado durante el proceso viaja desde el entorno del sustrato hasta el aire. La difusión molecular es extremadamente lenta, aportando un porcentaje menor al 5% del requerido.
- **Advección natural:** Los gases que están al interior de la masa de sustrato, como agua y dióxido de carbono, se calientan y reducen su densidad. La diferencia de densidades entre el aire frío y los gases al interior de la pila produce una fuerza flotante que induce una ventilación natural, donde los gases calientes suben y dejan la pila, y el aire frío entra. Esta es la fuerza más importante de transferencia de oxígeno para un sistema de convección natural. Para que la ventilación ocurra es muy importante que exista espacio de aire libre.

El volteado es otra técnica que permite renovar aire que se encuentra en los espacios entre el sustrato. Dependiendo del aire requerido y el volumen de espacio libre, se puede determinar cuántas veces debe voltearse la masa de sustrato. Sin embargo, esta técnica no suele entregar muy buenos resultados, siendo la convección natural la más efectiva. El volteado, además, permite generar espacios libres evitando la compactación de la materia prima. Sin estos espacios libres, no es posible que ocurra ventilación natural. Por lo tanto, el rol más importante del volteado es mantener espacios libres adecuados para que la convección ocurra.

Agitación

Usualmente, se realiza agitación dentro de los digestores para:

- (i) Homogeneizar el sistema, porque esto permite que todo el volumen tenga las mismas condiciones que, idealmente, sería las óptimas.
- (ii) Calentar el sustrato que entra frío al reactor, homogeneizando la temperatura del medio, lo que lo que permite reducir la fase lag de los microorganismos que se da a bajas temperaturas.
- (iii) Distribuir en el medio acondicionadores, compost u otro elemento que son agregado a la materia prima.
- (iv) Mejorar la velocidad de la transferencia molecular.
- (v) Mejorar las reacciones, porque se aumenta la probabilidad de contacto entre sustrato y enzimas, y entre sustrato soluble y microorganismos.
- (vi) Renovar el aire en el sustrato y exponer nueva superficie de este último al aire. El volteado, en particular, al no ser una agitación continua, no suele dar buenos resultados, como ya se ha mencionado en la sección Requerimientos de Aireación.

- (vii) Mantener los espacios de aire en la mezcla, evitando que desaparezcan por compactación. Este es el principal rol del volteado.

La agitación se puede lograr utilizando tambores rotatorios, bandejas agitadas, volteo con pala mecánica, entre otros.

Tiempo

Se debe asegurar un tiempo mínimo para que ocurra el proceso. En sistemas continuos existe el tiempo de residencia del sólido (SRT) y el tiempo de retención hidráulica (HRT), definidos como se muestra a continuación:

$$HRT = \frac{V}{F + f} \quad (72)$$

$$SRT = \frac{V}{F} \quad (73)$$

Donde V es el volumen del reactor, F el flujo volumétrico de entrada (sin reciclo) y f el flujo volumétrico de reciclo.

Dado que en el compostaje existe humedad y sólidos volátiles que se pierden al ambiente, el flujo volumétrico varía a lo largo del proceso. Por lo tanto, se redefinen los tiempos:

$$HRT = \frac{V}{\frac{((F + f)_{entrada} + (F + f)_{salida})}{2}} \quad (74)$$

$$SRT = \frac{V}{\frac{(F_{entrada} + F_{salida})}{2}} \quad (75)$$

Para sistemas continuos con mezcla completa (tanque agitado) un HRT de 10 a 20 días es adecuado y un SRT de 60 a 180 días. Tiempos mayores genera mejoras leves.

Para sistemas batch el tiempo es denominado tiempo del proceso, y se debería encontrar sobre el rango 60 – 180 días, pues es más lento que un proceso continuo, debido a que presenta lag inicial (ver Inoculación).

La fase de compostaje activo podría durar de 3 a 4 semanas o de 8 a 12 meses, dependiendo del tipo de materia prima y las condiciones de operación; mientras que la fase de maduración de 8 semanas hasta 12 meses, dependiendo del tipo de materia prima y condiciones del proceso.

Inoculación

Los microorganismos involucrados en el compostaje crecen naturalmente en la materia prima si se expone a condiciones aeróbicas. Al igual que en el caso de la digestión anaeróbica, existe una fase lag de crecimiento inicial, pues los microorganismos se deben adaptar al medio, que provoca poco consumo de sustrato. La inoculación de microorganismos en que se encuentren en otra fase de crecimiento (exponencial o estacionaria) permite que el efecto anterior se reduzca, aumentando el consumo de sustrato.

En sistemas en que se mezcla compost con sustrato, la fase lag pareciera desaparecer, pues se inoculan microorganismos que ya superaron la fase lag. Cabe mencionar que estos no requieren

readaptarse al medio, pues el medio es compost, donde ya están acostumbrados a crecer. En este contexto, se logra llegar rápidamente a condiciones deseadas de temperatura, pH, humedad y FAS.

Algunos autores mencionan que cuando sustrato se mezcla con poco inóculo no tiene ningún efecto importante en el compostaje. Pero si el inóculo es abundante, por ejemplo, cuando el sustrato se mezcla con compost generado, se han visto efectos positivos, aunque en algunas ocasiones no tiene impacto alguno.

En aquellos casos en que no hay un cambio en el proceso, se puede deducir que en la mezcla previa a la inoculación ya existían suficientes microorganismos para degradar al sustrato, es decir, estaba saturado con microorganismos y enzimas, y no era necesario más.

La inoculación más usual corresponde a reciclo de compost en un reactor flujo pistón. En los sistemas CSTR no es necesario reciclar, pues internamente ya existe una mezcla del compost generado con el sustrato, de forma continua. También podría reciclarse compost en un reactor batch, es decir, mezclar compost con sustrato previo al ingreso al reactor.

E.1.4 Producto y post tratamiento

E.1.4.1 *Compost*

El compost corresponde a un acondicionador orgánico de suelo, que ha sido estabilizado a un producto como el humus, que está libre de patógenos humanos y de plantas y semillas, y que no atrae insectos o vectores, que puede ser almacenado sin molestias y es beneficioso para el crecimiento de las plantas.

Recuerde el lector que, en el compostaje, la materia orgánica se degrada y, durante este proceso, las moléculas son cada vez más difíciles de descomponer, tomando más tiempo. La una porción de orgánicos que se degrada de forma muy lenta, es decir, que se resiste a ser degradado, se denomina humus. Se dice que el humus es estable, pues es aparentemente inerte.

Cabe destacar que la estabilización completa corresponde a la oxidación de toda la materia orgánica a CO_2 y H_2O , que son productos más estables o inertes, sin embargo, esto no es deseable porque el valor del compost como acondicionador de suelos depende de su contenido de orgánicos.

El compost inestable genera molestias en los campos, También, se han reportado eventos de toxicidad de este tipo de producto en plantas, posiblemente debido a su composición.

Existen algunos indicadores que permiten identificar un compost estable:

- **Temperatura:**

El proceso se da por terminado cuando la temperatura baja. Esto es cierto si las condiciones de compostaje siempre fueron adecuadas y no hubo causa de muerte celular.

- **Contenido de orgánicos:**

El contenido de orgánicos varía de sustrato en sustrato, así que este indicador permite comparar un sustrato con su producto, pero no productos obtenido a partir de otra materia prima. Se

puede medir los sólidos volátiles, contenido de carbono, demanda química de oxígeno y proporción $C:N$.

- **Características químicas:**

El amoníaco está presente de manera más importante al principio del proceso, Progresivamente cambia su concentración por volatilización y conversión a nitrato. Así, bajo amoníaco y alto nitrato son indicadores de estabilidad.

Otro indicador reportado es la presencia de almidón: asumiendo que la materia prima generalmente contiene almidón y que se degrada rápidamente en el proceso, la ausencia de almidón es un indicador de estabilidad.

La fitotoxicidad está ligada a la presencia de ácidos como el acético, propiónico, isobutírico, butírico e isovalérico. La fitotoxicidad comienza sobre los 300 [ppm] de ácido acético, y sobre 2000 [ppm], nada crece. Ensayos muestran que casi toda la fitotoxicidad se pierde al cabo de 60 días del proceso.

Se sugieren los siguientes límites de microorganismos para un compost de riesgo aceptable. Note el lector que un producto libre de riesgo no es posible de lograr.

- **Virus:**

Eue no existan virus detectables por un laboratorio que tenga un mínimo de detección dentro del rango de $[0; 0,25] \left[\frac{PFU}{g \text{ materia seca}} \right]$.

- **Ascaris ova:**

Que no se detecte *Ascaris ova* en un laboratorio que tenga una detección dentro del rango de $[0; 0,5] \left[\frac{\text{ova viable}}{g \text{ materia seca}} \right]$.

- **Salmonella:**

La mediana de todas las muestras debe ser menor a $1 \left[\frac{MPN}{g \text{ materia seca}} \right]$ y no debe haber más de un 10% de muestras que superen los $10 \left[\frac{MPN}{g \text{ materia seca}} \right]$. Ninguna muestra debe superar los $100 \left[\frac{MPN}{g \text{ materia seca}} \right]$. Cabe destacar que esta especie será la representante de todas las bacterias patógenas que tengan capacidad de volver a crecer.

- **Coliformes fecales:**

Pese a no ser considerados patógenos en general, su reducción es señal de un buen proceso de compostaje. La mediana de todas las muestras debe ser menor a $10 \left[\frac{MPN}{g \text{ materia seca}} \right]$ y no debe haber más de un 20% de muestras que superen los $1.000 \left[\frac{MPN}{g \text{ materia seca}} \right]$. Ninguna muestra debe superar los $10.000 \left[\frac{MPN}{g \text{ materia seca}} \right]$. En experimentos los coliformes fecales llegaron a límites aceptables luego de 20 días.

La unidad PFU es una medida de la cantidad de partículas infecciosas individuales (por ejemplo, partículas de virus) en función del número de placa formada por unidad de volumen; mientras que el número más probable, MPN, corresponde a la cantidad de organismos que es más probable que hayan producido resultados de laboratorio en una prueba en particular.

Un compost con las características anteriormente descrita puede ser utilizado como acondicionador de suelos, sin requerir post procesamiento.

E.1.5 Reflexiones

A continuación, se concluye lo más importante de las secciones anteriores, incluyendo reflexiones al respecto.

Sobre la materia prima:

Para el compostaje, es relevante conocer la humedad, acidez y contenido de nutrientes de la materia prima. En este trabajo, la materia prima a procesar está constituida por residuos de poda, jardín, frutas y alimentos en general. Solo se conoce el contenido de nutrientes de los residuos de alimentos. Si no se logran obtener más datos, se optaría por utilizar la información que se tiene de mezcla de basura orgánica.

Sobre al pretratamiento:

Considerando el tamaño de partícula requerido, se debe reducir las dimensiones de la materia prima, utilizando un pretratamiento mecánico, que es el más usual y adecuado al contexto domiciliario.

También, de ser necesario, se debería incluir una mezcla de sustratos y otros elementos para adecuar la composición, humedad y espacios de aire.

Sobre el tratamiento de Compostaje:

Al igual que para la digestión anaeróbica, para diseñar el equipo se desarrollará un modelo fenomenológico, que se sostendrá en etapas del proceso, que involucran transferencias de masa y reacciones biológicas. También necesitará de las condiciones detalladas a lo largo de las secciones. En la Tabla 80 se muestra un resumen de las condiciones más importantes.

El proceso se divide en dos etapas: compostaje activo y maduración, que ocurren gracias a microorganismos del reino fungi y bacterias. La primera fase es mucho más rápida que la segunda, pues en esta última se descomponen los sustratos más difíciles de degradar.

La presencia de oxígeno es fundamental para que el proceso ocurra, especialmente en la etapa de compostaje activo. La humedad de la materia prima es importante porque permite el transporte de moléculas. Los espacios de aire y poros del sustrato permiten la existencia de aire y agua. Se debe cuidar que estos espacios no estén completamente llenos de agua para que haya aire.

Considerando que los residuos de alimentos tienen una alta humedad, posiblemente se requiera acondicionar la materia prima para regular la humedad y el FAS (espacios de aire), mezclando con compost, acondicionadores o agentes de carga, o secando con aire o calor.

Para mantener el FAS, resulta necesario agitar si la materia prima tiende a compactarse.

Una ventaja de que el proceso sea natural es que autorregula su pH, así que no requiere un control intensivo.

Durante el proceso, tanto la temperatura como la humedad se reducen debido a la aireación. La temperatura baja especialmente por el cambio de fase del agua. Para evitar cambios bruscos de la temperatura, se pueden agregar acondicionadores secos, secar la materia prima previo al compostaje o reducir el aire suministrado.

La aireación es requerida para: remover agua, remover calor y como sustrato para microorganismos.

La agitación se utiliza para mejorar las transferencias y reacciones, mantener un FAS adecuado, airear y homogeneizar. El rol del volteado es, principalmente, mantener los espacios de aire libre.

Es conveniente utilizar reciclo de compost para agilizar la fase lag de los microorganismos.

Tabla 80: Resumen condiciones ideales para el compostaje.

Condiciones		Unidad	Valores ideales		Valor típico
			Compostaje activo	Maduración	
Tamaño de partícula		[mm]	3 – 5		
pH		–	6,5 – 8		7
Proporción de macronutrientes	C: N	– (Prop. másica)	30: 1 – 15: 1		
Concentración de oxígeno (para microorganismos)	O ₂	$\left[\frac{g O_2}{g SV_{biodegradable}} \right]$	1,19		
	Aire	$\left[\frac{g O_2}{g SV_{biodegradable}} \right]$	7,20		
Humedad	Descartes mixtos	[% peso]	66		
	Basura	[% peso]	61		
	General	[% peso]	55 – 65	45 – 55	
FAS		[% volumen]	30 – 35		
Temperatura		[°C]	60	50	
Tiempo de residencia		[días]			60 – 180

Sobre el producto y el post tratamiento:

Un indicador de que el compost es estable, es decir, que el proceso ha terminado, es su temperatura: esta baja hasta, acercándose a la ambiental. El resto de los indicadores podrían resultar complejos en un contexto domiciliario.

Es importante remarcar que no será posible tener un producto libre de riesgo para la salud. El nivel de patógenos debe ser aceptable, existen límites recomendados.

E.1.6 Cinética de los procesos

En esta sección se describen las ecuaciones que representan las cinéticas de diferentes procesos que se dan en el compostaje.

E.1.6.1 Reacciones

Las reacciones de solubilización y consumo de sustrato por parte de los microorganismos presentadas en la sección 7.2 Cinética del Proceso, para la digestión anaeróbica, son válidas para el compostaje.

Se tiene información adicional sobre el consumo de oxígeno del proceso.

E.1.6.1.1 Consumo de oxígeno

A partir de experimentos, autores han determinado la tasa de consumo de oxígeno a partir de la temperatura. En la Ecuación (76) se muestra la cinética de consumo para el compostaje de una mezcla de residuos orgánicos frescos, en un reactor continuo.

$$-w_{O_2} = -0,0387(T^2) + 4,560(T) - 117,9 \quad (76)$$

Donde:

$$-w_{O_2} = \text{tasa de consumo de oxígeno, } \left[\frac{\text{mg de } O_2}{\text{g SV} \cdot \text{tiempo}} \right]$$

T = temperatura del sistema, $[^{\circ}C]$.

Algunos autores han realizado pruebas de respirometría a procesos de compostaje en reactores batch. Han concluido que en dichos experimentos, la velocidad del proceso está gobernado por una cinética de primer orden, respecto al sustrato sólido (degradable). La siguiente ecuación describe el consumo del sustrato:

$$-w_s = -k_d \cdot (S_s)$$

Donde:

$$-w_s = \text{tasa de consumo de sustrato sólido, } \left[\frac{\text{masa de SV oxidados}}{\text{volumen} \cdot \text{tiempo}} \right].$$

$$k_d = \text{constante de velocidad, } \left[\frac{\text{masa SV oxidados}}{\text{tiempo} \cdot \text{masa de SV}} \right].$$

$$S_s = \text{concentración de sustrato sólido, } \left[\frac{\text{masa de SV}}{\text{volumen}} \right].$$

Considerando que la ecuación solo depende de la concentración de sustrato, obedeciendo una cinética de primer orden, posiblemente el proceso que limitó en las pruebas fue una reacción, en abundancia de microorganismos y oxígeno. Por lo tanto, esta cinética podría ser utilizada para describir reacciones de consumo en dichas condiciones.

La constante de velocidad ha sido determinada a partir de la tasa de consumo de oxígeno mencionada anteriormente. Esta tasa, al haber sido determinada en estado estacionario (reactor continuo), corresponde a la menor tasa posible para un reactor batch. A pesar de lo anterior, el ajuste que se realiza de la constante permite obtener resultados cercanos a la realidad.

La ecuación para determinar la constante k_a es la siguiente:

$$k_a = \frac{24}{1.500} \cdot [-0,0287(T^2) + 4,560 \cdot T - 117,9] \quad (77)$$

E.1.6.2 *Transferencias*

En el proceso de compostaje, existe un modelo que supone que una partícula de compost corresponde a una matriz compuesta por una partícula de sustrato sólido, microorganismos y agua, que se contacta con gas. Entonces, se asume que la matriz está rodeada por aire. En la Figura 48 se muestra un esquema del modelo mencionado, que incluye el sólido y sus poros, y el agua rodeando la partícula y llenando los poros. Note el lector que el sistema mostrado está compuesto por dos matrices.

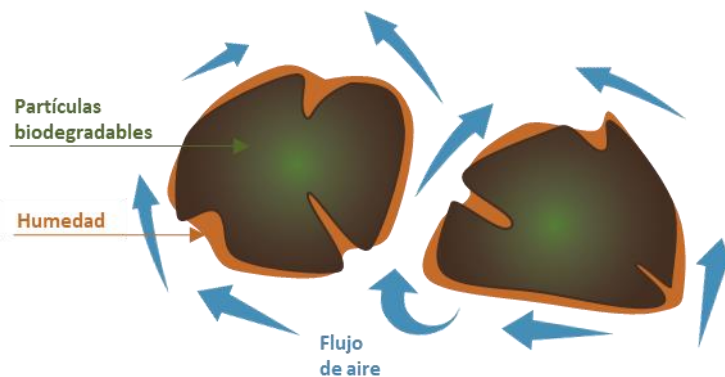


Figura 48: Esquema general de la mezcla de compostaje. Basado en [42].

En este caso, la transferencia de moléculas, como O_2 y CO_2 , se da por difusión dentro de la matriz, y las moléculas que se transportan por el aire podrían verse afectadas por difusión y advección si es que hay viento.

La transferencia por difusión queda descrita por la ley de Fick (ver Ecuación (11)). Respecto a esta ecuación, cabe mencionar que se ha determinado que un 80 – 90% de D_l es una buena aproximación de la difusividad molecular en el compostaje para el O_2 ; y que para el O_2 , tamaños de partícula de 0,1 [cm] provoca cinéticas de transferencia del orden de magnitud del resto de las cinéticas del proceso (reacciones); si el tamaño es de 0,05 [cm] es tan rápida como el resto. Se debe tener precaución con dimensiones menores, pues puede provocar que existan menos espacios entre partículas y, con ello, una peor ventilación natural.

La transferencia advectiva y difusiva que representada por la ecuación (ver Ecuación (14)).

El modelo presentado considera que las partículas están llenas de agua, y en la realidad, cuando el sustrato se seca, los poros se llenan con aire, lo que mejora la transferencia. Además, como se mencionó, se asume que las partículas están rodeadas de aire, pero en la realidad podrían estar rodeadas de otras partículas o agua. Así, para poder aplicar este modelo, se debe asegurar que las moléculas están rodeadas de aire, lo que se logra con el FAS recomendado y una buena ventilación, por ejemplo, agitando.

Cabe mencionar que las matrices podrían contactarse entre sí si el sistema se agita, provocando una transferencia de microorganismos, sustratos solubles y agua de una partícula a otra. Esto último es positivo, pues permite homogeneizar la mezcla. Dicha transferencia sería difusiva y advectiva, y queda representada por la Ecuación (14).

E.1.6.3 *Reflexiones*

Tantos la cinética de las reacciones como las transferencias quedan representadas por las mismas ecuaciones y modelos que fueron presentados para la digestión anaeróbica. Cabe mencionar que el modelo presentado en esta sección ha sido utilizado y adaptado para representar el proceso de digestión anaeróbica en 7.2.2 Transferencias.

E.1.7 Reflexiones Finales

En este capítulo se ha descrito el proceso de compostaje, considerando las características que debe tener la materia prima, el pretratamiento requerido, las etapas del proceso, microorganismos involucrados, variables o condiciones, y el producto generado y su post tratamiento.

Como se mencionó, la digestión anaeróbica y el compostaje, pueden ser descritos a través de las mismas ecuaciones de transferencias y cinéticas de reacciones. Sin embargo, las reacciones, condiciones y pasos limitantes de estos procesos difieren considerablemente. Esto provoca que se requieran equipos con características diferentes.

Respecto a las condiciones, en ambos casos el tamaño de partícula debe ser del orden de milímetros, el pH se autorregula en 7, la proporción $C:N$ cercano a 30: 1 y humedad alrededor del 55%. Sin embargo, la temperatura requerida es mayor en la digestión anaeróbica y el tiempo de residencia es mayor en el compostaje. Por supuesto, la diferencia más importante es la presencia de oxígeno: para el compostaje se necesita aireación, mientras que para la digestión aislamiento total del aire. Además, el biogás requiere ser tratado, mientras que el compost no. Son estas últimas características las que dificultan considerablemente el diseño de un equipo capaz de realizar ambos procesos (uno a la vez, no en simultáneo).

E.2 ESTADO DEL ARTE DEL COMPOSTAJE

En este capítulo se realiza un estudio del estado del arte del compostaje. Se presentan los sistemas y equipos utilizados para realizar dichos procesos, que serán de utilidad en el diseño de la solución. El objetivo es extraer información que permita comparar este proceso con el de digestión anaeróbica, para determinar si es factible diseñar un equipo con ambos tipos de transformación. El proceso de compostaje puede ser dividido en 4 etapas u operaciones unitarias, que han sido explicadas E.1: Fundamentos del compostaje, y son resumidos en la Figura 49.

El pretratamiento consiste en una conminución para reducir el tamaño de partícula y/o separación de materiales indeseables en la alimentación. También suelen agregarse: agua, acondicionadores, agentes de carga, compost, aire o calor con el objetivo de regular la humedad y los espacios y poros de la materia prima; la adición puede realizarse antes del compostaje o en paralelo (las flechas dobles hacen referencia a esto en el diagrama).

En el compostaje activo consiste en una degradación rápida de compuestos sencillos, que se caracteriza por una alta tasa de consumo de oxígeno y temperaturas termofílicas. Mientras que la maduración es una fase lenta donde se descomponen compuestos más complejos, que se caracterizan por una baja tasa de consumo de oxígeno y temperaturas reducidas. Se genera compost, que podría requerir un post tratamiento para retirar materiales no compostables, como plástico o vidrio, que pudieron haber quedado luego del pretratamiento.

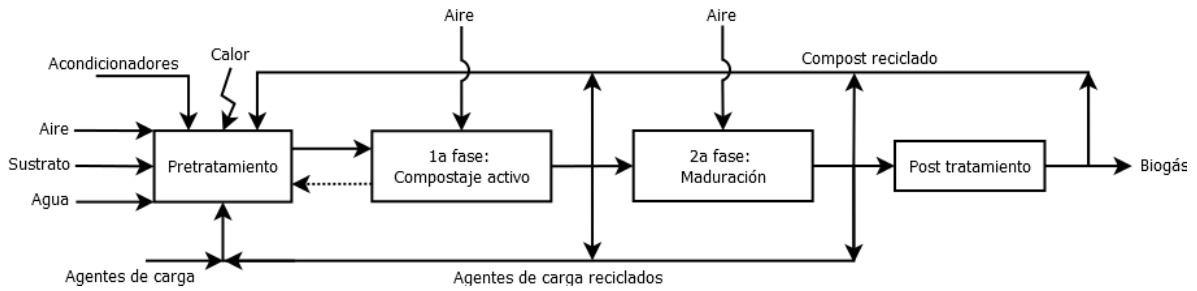


Figura 49: Diagrama de bloques del proceso de compostaje.

E.2.1 Sistemas de compostaje

De aquí en adelante se abordan sistemas de compostaje para las fases de compostaje activo y maduración. Dichos sistemas se pueden clasificar según: tipo de reactor, mecanismo de flujo de sólidos, condiciones de lecho y forma de suministrar aire.

Se utilizará la denominación de 'reactores' para aquellos sistemas que utilizan recipientes y 'no reactores' para aquellos que no.

E.2.1.1 No reactores

Son clasificados en aquellos que mantienen un lecho de sólidos agitado y aquellos que emplean un lecho estático.

1. Lecho de sólidos agitado: la mezcla de compostaje (alimentación) es agitada revolviendo o volteando periódicamente, etc.

a. Pila con volteo: La alimentación mezclada se pone en filas y es volteada periódicamente con equipamiento mecánico.

El oxígeno es suministrado con ventilación natural resultado de la flotabilidad de los gases calientes (ver Requerimientos de aireación) y, de forma menos importante, por intercambio de gases durante el volteado.

El oxígeno también puede ser suministrado con aireación forzada: el aire entra a la pila gracias a una succión o inyección de aire.

La pila se voltea periódicamente para reestructurarla, esto es, mantener los espacios de aire. Con esto se mezcla considerablemente el alto y ancho, pero poco el largo.

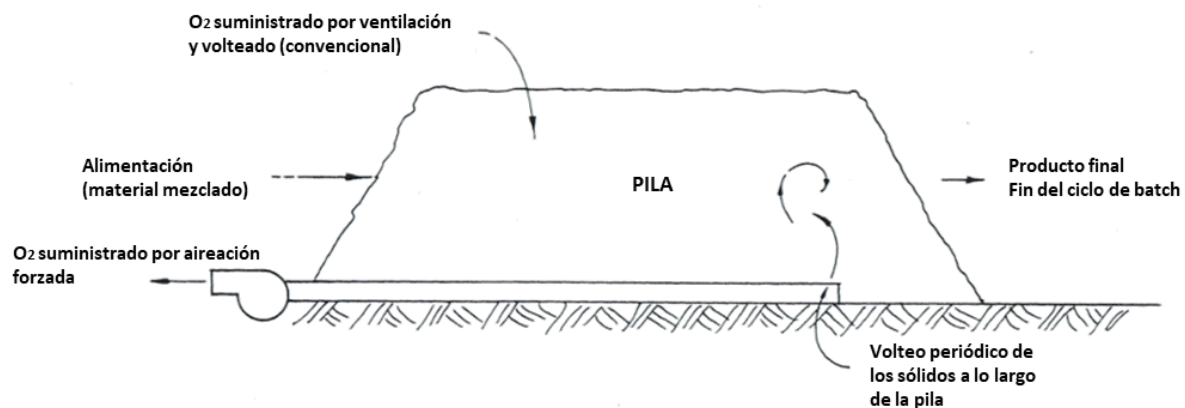


Figura 50: Diagrama de un No reactor, lecho de sólidos agitado (pila con volteo): (1) Convencional - sólidos agitados por un volteado periódico sin aireación forzada, alimentación batch, flujo pistón de sólidos con algo de dispersión; (2) Aireación forzada – igual que la pila con volteo convencional, pero con suministro de aire de forma forzada. Basado en [43].

2. Lecho de sólidos fijo

a. Pila estática: Usado ampliamente para sustratos húmedos, como lodos. El sustrato es mezclado con agentes de carga como chips de madera, formando una larga pila. Esto provee estabilidad estructural y mantiene huecos son aire sin la necesidad de agitación periódica. Un sistema distribuido es usado para mantener la aireación forzada. No se

utiliza agitación o volteado y no hay mezcla, y las pilas son formadas por lote (batch). Existen reactores semiagitados.

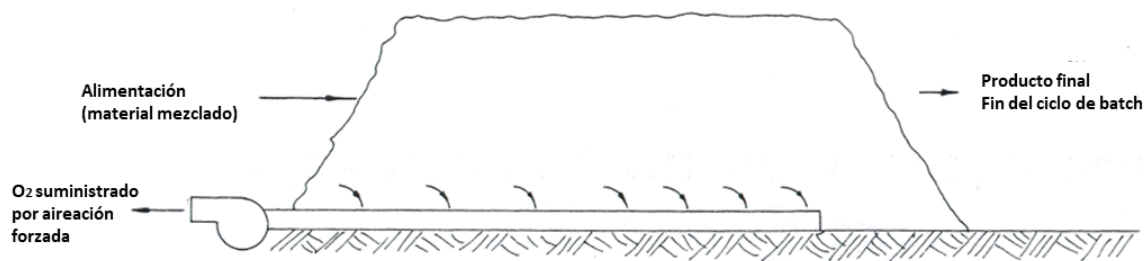


Figura 51: Diagrama de un No reactor, lecho de sólidos estático (pila estática aireada): sin agitación o volteado de la pila alimentación batch de sólidos, sin dispersión o mezcla de sólidos. Aireación forzada. Basado en [43]

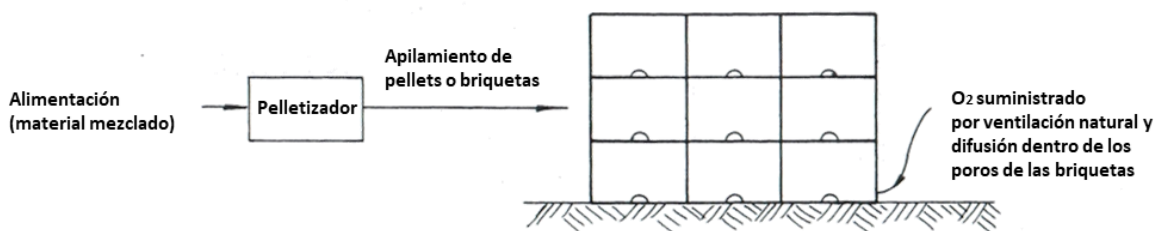


Figura 52: Diagrama de un No reactor, lecho de sólidos estático: ventilación natural y difusión de oxígeno (ejemplo: proceso Brikollari). Basado en [43].

E.2.1.2 Reactores

Son clasificados de acuerdo con la forma en que la alimentación fluye, en reactores verticales u horizontales. Estos últimos también incluyen reactores inclinados.

1. Flujo vertical: son definidos según las condiciones del lecho.
 - a. Lecho agitado: La mezcla de compostaje cae por el reactor y es agitado. Son alimentados de forma continua o intermitente.

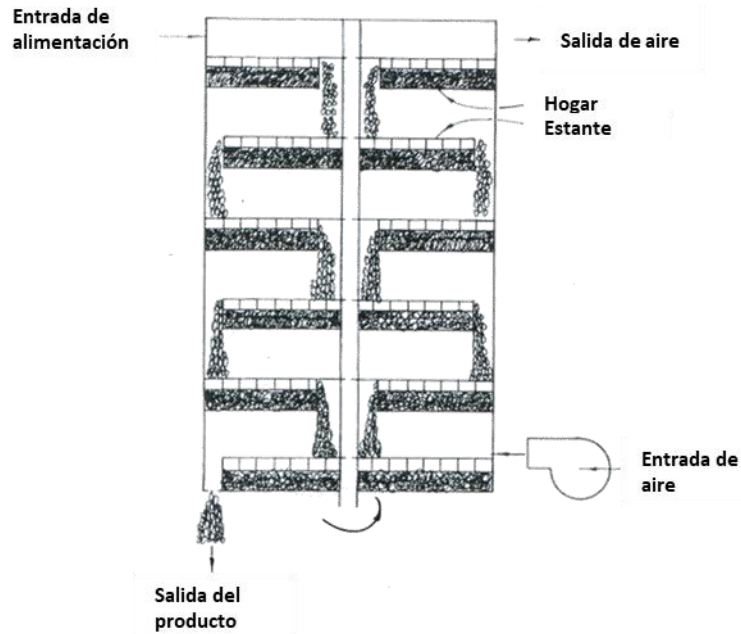


Figura 53: Diagrama de un Reactor de flujo vertical, lecho agitado: hogares múltiples, sólidos son agitados durante su caída por el reactor, aireación forzada, alimentación continua o intermitente, existe algo de mezcla. Basado en [43].

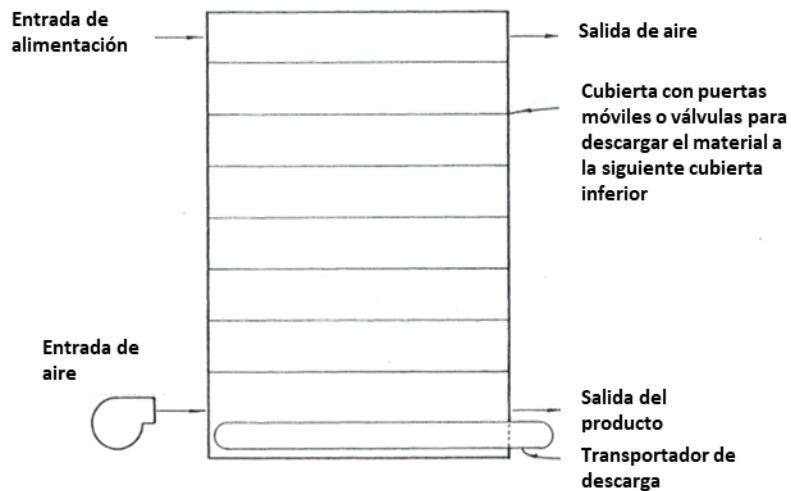


Figura 54: Diagrama de un Reactor flujo vertical, lecho agitado: múltiples pisos o cubiertas. Basado en [43].

- b. Lecho empacado móvil: la mezcla de compostaje baja por el reactor ocupando todo el volumen del lecho y no es agitado. Se alimenta de forma continua, intermitente o en lotes. Los sólidos de la salida pueden volver a ser alimentados (reciclo). Pueden tener geometrías circulares y rectangulares con aireación en co y contracorriente. Es de bajo costo y puede tener una altura de 3 a 9 [m].

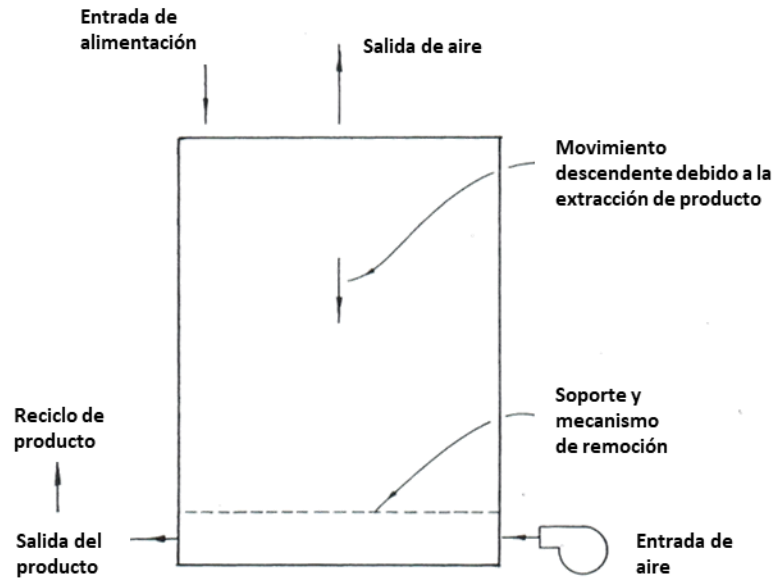


Figura 55: Diagrama de un Reactor flujo vertical, lecho empacado (reactor silo): sólidos no son mecánicamente agitados durante su caída por el reactor, aireación forzada en contra o co corriente, flujo pistón de sólidos. Basado en [43].

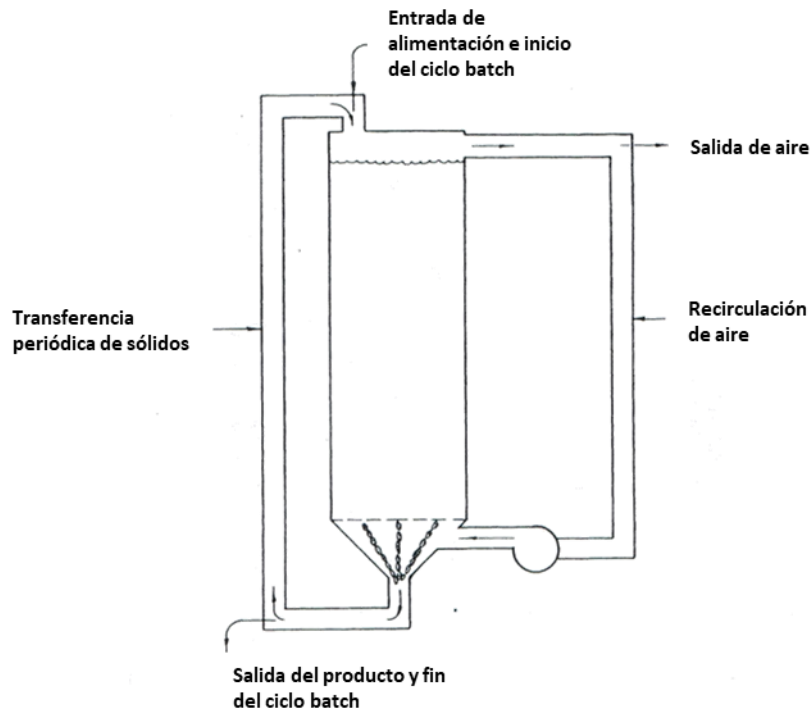


Figura 56: Diagrama de un Reactor flujo vertical, reactor lecho empacado. Basado en Basado en [43]

2. Flujo horizontal e inclinado: se dividen según las condiciones del lecho.
 - a. Tambor rotatorio: El tambor rota sobre su eje y voltea el lecho de sólidos (mezcla de compostaje). Existen 3 tipos de tambores rotatorios según el patrón de flujo de los sólidos.

En el reactor de flujo disperso, la salida y entrada están ubicadas en lugares opuestos en el tambor. Es un flujo pistón, aunque podría existir dispersión axial de material resultante del volteado.

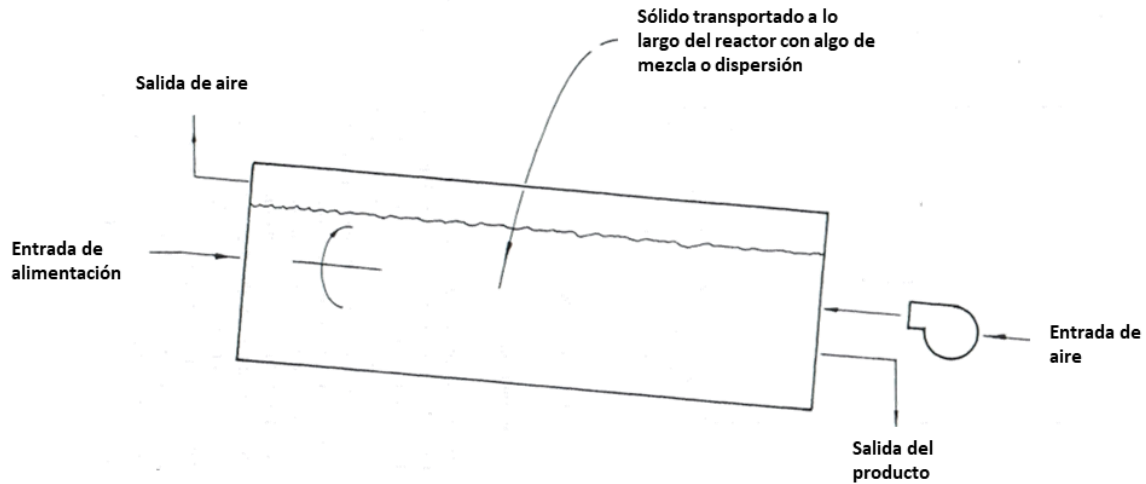


Figura 57: Diagrama de un Reactor flujo horizontal, tambor rotatorio - flujo disperso: dispersión debido al volteo, reactor no está segmentado en su interior, sólidos agitados por una rotación constante del tambor, alimentado de forma continua o intermitente, aireación forzada. Basado en [43].

En el reactor de celdas en serie se evitan los cortocircuitos de material que podrían ocurrir en el reactor de flujo disperso. El tambor es compartimentado en celdas conectadas en serie, donde una celda es alimentada con la descarga de la anterior. La primera celda se alimenta una vez que se encuentra vacía, así, la alimentación es intermitente. Cada celda se encuentra bien mezclada.

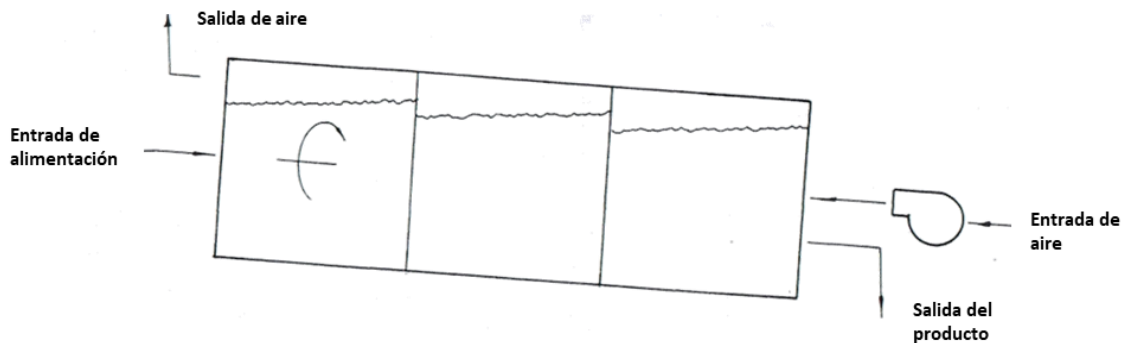


Figura 58: Diagrama de un Reactor de flujo horizontal, tambor agitado - celdas en serie: flujo de sólido es periódicamente vaciado y transferido de una celda a otra, cada celda está bien mezclada. Basado en [43]

En el reactor de mezcla completa los sólidos se mezclan de forma homogénea. Se requiere que la alimentación y la descarga ocurran uniformemente a lo largo del reactor. Si esto ocurre de forma continua, suele existir material que está menos tiempo del requerido. Lo anterior se puede solucionar si la alimentación y descarga son intermitentes. Debido a su complejidad, este reactor no es usado comúnmente.

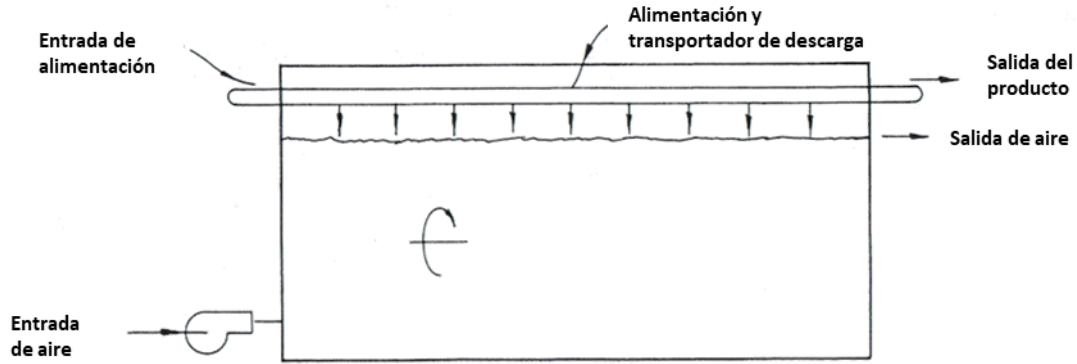


Figura 59: Diagrama de un Reactor de flujo horizontal, tambor rotatorio - mezcla completa: alimentación y descarga uniforme a lo largo con un alto nivel de mezcla. Basado en [43].

- b. **Bandejas agitadas:** Los sólidos son agitados mecánicamente sobre bandejas y aireados de forma forzada. Los reactores no están cubiertos por arriba y están resguardados en una construcción. Existen geometrías rectangulares y circulares. Pueden tener dimensiones desde los 2 [m] de ancho y 2 [m] de alto, hasta 6 [m] de ancho, 3 [m] de alto con una longitud de 200 [m].

Un reactor circular posee un puente con barrenos, que gira desde el centro del reactor (como un clarificador) y puede demorar hasta 2 [h] en completar una revolución. El material es alimentado por la periferia del puente. Los barrenos agitan el material en el reactor y proveen mezcla de la nueva alimentación con el compost generado. El material es gradualmente transferido hacia al centro del reactor donde cae sobre un vertedero y luego a una cinta transportadora situada en una galería por debajo del reactor.

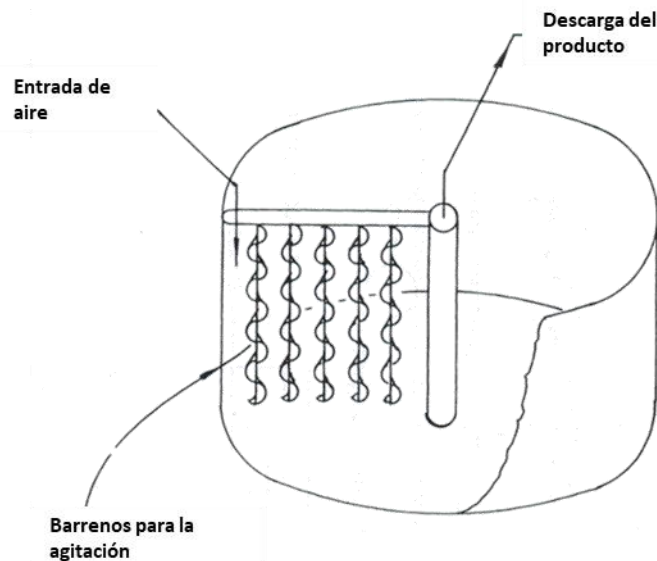


Figura 60: Diagrama de un Reactor de flujo horizontal, bandejas agitadas - tipo circular: sólidos agitados mecánicamente y alimentado de forma continua, intermitente o batch. Basado en [43]

Los reactores rectangulares poseen varias formas de agitar, muchas de ellas consisten en rieles montados en la parte superior de las paredes de las bandejas. Hay sistemas donde la

agitación la provee un barreno montado en un puente móvil. Tal como los circulares, la salida está opuesta a la entrada.

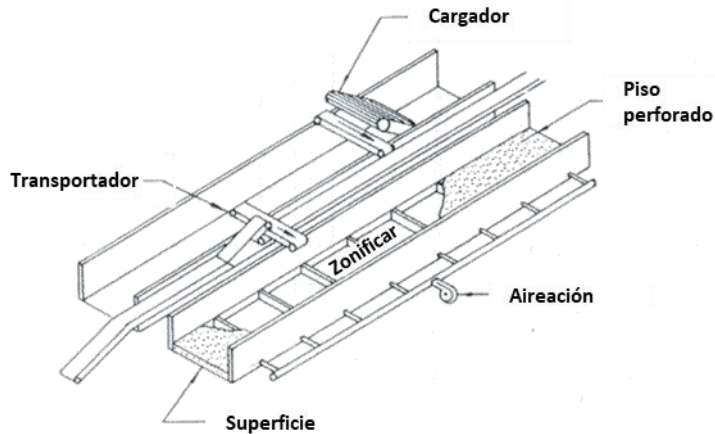


Figura 61: Diagrama de un Reactor de flujo horizontal, bandejas agitadas - tipo rectangular. Basado en [43].

- c. Bandejas estáticas: Es un reactor flujo pistón, que puede ser tubular o un túnel de sección rectangular, y tener un volumen entre 10 a 500 $[m^3]$.

Un reactor tipo empuje utiliza una placa empujadora con movimiento hacia delante y hacia tras que es situado al final de la alimentación en el túnel. Cuando la cámara está llena la placa se mueve hidráulicamente hacia adelante, empujando el nuevo material dentro del reactor y sacando el compost desde el final de reactor. La placa empujadora se mantiene en ese lugar hasta el próximo ciclo de llenado. Los gases se pueden suministrar y remover a lo largo del reactor.

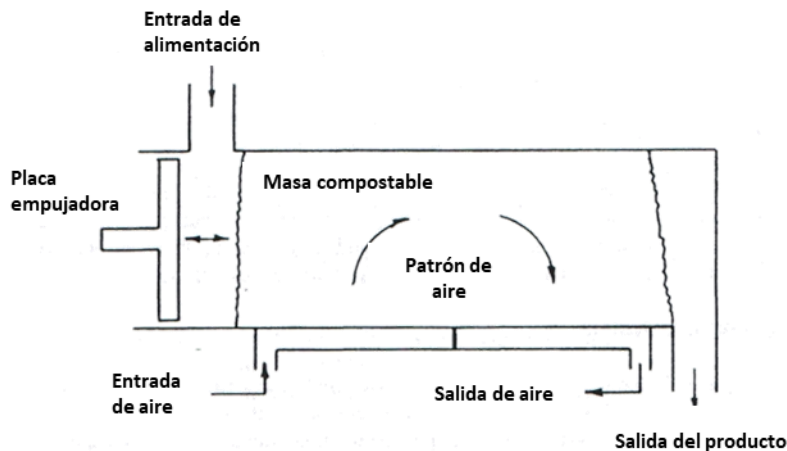


Figura 62: Diagrama de un Reactor de bandejas estáticas, túnel - tipo empuje: sólidos son empujados a lo largo del reactor, los sólidos no son mecánicamente agitados en un reactor, pero pueden ser agitados mientras son transferidos al siguiente reactor. Basado en [43].

El reactor tipo transportador posee una cinta transportadora para mover el material a lo largo del reactor.

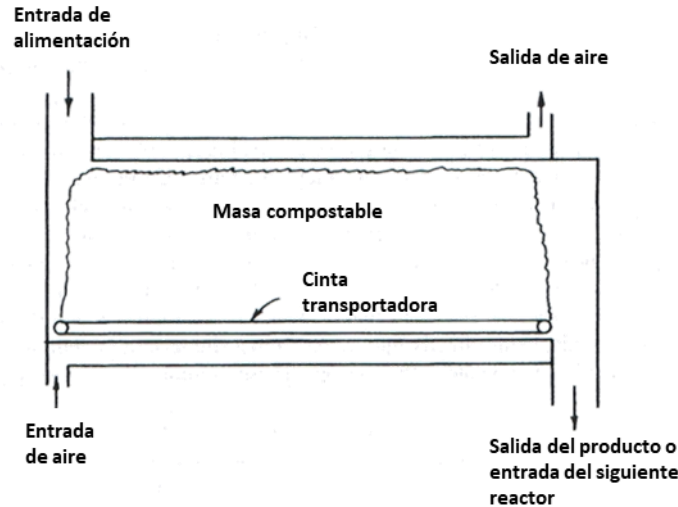


Figura 63: Diagrama de un Reactor de bandejas estáticas, túnel - tipo transportador. Basado en [43].

- d. Proceso sin flujo: Existen numerosos reactores con operación batch. El material es cargado al inicio de un ciclo y permanece en el reactor entre 7 y 14 días, con aireación forzada. El producto luego pasa a la fase de maduración que suele ser realizada en la pila con volteo por varios meses.

El lector debe tener presente que la mayoría de los reactores anteriores fueron concebidos para realizar la fase de compostaje activo. La fase de maduración suele ser realizada posteriormente fuera del reactor en sistemas de pilas con volteo o pilas estáticas.

E.2.2 Sistemas de compostaje históricos

A continuación, se explican algunos procesos conocidos que se utilizan actualmente o que han sido importantes en la historia del compostaje.

E.2.2.1 No reactores

1. Lecho de sólidos agitado:

- a. Indore: Fue creado por Sir Albert Howard en la India en el año 1925. Se alternan capas de residuos, estiércol, tierra, madera, etc. La pila es revuelta a mano varias veces en el ciclo. Si la pila es muy alta se pueden utilizar embudos o tubos de ventilación. El tiempo de retención es de 120 a 180 días. Este método ha sido modificado adquiriendo el nombre del proceso Bangalore. Actualmente se utiliza en granjas.
- b. VAM (van Maanen): Fue desarrollado por T. van Maanen y fue usado por primera vez en la compañía Vuilafvoer Maatschappij (VAM) en Países Bajos en el año 1931. Es una versión del proceso Indore, pero adaptado para tratar un gran volumen de residuos. Se hicieron 4 viaductos que fueron llenados con residuos con la ayuda de camiones, y la humedad se reguló rociando agua o recirculando licor de drenaje. Este fue el primer proceso que reconoció la necesidad de agua para mejorar el compostaje de residuos secos.
- c. Pila con volteo moderna: En sistemas grandes y de alta tecnología, el volteado es realizado por equipos especializados y las secciones transversales de las pilas pueden

tener geometrías rectangulares, trapezoidales o triangulares dependiendo de las características del material a compostar y el equipamiento. Se ha utilizado para compostar estiércol, lodos, hojas, pasto, etc. La ventilación puede ser natural o forzada. La primera vez que se usó fue en 1972 en Los Ángeles, Estados Unidos.

2. Lecho estático de sólidos

- a. Pila estática aireada (proceso Beltsville): Las pilas son construidas con una mezcla de lodos y agentes de carga, usualmente chips de madera. El oxígeno es suministrado con aireación forzada. Este tipo de sistemas es ampliamente utilizado para tratar lodos.
- b. Brikollari (Caspari, Briquetting): Los residuos son comprimidos en bloques y apilados en pallets con espacios de aire. La aireación ocurre por ventilación natural. Fue utilizado por primera vez en Alemania y Suiza en 1977. Ver Figura 52.
- c. Pelleting: Los lodos son extruidos en pellets con un diámetro de 1 cm. Los pellets luego son apilados para compostarlos. El oxígeno es suministrado con ventilación natural a través de los espacios entre pellets. Este sistema fue desarrollado en Alemania.
- d. Daneco: La compañía Daneco ha implementado un gran número de plantas para tratar residuos en Europa. Se utilizan pilas aireadas de forma forzada. La humedad se regula con sistemas de aerosol. Incluye pretratamiento para separar materiales indeseados y triturar aquellos compostables.

E.2.2.2 Reactores

1. Flujo vertical

a. Lecho móvil agitado:

- Earp-Thomas: Desarrollado por G. H. Earp-Thomas en Estados Unidos. El proceso es similar al reactor de múltiples hogares. Se apilan 8 a 10 cubiertas verticalmente. Los residuos se trituran hasta una consistencia de pasta, que luego es introducida al reactor con un inóculo de bacteria. La alimentación cae desde una cubierta a la siguiente gracias a una agitación central. El aire sube a través del reactor. La digestión toma de 1 a 3 días y luego es seguida por una maduración en la pila con volteo.
- Frazer-Eweson: Fue desarrollado por Eric Eweson. Los residuos son ubicados sobre un recipiente vertical con 4 cubiertas paralelas espaciadas entre sí. La alimentación cae de una cubierta a otra debido a que se abre de forma mecánica. El tiempo de retención era de 5 a 7 días en cada cubierta, dando un total de 20 a 28 días en el reactor.
- Jersey (John Thompson): Fue utilizado para tratar residuos, por primera vez en 1959 en Inglaterra. Consiste en 6 pisos compuestos cada uno por la mitad de un cilindro abierto hacia arriba. El cilindro gira para depositar el material en el siguiente cilindro. El tiempo de retención en cada piso es de 1 día, así, el material está un total de 6 días en el reactor. Posteriormente la fase de maduración ocurre en pilas con volteo por 6 semanas.
- Naturizer International: Fue desarrollado por Norman Pierson en 1950. Utiliza 6 cámaras de digestión ubicadas de forma vertical, donde el material pasa de una cámara a otra a través de una cinta transportadora. El tiempo de residencia total es de 6 días.

b. Lecho empacado:

- Beccari: Desarrollado por el Dr. Giovanni Beccari en 1920 para tratar estiércol. El reactor es un cubo que se carga por arriba y se descarga por abajo, con válvulas para suministrar o extraer aire. El tiempo de los ciclos típicamente es de 20 a 40 días.
- Boggiano-Pico: Fue una modificación del Beccari y fue el primer reactor tipo silo. Tiene un tiempo de ciclo de 30 días.
- Bordas: Es el reactor Beccari con una recirculación de lixiviado. El tiempo de ciclo es de 20 días.
- BAV: Fue el primer reactor tipo silo europeo, desarrollado por Biologische Abfallverwertungsgesellschaft (BAV). Consiste en una torre cilíndrica sin pisos interiores. La alimentación consiste en lodos, compost reciclado y acondicionadores, y se carga por la parte superior del reactor y el producto es removido por el fondo. El aire se suministra por el fondo de forma forzada. El tiempo de residencia es de 14 días, y la fase de maduración ocurre en pilas por 6 semanas.

2. Flujo horizontal

a. Tambor rotatorio:

- Dano: Desarrollado por Dano Ltda. en Dinamarca el año 1933 para compostar residuos. Corresponde a un reactor rotatorio inclinado de flujo disperso. Los residuos son volteados y granulados por abrasión. El tiempo de residencia es de 1 a 5 días, posteriormente la fase de maduración ocurre en pilas estáticas o pilas con volteo. Es un reactor muy popular para tratar residuos municipales.
- Fermascreen: Corresponde a un tambor hexagonal, que es cargado de forma intermitente. El tambor se abre para dejar entrar aire. El tiempo de detención es de 4 días.
- Voest-Alpine: Desarrollado por Voest-Alpine de Austria. Es similar al tambor Dano. Se utiliza por un corto tiempo de residencia para homogeneizar el material, luego se utilizan pilas estáticas por 21 días y, finalmente, la fase de maduración ocurre por 2 meses en dicha pila.

b. Bandejas agitadas:

- Fairfield-Hardy (Fairfiel, Compost System Co.): Reactor de tipo circular de 6 [m] para tratar lodos. Cuenta con un puente móvil que giraba agitando el material. El material es alimentado usando un sistema de cinta transportadora sobre el puente. El aire es inyectado desde el fondo del reactor.
- Snell: Tanque rectangular de 2 [m] con un piso equipado con ductos para aireación forzada, inclinado 6°. Posee un puente móvil con paletas para agitar y mover el material a lo largo del tanque. El tiempo de detención era de 5 a 8 días. Fue construido en Texas, en 1967.
- KOCH: Sistema de lecho agitado desarrollado por KOCH Transporttechnik GmbH de Alemania. Posee una estructura techada sin paredes. El material compostable se acumula en pilas de 3 [m] de alto. Sobre la pila se encuentran rieles, sobre los cuales se montan vigas que se apoyan sobre las pilas y tienen el ancho de estas. Sobre las vigas se soporta una máquina de torneado. Todo este sistema viaja por la pila con un patrón de zigzag.

- Proceso Siloda (OTV, OTVD): Desarrollado por Jean-Pierre Levasseur de Ommium de Traitements et de Valorisation des Dechets (OTV u OTVD). Consiste en contenedores paralelos de 4 [m] de ancho y 3 [m] de alto. El material es volteado con un sistema de paletas. Un tornillo transportador descarga el material y lo carga en el siguiente contenedor.
- c. Bandejas estáticas:
- BAV Tunnel Reactor (Ashbrook-Simon-Hartley Tunnel Reactor): Fue desarrollado por BAV en 1979. Corresponde a un reactor flujo pistón, con un área transversal rectangular. El volumen es de 500 [m³]. Usa una placa empujadora con movimiento hacia atrás y hacia delante, situada a la entrada de la alimentación. Este sistema ha sido aplicado para una gran variedad de sustratos, como lodo, estiércol y residuos orgánicos municipales. El tiempo de residencia es de 15 a 28 días, seguido de una maduración en pilas estáticas por 30 a 60 días.
 - Dynatherm (compost Systems Co.): Compost System Co. de Ohio h desarrollado un sistema modular de compostaje de tipo transportador para mover el material a lo largo del reactor, sin compactarlo. Se utiliza aireación forzada. El tiempo de residencia es de 23 días.
- d. Proceso sin flujo
- Herhof Box: Sistema batch desarrollado por Herhof Umwelttechnik GmbH de Alemania. El tiempo de ciclo es de 7 a 10 días, la aireación es controlado según el contenido de CO₂ en los gases de salida. Posteriormente se utilizan pilas con volteo para la fase de maduración.
 - ML Biocontainer: Desarrollado por MAB-Lentjes Energie ind Umwelttechnik en Alemania. Cada reactor es de 22 [m³]. Tiene un tiempo de ciclo de 10 a 14 días. La aireación es alternada con inyección y succión de aire. Luego se usa un sistema de pilas con volteo para la fase de maduración.

E.2.3 Reflexiones

Al igual que en el caso de digestión anaeróbica, la mayoría de los sistemas de compostaje son a gran escala.

La aireación es clave en todos los reactores de compostaje, y suele utilizarse aireación forzada. En un sistema de pequeña escala el flujo de sustrato es reducido, por lo que gran parte podría exponerse al aire, sin requerir utilizar ventiladores; si esto se hiciera en procesos industriales, se requeriría una gran área para colocar el sustrato, por lo que es infactible. Así, la aireación forzada podría no requerirse en el equipo, bastando la ventilación natural.

Para aquella fracción de material que no esté expuesta al aire debe asegurarse un FAS adecuado, es decir, espacio suficiente para que entre aire al sustrato, así que posiblemente se requiera reciclar compost o agregar acondicionadores.

Otro problema que presenta tratar un gran flujo de residuos es que se compacta: su propio peso lo aplasta. Esto se resuelve volteando la materia prima o agitándola para regenerar los espacios de aire, tal como ocurre en el sistema de pila con volteo, lecho agitado, tambor rotatorio y bandejas agitadas. Otra forma de solucionar el problema es apilando una baja masa de residuos, como en el

lecho agitado con cubiertas. En el equipo se puede dar fácilmente el último caso: la masa de sustrato es baja, por lo que la probabilidad de que se compacte se reduce considerablemente, así, no es necesario agitar para regenerar los espacios. En cualquier caso, debería evitarse acumular material de forma vertical. Esto es coherente, además, con exponer una gran área de sustrato al aire para la ventilación natural.

Cabe mencionar que la agitación también mejora la transferencia de masa y calor, provocando homogeneización, así que de todas formas sería conveniente agitar. Tal como en el caso de digestión anaeróbica, podría ocurrir de forma manual en el equipo, esporádicamente.

Note el lector que la discusión sobre cuál es el reactor más adecuado de las Reflexiones de la Digestión Anaeróbica son válidas para el compostaje. Así, resulta conveniente un reactor batch con agitación y un PFR.

Con lo anterior, en el equipo la materia orgánica debería estar expuesta al aire y no ser acumulada de forma vertical, también, se desea que exista agitación. Además, se prefieren reactores batch y PFR.

El reactor de lecho agitado con múltiples cubiertas podría permitir ventilación natural, exponiendo una gran área al aire, reducir la compactación al no acumular material de forma vertical y cuenta con agitación. Este sistema corresponde un PFR con agitación. Este sistema, entonces, podría configurar el equipo. Sin embargo, cuenta con un par de problemas que dificultan su implementación en pequeña escala:

- i) Se requiere que se abran las cubiertas del reactor para poder dejar caer el material, lo que representa un problema, pues requeriría que el usuario maneje las cubiertas. Este problema podría transformarse en otros, que podrían ser más sencillos de abordar, por ejemplo, no alimentar desde arriba, sino que alimentar cada cubierta y retirar el producto desde cada cubierta. Esta última disposición correspondería a varios reactores batch.
- ii) La agitación podría ser complicada, pues son bandejas que se agitan, así que se requiere un sistema más complicado que una agitación rotatoria.

El tambor rotatorio también podría ser una buena opción, si es de un radio pequeño para evitar la compactación y si está expuesto al aire (abierto). En este caso, la agitación es más sencilla, sin embargo, tal como se mencionó en la descripción de este reactor, podría presentarse mezcla axial, que no se desea en un PFR. Esto se soluciona utilizando celdas, sin embargo, en este caso se volvería complicado transferir el sustrato de una celda a otra.

Otra opción podría ser reactores CSTR, como tambor rotatorio de mezcla completa o bandejas agitadas, con una altura reducida para favorecer la exposición al aire y reducir la compactación. El problema de estos es que posiblemente requieran un tiempo de residencia mayor a los reactores PFR mencionados.

De los reactores históricos, se rescatan las siguientes ideas que podrían ser de utilidad:

En la mayoría de los casos, la fase de maduración se realiza en un sistema de pilas con volteo, porque no se necesita la aireación que ofrecen los otros reactores donde se realiza compostaje activo. Este último, de todas formas, puede ser utilizado para la fase de maduración.

En los sistemas de lecho móvil agitado, existen al menos tres formas para que la materia prima descienda de forma controlada: cubiertas que se abren, semicilindros que giran y cinta transportadora.

Los sistemas Frazee-Eweson, Jersey y Naturizer International tienen tiempos de residencia en el reactor principal diferentes, en particular, el tiempo del primero es mucho mayor al de los segundos, se presume que esto se debe a que en el primero ocurre tanto la fase de compostaje activo y el maduración en el reactor, y en los otros solo compostaje activo. Así, como referencia se tiene que el compostaje activo podría tomar alrededor de 6 días en sistemas de lecho móvil agitado. Por otro lado, el tambor rotatorio tradicional tiene un tiempo de residencia para el compostaje activo de 5 días aproximadamente. Los reactores batch tienen un tiempo de residencia de 7 a 10 días, superando a los sistemas anteriores posiblemente porque no cuenta con agitación.

El tambor rotatorio Fermascreen tiene una geometría hexagonal, y se encuentra abierto para dejar entrar aire. Esta última idea, que se había pensado anteriormente, entonces, es factible.

El sistema Indore es batch. En este se alternan materiales posiblemente para adecuar la materia prima (FAS, humedad, etc.) Esto podría ser de utilidad una vez definida las características de la materia prima y las características deseadas.

E.3 CONCLUSIÓN SOBRE LA COMPATIBILIDAD DEL COMPOSTAJE Y LA DIGESTIÓN ANAERÓBICA

Para cerrar este análisis, resta comentar la pertinencia de diseñar un equipo capaz de hacer compostaje y digestión anaeróbica, según los requerimientos del usuario.

Como ya se mencionó en la sección E.2, las condiciones necesarias para llevar a cabo la digestión anaeróbica y el compostaje difieren: las más exigentes corresponden al compostaje. Existen dos diferencias principales. La red de reacciones que sostienen la cinética es más compleja en el caso del compostaje y los procesos de cambio ocurren a una velocidad significativamente diferente, haciendo necesario un tiempo de residencia mayor, ligado especialmente con la fase de maduración. Así, un equipo que hace compostaje tiene un volumen mucho mayor que uno que hace digestión anaeróbica. La segunda razón es la necesidad de aire, que para llevarse a cabo requiere que el sustrato esté en contacto íntimo con la atmósfera. Estas diferencias constituyen contradicciones entre ambos procesos.

Por lo anterior, se opta por diseñar un equipo para solo uno de los procesos, y se selecciona la digestión anaeróbica por las razones expuestas en la sección 6.2.4 Selección de producto y proceso.

Anexo F RESULTADOS DE LA DOSIFICACIÓN DE RESIDUOS

F.1 CARACTERIZACIÓN DE LA MATERIA PRIMA: COMPOSICIÓN

La caracterización de diferentes materias primas ha sido realizada a partir de la información de la información extraída de la base de datos de composiciones de alimentos del Departamento de Agricultura de Estados Unidos [44]. La caracterización se encuentra en: <https://goo.gl/5a6Ggf> pestañas *Pasto, hojas_seca, hoja_fresca, guiso, brocoli, arroz, leche, pan, carne, aceite, queso, lechuga y manzana*.

F.2 DETERMINACIÓN DE PROPORCIONES RECOMENDADAS DE LA ALIMENTACIÓN

Se determinaron las proporciones en que deben alimentarse los residuos de cuidado alto y cuidado medio, para que la alimentación tenga una humedad y contenido de carbono y nitrógeno aceptable para el proceso de digestión anaeróbica.

Para realizar lo anterior, se confeccionó una planilla que permite calcular las características de humedad y contenido de *C* y *N* diferentes mezclas de residuos (se encuentra disponible en: <https://goo.gl/5a6Ggf> pestaña *Mezcla*). Dichas mezclas fueron creadas asumiendo que es posible dosificar residuos en proporciones del 25%, 50% y 75%, por ejemplo, se evaluó el caso de una alimentación con un 50% de contenido de manzanas y un 50% de queso. Se seleccionaron las mezclas que permiten obtener una alimentación dentro de los rangos aceptas de humedad y contenido *C* y *N* (las dosificaciones seleccionadas se encuentran en en: <https://goo.gl/5a6Ggf> pestañas *Dosificaciones 1, Dosificaciones 2, Dosificaciones 3, Dosificaciones 4, Dosificaciones 5 y Dosificaciones 6*). Un resumen de todas las mezclas seleccionadas se encuentra en <https://goo.gl/5a6Ggf> pestañas *Proporciones*.

F.3 CONSTRUCCIÓN DE FICHA PARA DOSIFICACIÓN

La ficha final que permite a los usuarios dosificar sus residuos, fue elaborada a partir de las proporciones concluidas de la alimentación. Primero, se normalizaron dichas proporciones (cálculos y resultados de este paso se encuentran disponibles en <https://goo.gl/5a6Ggf> pestaña *Proporciones normalizadas*). Posteriormente, se aplicó un algortimo utilizando las proporciones normalizadas para obtener la ficha (cálculos y resultados se encuentran en <https://goo.gl/5a6Ggf> pestaña *Ficha*).

Anexo G CÁLCULOS: DIMENSIONAMIENTO CONMINUCIÓN

Los cálculos y resultados del dimensionamiento de la conminución se encuentran en: <https://goo.gl/PYf2xR> pestaña *Conminución*.

Anexo H CÁLCULOS: DIMENSIONAMIENTO ALMACENAMIENTO Y MEZCLA DE RESIDUOS

Los cálculos y resultados del dimensionamiento del depósito de alimentación se encuentran en: <https://goo.gl/PYf2xR> pestaña *Almacenamiento y mezcla de residuos*.

Anexo I CÓDIGO MODELO 1

I.1 BIOGAS_MAIN_MODELO_1.M

```

1      %%Este archivo permite calcular      36
2      evolución de concentracion de      37      %%Rutinas:
3      compuestos en el reactor de biogas.  38
4      %%Simular luego de biogas_main_exp  39      %Rutina 1: 1, 2, 3, 2 y 4
5      cl;                                  40      %Rutina 2: 5 y 6
6      clear all;                           41      Alim=16;
7                                            42      diary Alim16_R2_85.txt;
8      global      ntm_s      tfinal2      43      A=[5 6]
9      factor_reduccion_casobase      f_red  44      %A=[1 2 3 2 4]
10     Nch4_max tfinal ynh3_liq ynh3_gas     45      conversion=0.85
11     P_nh3 Nnh3_salida yh2s_liq yh2s_gas   46      ncciclos=50;
12     P_h2s Fv_g_final Ngas_salida         47
13     Nh2s_salida SMliq_hum Rh2o Eh2o      48      %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
14     Hh2o_final C_salida H_salida O_salida  49
15     N_salida PM_salida CN x_modelo       50      for iconf=1:length(A);
16     Mliq_hum SMliq_hum Humedad D Fv_g     51      display('-----');
17     x_modelo k1 k2 k3 k4 k5 R alfa_grad   52      Configuracion=A(iconf)
18     alfa_rad L H S P_atm P_pa R_l R_m3    53      if A(iconf)==1
19     rho_s Fm_s Fv_s ntm_s nt_s rho_i Fm_i  54      f_red=1;
20     Fv_i ntm_i nt_i Fm Fv nt lambda_h2s   55      t=[0:0.1:99]';
21     lambda_nh3 lambda_ch4 lambda_co2     56      %t=[0:0.1:tfinal]';
22     lambda_h2o lambda_cl lambda_f gx      57
23     h_liq cp Ccrit_h2s Ccrit_nh3 Ccrit_ch4  58      ich4=1;
24     Ccrit_co2 Ccrit_h2o Ccrit_cl Ccrit_f  59      ifred=1;
25     z_columna xi1 xi2 xi3 xi4 xi5 xi6 xi7 xi8 xi9  60
26     xi10 xi11 xi12 xi13 xi14 xi15 xi16 xi17 xi18  61      %f_red=f_red*factor_reduccion_casoba
27     xi19 xi20 xi21 xi22 xi23 xi24 xi25 z x_max  62      se
28     x_export Cinter_cl Cinter_f Dcl Df rp a;  63      elseif A(iconf)==2
29                                           64      f_red
30     %p se obtiene de main_modeloexp      65      t=[0:0.1:99]';
31     p=[6.8506e-005; -5.1288e-001; 4.9879e-  66      %t=[0:0.1:tfinal]';
32     001; -5.0000e-001];                 67
33     tmax_exp=99.75171253;                68      ich4=1;
34                                           69      ifred=0;
35     %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%      70

```

```

71      %f_red=f_red*factor_reduccion_casoba      120      %Alimentacion
72      se                                          121      if Alim==1
73      elseif A(iconf)==3                        122      ntm_s=43.235; %numero de moles por
74      f_red                                      123      unidad de masa que entra al reactor [mol
75      %f_red=1;                                  124      sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
76      %t=[0:0.1:99]';                          125      C_celulosa=2.337; %valor inicial de la
77      t=[0:0.1:tfinal]';                      126      concentracion de celulosa [mol/m3].
78      tfinal2=tfinal;                          127      C_proteina=1.781;%valor inicial de la
79                                                 128      concentracion de proteina [mol/m3].
80      ich4=0;                                    129      C_acgraso=80.027; %valor inicial de la
81      ifred=1;                                    130      concentracion de acidos grasos
82                                                 131      [mol/m3].
83      elseif A(iconf)==4                        132      C_agua=24996.333; %valor inicial de la
84      f_red                                      133      concentracion de H2O [mol/m3].
85      %f_red=1;                                  134      C_cloro=18.625; %valor inicial de la
86      %t=[0:0.1:99]';                          135      concentracion de Cl total [mol/m3].
87      t=[0:0.1:tfinal2]';                    136      prop_R_S=4; %proporcion masica de
88                                                 137      reciclado [kg VS reciclado / kg VS sustrato]
89      ich4=0;                                    138
90      ifred=0;                                    139      elseif Alim==2
91                                                 140      ntm_s=43.235; %numero de moles por
92      %f_red=f_red*factor_reduccion_casoba      141      unidad de masa que entra al reactor [mol
93      se;                                          142      sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
94                                                 143      C_celulosa=2.337; %valor inicial de la
95      elseif A(iconf)==5                        144      concentracion de celulosa [mol/m3].
96      f_red                                      145      C_proteina=1.781;%valor inicial de la
97      t=[0:0.1:99]';                          146      concentracion de proteina [mol/m3].
98      %t=[0:0.1:tfinal]';                    147      C_acgraso=80.027; %valor inicial de la
99                                                 148      concentracion de acidos grasos
100     ich4=1;                                    149      [mol/m3].
101     ifred=0;                                    150      C_agua=24996.333; %valor inicial de la
102                                                151      concentracion de H2O [mol/m3].
103     %f_red=f_red*factor_reduccion_casoba      152      C_cloro=18.625; %valor inicial de la
104     se                                          153      concentracion de Cl total [mol/m3].
105                                                154      prop_R_S=2; %proporcion masica de
106     elseif A(iconf)==6                        155      reciclado [kg VS reciclado / kg VS sustrato]
107     f_red                                      156
108     %t=[0:0.1:99]';                          157      elseif Alim==3
109     t=[0:0.1:tfinal]';                    158      ntm_s=43.940; %numero de moles por
110                                                159      unidad de masa que entra al reactor [mol
111     ich4=0;                                    160      sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
112     ifred=0;                                    161      C_celulosa=0; %valor inicial de la
113                                                162      concentracion de celulosa [mol/m3].
114     %f_red=f_red*factor_reduccion_casoba      163      C_proteina=0;%valor inicial de la
115     se                                          164      concentracion de proteina [mol/m3].
116     end                                          165      C_acgraso=500.298; %valor inicial de la
117                                                166      concentracion de acidos grasos
118     vol_max=30%                               167      [mol/m3].
119

```

168	C_agua=24996.333; %valor inicial de la	217	C_proteina=1.41507;%valor inicial de la
169	concentracion de H2O [mol/m ³].	218	concentracion de proteina [mol/m ³].
170	C_cloro=18.625; %valor inicial de la	219	C_acgraso=406.833; %valor inicial de la
171	concentracion de Cl total [mol/m ³].	220	concentracion de acidos grasos
172	prop_R_S=2; %proporcion masica de	221	[mol/m ³].
173	reciclo [kg VS reciclo / kg VS sustrato]	222	C_agua=24911.111; %valor inicial de la
174		223	concentracion de H2O [mol/m ³].
175	elseif Alim==4	224	C_cloro=18.625; %valor inicial de la
176	ntm_s=43.099; %numero de moles por	225	concentracion de Cl total [mol/m ³].
177	unidad de masa que entra al reactor [mol	226	prop_R_S=2; %proporcion masica de
178	sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE	227	reciclo [kg VS reciclo / kg VS sustrato]
179	C_celulosa=3.953; %valor inicial de la	228	
180	concentracion de celulosa [mol/m ³].	229	elseif Alim==7
181	C_proteina=0;%valor inicial de la	230	ntm_s=42.963; %numero de moles por
182	concentracion de proteina [mol/m ³].	231	unidad de masa que entra al reactor [mol
183	C_acgraso=0; %valor inicial de la	232	sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
184	concentracion de acidos grasos	233	C_celulosa=3.493; %valor inicial de la
185	[mol/m ³].	234	concentracion de celulosa [mol/m ³].
186	C_agua=24996.333; %valor inicial de la	235	C_proteina=0.91118;%valor inicial de la
187	concentracion de H2O [mol/m ³].	236	concentracion de proteina [mol/m ³].
188	C_cloro=18.625; %valor inicial de la	237	C_acgraso=0; %valor inicial de la
189	concentracion de Cl total [mol/m ³].	238	concentracion de acidos grasos
190	prop_R_S=2; %proporcion masica de	239	[mol/m ³].
191	reciclo [kg VS reciclo / kg VS sustrato]	240	C_agua=24911.111; %valor inicial de la
192		241	concentracion de H2O [mol/m ³].
193	elseif Alim==5	242	C_cloro=18.625; %valor inicial de la
194	ntm_s=33.229; %numero de moles por	243	concentracion de Cl total [mol/m ³].
195	unidad de masa que entra al reactor [mol	244	prop_R_S=2; %proporcion masica de
196	sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE	245	reciclo [kg VS reciclo / kg VS sustrato]
197	C_celulosa=0; %valor inicial de la	246	
198	concentracion de celulosa [mol/m ³].	247	elseif Alim==8
199	C_proteina=7.155;%valor inicial de la	248	ntm_s=32.202; %numero de moles por
200	concentracion de proteina [mol/m ³].	249	unidad de masa que entra al reactor [mol
201	C_acgraso=0; %valor inicial de la	250	sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
202	concentracion de acidos grasos	251	C_celulosa=4.429; %valor inicial de la
203	[mol/m ³].	252	concentracion de celulosa [mol/m ³].
204	C_agua=24996.333; %valor inicial de la	253	C_proteina=3.376;%valor inicial de la
205	concentracion de H2O [mol/m ³].	254	concentracion de proteina [mol/m ³].
206	C_cloro=18.625; %valor inicial de la	255	C_acgraso=151.693; %valor inicial de la
207	concentracion de Cl total [mol/m ³].	256	concentracion de acidos grasos
208	prop_R_S=2; %proporcion masica de	257	[mol/m ³].
209	reciclo [kg VS reciclo / kg VS sustrato]	258	C_agua=18027.778; %valor inicial de la
210		259	concentracion de H2O [mol/m ³].
211	elseif Alim==6	260	C_cloro=18.625; %valor inicial de la
212	ntm_s=43.648; %numero de moles por	261	concentracion de Cl total [mol/m ³].
213	unidad de masa que entra al reactor [mol	262	prop_R_S=2; %proporcion masica de
214	sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE	263	reciclo [kg VS reciclo / kg VS sustrato]
215	C_celulosa=0; %valor inicial de la	264	
216	concentracion de celulosa [mol/m ³].	265	elseif Alim==9

```

266 ntm_s=33.229; %numero de moles por
267 unidad de masa que entra al reactor [mol
268 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
269 C_celulosa=0; %valor inicial de la
270 concentracion de celulosa [mol/m3].
271 C_proteina=2.65326;%valor inicial de la
272 concentracion de proteina [mol/m3].
273 C_acgraso=762.812; %valor inicial de la
274 concentracion de acidos grasos
275 [mol/m3].
276 C_agua=18027.778; %valor inicial de la
277 concentracion de H2O [mol/m3].
278 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
279 concentracion de Cl total [mol/m3].
280 prop_R_S=2; %proporcion masica de
281 reciclaje [kg VS reciclaje / kg VS sustrato]
282
283 elseif Alim==10
284 ntm_s=31.945; %numero de moles por
285 unidad de masa que entra al reactor [mol
286 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
287 C_celulosa=6.549; %valor inicial de la
288 concentracion de celulosa [mol/m3].
289 C_proteina=1.70847;%valor inicial de la
290 concentracion de proteina [mol/m3].
291 C_acgraso=0; %valor inicial de la
292 concentracion de acidos grasos
293 [mol/m3].
294 C_agua=24911.111; %valor inicial de la
295 concentracion de H2O [mol/m3].
296 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
297 concentracion de Cl total [mol/m3].
298 prop_R_S=2; %proporcion masica de
299 reciclaje [kg VS reciclaje / kg VS sustrato]
300
301 elseif Alim==11
302 ntm_s=31.954; %numero de moles por
303 unidad de masa que entra al reactor [mol
304 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
305 C_celulosa=0; %valor inicial de la
306 concentracion de celulosa [mol/m3].
307 C_proteina=13.63;%valor inicial de la
308 concentracion de proteina [mol/m3].
309 C_acgraso=0; %valor inicial de la
310 concentracion de acidos grasos
311 [mol/m3].
312 C_agua=18027.778; %valor inicial de la
313 concentracion de H2O [mol/m3].
314
315 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
316 concentracion de Cl total [mol/m3].
317 prop_R_S=2; %proporcion masica de
318 reciclaje [kg VS reciclaje / kg VS sustrato]
319
320 elseif Alim==12
321 ntm_s=50.366; %numero de moles por
322 unidad de masa que entra al reactor [mol
323 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
324 C_celulosa=0.984; %valor inicial de la
325 concentracion de celulosa [mol/m3].
326 C_proteina=0.750;%valor inicial de la
327 concentracion de proteina [mol/m3].
328 C_acgraso=33.710; %valor inicial de la
329 concentracion de acidos grasos
330 [mol/m3].
331 C_agua=29500.000; %valor inicial de la
332 concentracion de H2O [mol/m3].
333 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
334 concentracion de Cl total [mol/m3].
335 prop_R_S=2; %proporcion masica de
336 reciclaje [kg VS reciclaje / kg VS sustrato]
337
338 elseif Alim==13
339 ntm_s=50.594; %numero de moles por
340 unidad de masa que entra al reactor [mol
341 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
342 C_celulosa=0; %valor inicial de la
343 concentracion de celulosa [mol/m3].
344 C_proteina=0.58961;%valor inicial de la
345 concentracion de proteina [mol/m3].
346 C_acgraso=169.514; %valor inicial de la
347 concentracion de acidos grasos
348 [mol/m3].
349 C_agua=29500.000; %valor inicial de la
350 concentracion de H2O [mol/m3].
351 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
352 concentracion de Cl total [mol/m3].
353 prop_R_S=2; %proporcion masica de
354 reciclaje [kg VS reciclaje / kg VS sustrato]
355
356 elseif Alim==14
357 ntm_s=50.309; %numero de moles por
358 unidad de masa que entra al reactor [mol
359 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
360 C_celulosa=1.455; %valor inicial de la
361 concentracion de celulosa [mol/m3].
362 C_proteina=0.37966;%valor inicial de la
363 concentracion de proteina [mol/m3].

```

```

363 C_acgraso=0.000; %valor inicial de la
364 concentracion de acidos grasos
365 [mol/m3].
366 C_agua=29500.000; %valor inicial de la
367 concentracion de H2O [mol/m3].
368 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
369 concentracion de Cl total [mol/m3].
370 prop_R_S=2; %proporcion masica de
371 reciclaje [kg VS reciclaje / kg VS sustrato]
372
373 elseif Alim==15
374 ntm_s=50.311; %numero de moles por
375 unidad de masa que entra al reactor [mol
376 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
377 C_celulosa=0; %valor inicial de la
378 concentracion de celulosa [mol/m3].
379 C_proteina=3.014;%valor inicial de la
380 concentracion de proteina [mol/m3].
381 C_acgraso=0.000; %valor inicial de la
382 concentracion de acidos grasos
383 [mol/m3].
384 C_agua=29500.000; %valor inicial de la
385 concentracion de H2O [mol/m3].
386 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
387 concentracion de Cl total [mol/m3].
388 prop_R_S=2; %proporcion masica de
389 reciclaje [kg VS reciclaje / kg VS sustrato]
390
391 elseif Alim==16
392 ntm_s=47.121; %numero de moles por
393 unidad de masa que entra al reactor [mol
394 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
395 C_celulosa=0; %valor inicial de la
396 concentracion de celulosa [mol/m3].
397 C_proteina=1.00234;%valor inicial de la
398 concentracion de proteina [mol/m3].
399 C_acgraso=288.173; %valor inicial de la
400 concentracion de acidos grasos
401 [mol/m3].
402 C_agua=27205.556; %valor inicial de la
403 concentracion de H2O [mol/m3].
404 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
405 concentracion de Cl total [mol/m3].
406 prop_R_S=2; %proporcion masica de
407 reciclaje [kg VS reciclaje / kg VS sustrato]
408
409 elseif Alim==17
410 ntm_s=38.190; %numero de moles por
411 unidad de masa que entra al reactor [mol
412 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
413 C_celulosa=0; %valor inicial de la
414 concentracion de celulosa [mol/m3].
415 C_proteina=2.06365;%valor inicial de la
416 concentracion de proteina [mol/m3].
417 C_acgraso=593.298; %valor inicial de la
418 concentracion de acidos grasos
419 [mol/m3].
420 C_agua=21305.556; %valor inicial de la
421 concentracion de H2O [mol/m3].
422 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
423 concentracion de Cl total [mol/m3].
424 prop_R_S=2; %proporcion masica de
425 reciclaje [kg VS reciclaje / kg VS sustrato]
426
427 elseif Alim==18
428 ntm_s=53.075; %numero de moles por
429 unidad de masa que entra al reactor [mol
430 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
431 C_celulosa=0; %valor inicial de la
432 concentracion de celulosa [mol/m3].
433 C_proteina=0.29481;%valor inicial de la
434 concentracion de proteina [mol/m3].
435 C_acgraso=84.757; %valor inicial de la
436 concentracion de acidos grasos
437 [mol/m3].
438 C_agua=31138.889; %valor inicial de la
439 concentracion de H2O [mol/m3].
440 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
441 concentracion de Cl total [mol/m3].
442 prop_R_S=2; %proporcion masica de
443 reciclaje [kg VS reciclaje / kg VS sustrato]
444
445 elseif Alim==19
446 ntm_s=48.113; %numero de moles por
447 unidad de masa que entra al reactor [mol
448 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
449 C_celulosa=0; %valor inicial de la
450 concentracion de celulosa [mol/m3].
451 C_proteina=0.88442;%valor inicial de la
452 concentracion de proteina [mol/m3].
453 C_acgraso=254.271; %valor inicial de la
454 concentracion de acidos grasos
455 [mol/m3].
456 C_agua=27861.111; %valor inicial de la
457 concentracion de H2O [mol/m3].

```

```

458 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
459 concentracion de Cl total [mol/m³].
460 prop_R_S=2; %proporcion masica de
461 recicló [kg VS recicló / kg VS sustrato]
462
463 elseif Alim==20
464 ntm_s=45.632; %numero de moles por
465 unidad de masa que entra al reactor [mol
466 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
467 C_celulosa=0; %valor inicial de la
468 concentracion de celulosa [mol/m³].
469 C_proteina=1.17923;%valor inicial de la
470 concentracion de proteina [mol/m³].
471 C_acgraso=339.028; %valor inicial de la
472 concentracion de acidos grasos
473 [mol/m³].
474 C_agua=26222.222; %valor inicial de la
475 concentracion de H2O [mol/m³].
476 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
477 concentracion de Cl total [mol/m³].
478 prop_R_S=2; %proporcion masica de
479 recicló [kg VS recicló / kg VS sustrato]
480 end
481
482 %Composicion del recicló
483 C_salida=10.869;
484 H_salida=21.214;
485 O_salida= 9.1457;
486 N_salida=1;
487 Hh2o_final=0.90741;
488 PM_salida=(C_salida*12+H_salida*1+O_
489 salida*16+N_salida*14)/1000; %kg/mol
490
491 for i=1:nciclos
492 [z,Cliq,Tliq,Tgas,Cgas]=biogas_modelo(t,
493 p,prop_R_S,C_celulosa,C_proteina,C_ac
494 graso,C_agua,C_cloro);
495 end
496 clc
497 C_salida
498 H_salida
499 O_salida
500 N_salida
501 Hh2o_final
502 display('-----');
503 %figure(1);
504 %plot(z,Cliq(:,:));
505 %legend('Concentracion de
506 celulosa','Concentracion de
507 glucosa','Concentracion de
508 proteina','Concentracion de
509 aminoacidos','Concentracion de
510 sulfato','Concentracion de acidos
511 grasos','Concentracion de
512 microorganismos','Concentracion de
513 NH3','Concentracion de
514 O2','Concentracion de
515 CO2','Concentracion de
516 H2O','Concentracion de Cl
517 total','Concentracion de F total');
518 %xlabel('Largo de reactor (m)')
519 %ylabel('Concentracion en fase
520 liquida(mol/m3)');
521 %title('Concentracion de compuestos en
522 fase liquida vs largo del reactor');
523
524 %figure(2);
525 %plot(z,Cliq(:,1));
526 %legend('Concentracion de celulosa');
527 %xlabel('Largo de reactor (m)')
528 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
529 %title('Concentracion de celulosa en fase
530 liquida vs largo del reactor');
531 %%%
532 %figure(3);
533 %plot(z,Cliq(:,2));
534 %legend('Concentracion de glucosa');
535 %xlabel('Largo de reactor (m)')
536 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
537 %title('Concentracion de glucosa en fase
538 liquida vs largo del reactor');
539 %
540 %figure(4);
541 %plot(z,Cliq(:,3));
542 %legend('Concentracion de proteina');
543 %xlabel('Largo de reactor (m)')
544 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
545 %title('Concentracion de proteina en
546 fase liquida vs largo del reactor');
547 %%%
548 %figure(5);
549 %plot(z,Cliq(:,4));
550 %legend('Concentracion de
551 aminoacidos');
552 %xlabel('Largo de reactor (m)')
553 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
554 %title('Concentracion de aminoacidos en
555 fase liquida vs largo del reactor');

```

```

556     %%%
557     %%%figure(6);
558     %%%plot(z,Cliq(:,5));
559     %%%legend('Concentracion de H2S');
560     %%%xlabel('Largo de reactor (m)')
561     %%%ylabel('Concentracion
562     (mol/m3)');
563     %%%title('Concentracion de H2S en
564     fase liquida vs largo del reactor');
565     %%%
566     %figure(7);
567     %plot(z,Cliq(:,6));
568     %legend('Concentracion de acidos
569     grasos');
570     %xlabel('Largo de reactor (m)')
571     %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
572     %title('Concentracion de acidos grasos
573     en fase liquida vs largo del reactor');
574
575     %figure(8);
576     %plot(z,Cliq(:,7));
577     %legend('Concentracion de
578     microorganismos');
579     %xlabel('Largo de reactor (m)')
580     %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
581     %title('Concentracion de
582     microorganismos en fase liquida vs largo
583     del reactor');
584     %
585     %figure(9);
586     %plot(z,Cliq(:,8));
587     %legend('Concentracion de NH3');
588     %xlabel('Largo de reactor (m)')
589     %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
590     %title('Concentracion de NH3 en fase
591     liquida vs largo del reactor');
592
593     %figure(10);
594     %plot(z,Cliq(:,9));
595     %legend('Concentracion de CH4');
596     %xlabel('Largo de reactor (m)')
597     %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
598     %title('Concentracion de CH4 en fase
599     liquida vs largo del reactor');
600
601     %figure(11);
602     %plot(z,Cliq(:,10));
603     %legend('Concentracion de CO2');
604     %xlabel('Largo de reactor (m)')
605     %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
606     %title('Concentracion de CO2 en fase
607     liquida vs largo del reactor');
608
609     %figure(12);
610     %plot(z,Cliq(:,11));
611     %legend('Concentracion de H2O');
612     %xlabel('Largo de reactor (m)')
613     %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
614     %title('Concentracion de H2O en fase
615     liquida vs largo del reactor');
616     %
617     %figure(13);
618     %plot(z,Cliq(:,12));
619     %legend('Concentracion de Cl total');
620     %xlabel('Largo de reactor (m)')
621     %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
622     %title('Concentracion de Cl total en fase
623     liquida vs largo del reactor');
624     %
625     %figure(14);
626     %plot(z,Cliq(:,13));
627     %legend('Concentracion de F total');
628     %xlabel('Largo de reactor (m)')
629     %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
630     %title('Concentracion de F total en fase
631     liquida vs largo del reactor');
632     %
633     %figure(15);
634     %plot(z,Tliq(:,1));
635     %legend('Temperatura de la fase liquida
636     del reactor');
637     %xlabel('Largo de reactor (m)');
638     %ylabel('Temperatura (K)');
639     %title('Temperatura de la fase liquida vs
640     largo de reactor');
641     %
642     %%Graficos para el gas
643     %figure(16);
644     %plot(z,Cgas(:,:));
645     %legend('Concentracion de
646     H2S','Concentracion de
647     NH3','Concentracion de
648     CH4','Concentracion de
649     CO2','Concentracion de
650     H2O','Concentracion de Cl
651     total','Concentracion de F total');
652     %xlabel('Largo de reactor (m)')

```



```

653 %ylabel('Concentracion en fase gas
654 (mol/m3)');
655 %title('Concentracion de compuestos en
656 fase gas vs largo total del reactor');
657 %
658 %figure(17);
659 %plot(z,Cgas(:,1));
660 %legend('Concentracion de H2S');
661 %xlabel('Largo total de reactor (m)')
662 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
663 %title('Concentracion de H2S en fase gas
664 vs largo total del reactor');
665 %
666 %figure(18);
667 %plot(z,Cgas(:,2));
668 %legend('Concentracion de NH3');
669 %xlabel('Largo de total reactor (m)')
670 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
671 %title('Concentracion de NH3 en fase gas
672 vs largo total del reactor');
673 %
674 %figure(19);
675 %plot(z,Cgas(:,3));
676 %legend('Concentracion de CH4');
677 %xlabel('Largo total de reactor (m)')
678 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
679 %title('Concentracion de CH4 en fase gas
680 vs largo total del reactor');
681 %%
682 %figure(20);
683 %plot(z,Cgas(:,4));
684 %legend('Concentracion de CO2');
685 %xlabel('Largo total de reactor (m)')
686 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
687 %title('Concentracion de CO2 en fase gas
688 vs largo total del reactor');
689 %
690 %figure(21);
691 %plot(z,Cgas(:,5));
692 %legend('Concentracion de H2O');
693 %xlabel('Largo total de reactor (m)')
694 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
695 %title('Concentracion de H2O en fase gas
696 vs largo total del reactor');
697 %
698 %figure(22);
699 %plot(z,Cgas(:,6));
700 %legend('Concentracion de Cl total');
701 %xlabel('Largo total de reactor (m)')
702 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
703 %title('Concentracion de Cl total en fase
704 gas vs largo total del reactor');
705 %
706 %figure(23);
707 %plot(z,Tgas(:,7));
708 %legend('Concentracion de F total');
709 %xlabel('Largo total de reactor (m)')
710 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
711 %title('Concentracion de FI total en fase
712 gas vs largo total del reactor');
713 %
714 %figure(24);
715 %plot(z,Tgas(:,1));
716 %legend('Temperatura de la fase gas del
717 reactor');
718 %xlabel('Largo total de reactor (m)');
719 %ylabel('Temperatura (K)');
720 %title('Temperatura de la fase gas vs
721 largo total de reactor');
722 %
723 %figure(25);
724 %plot(z,Humedad);
725 %legend('Humedad de la fase liquida');
726 %xlabel('Largo de reactor (m)');
727 %ylabel('Humedad (Fraccion masica)');
728 %title('Humedad de la fase liquida vs
729 largo de reactor');
730 %
731 %figure(26);
732 %plot(z,x_modelo(:,17));
733 %legend('Moles de CH4 (mol)');
734 %xlabel('Largo de reactor (m)');
735 %ylabel('CH4 (mol)');
736 %title('Moles de CH4 en la fase gaseosa
737 vs largo de reactor');
738 %
739 %figure(27);
740 %plot(z,CN);
741 %legend('CN');
742 %xlabel('Largo de reactor (m)');
743 %ylabel('Proporcion C:N');
744 %
745 %figure(28);
746 %plot(z,Eh2o);
747 %legend('Flujo de H2O extra requerido');
748 %xlabel('Largo de reactor (m)');
749 %ylabel('Flujo de H2O (kg/s)');
750

```

```

751     if ich4
752     Nch4_max=x_modelo(length(z),17);
753     end
754
755     derivCch4=zeros(size(z));
756     for i=1:length(z)
757     derivCch4(i)=abs((Nch4_max-
758     x_modelo(i,17))/(Nch4_max));
759     end
760     check=derivCch4<=(1-conversion);
761     for i=1:length(z)
762     if check(i)>0
763     largo_m=z(i)
764     i
765     break;
766     end
767     end
768
769
770     %Mostrar
771     v_ms=Fv/S%m/s
772     largo_batch_1d_m=v_ms*3600*24 %m
773     Cch4_max=x_modelo(length(z),17)
774     %[mol/m3]
775     display('-----');
776     v_mm=v_ms*1000 %cm
777     largo_cm=largo_m*100 %cm
778     tau_d=largo_m/v_ms/3600/24 %d
779     tfinal=tau_d;
780     vol_l=S*largo_m*1000 %l
781     factor_reduccion_casobase=vol_max/vo
782     l_l; %multiplicar por este valor el caso
783     base y recalculer para obtener un
784     volumen de 40 l
785     largo_batch_1d_cm=largo_batch_1d_m
786     *100 %cm
787     if ifred
788     %f_red=factor_reduccion_casobase;
789     f_red=f_red*factor_reduccion_casobase
790     ;
791     end
792     Caso_base_kgdia=Fm_s*3600*24
793     Reciclo_kg_dia=Fm_i*3600*24
794     Proporciontotal_reciclo_sustrato=Fm_i/
795     Fm_s
796
797     %display('-----');
798     %Rh2o
799     %display('-----');
800     display('----gas----');
801     Fv_g_m3_s=Fv_g_final
802     Ngas_salida_mol_s=Ngas_salida
803     display('----h2s----');
804     Nh2s_gas_mol_s=Nh2s_salida
805     y_h2s_gas= yh2s_gas
806     %P_h2s_atm=P_h2s
807     Nh2s_liq_mol_s=x_modelo(length(z),5)*
808     Fv
809     y_h2s_liq=yh2s_liq
810     H_h2s_test=x_modelo(length(z),5)/yh2s
811     _gas/P_pa
812     display('----nh3----');
813     Nnh3_gas_mol_s=Nnh3_salida
814     y_nh3_gas= ynh3_gas
815     %P_nh3_atm=P_nh3
816     Nnh3_liq_mol_s=x_modelo(length(z),8)
817     *Fv
818     y_nh3_liq=ynh3_liq
819     H_nh3_test=x_modelo(length(z),8)/ynh
820     3_gas/P_pa
821     display('----h2o----');
822     Nh2o_gas_mol_s=x_modelo(length(z),1
823     9)
824     y_h2o_gas=Nh2o_gas_mol_s/Ngas_sali
825     da_mol_s
826     Fv_i=Fv_i*3600*24
827     end
828     diary off;

```

1.2 BIOGAS_MODELO.M

```

1     function
2     [z,Cliq,Tliq,Tgas,Cgas]=biogas_modelo(t,
3     p,prop_R_S,C_celulosa,C_proteina,C_ac
4     graso,C_agua,C_cloro);
5     global ntm_s f_red tfinal ynh3_liq
6     ynh3_gas P_nh3 Nnh3_salida yh2s_liq
7     yh2s_gas P_h2s Fv_g_final Ngas_salida
8     Nh2s_salida SMliq_hum Rh2o Eh2o
9     Hh2o_final C_salida H_salida O_salida
10    N_salida PM_salida CN x_modelo
11    Mliq_hum SMliq_hum Humedad D
12    Cinter Fv_g x_modelo k1 k2 k3 k4 k5 R
13    alfa_grad alfa_rad L H S P_atm P_pa R_l
14    R_m3 rho_s Fm_s Fv_s ntm_s nt_s rho_i

```

15	Fm_i Fv_i ntm_i nt_i Fm Fv nt	64	P_pa=P_atm*101325; %presion del gas
16	lambda_h2s lambda_nh3 lambda_ch4	65	en Pa [Pa]
17	lambda_co2 lambda_h2o lambda_cl	66	R_l=0.08205746; %constante gases
18	lambda_f gx h_liq cp Ccrit_h2s Ccrit_nh3	67	ideales en litros [l·atm/(mol·K)]
19	Ccrit_ch4 Ccrit_co2 Ccrit_h2o Ccrit_cl	68	R_m3=8.315684; %constante gases
20	Ccrit_f z_columna xi1 xi2 xi3 xi4 xi5 xi6	69	ideales en m³ [m³·Pa/(mol·K)]
21	xi7 xi8 xi9 xi10 xi11 xi12 xi13 xi14 xi15	70	
22	xi16 xi17 xi18 xi19 xi20 xi21 xi22 xi23 xi24	71	%Constantes alimentacion: Sustrato
23	xi25 z x_max x_export Cinter_cl Cinter_f	72	rho_s=590; %densidad aparente [kg
24	Dcl Df rp a;	73	sustrato/m³ sustrato].
25	%%Devuelve matriz de concentraciones	74	Fm_s=f_red*0.6/24/60/60; % flujo
26	y temperaturas en el espacio, a partir de	75	masico [kg sustrato/s]. EDITABLE
27	la esolucion de EDOs para la digestion	76	Fv_s=Fm_s/rho_s; %flujo volumetrico
28	anaerobica	77	[m³ sustrato/s].
29		78	nt_s=ntm_s*Fm_s;%numero total de
30	%%PROPORCION CINETICA	79	moles que entran por unidad de tiempo
31	aa_gluc=0.722;	80	al reactor(fase sol-liq). Se asumira
32	acgraso_gluc=0.444;	81	constante para el balance de energia
33		82	[mol sustrato/s].
34	%%CONSTANTES	83	rp=2e-3; %radio de particula [m].
35	%Constantes por ajustar: Primero se	84	a_kg=18000; %area BET de los residuos
36	exportan los parametros, para que esten	85	[m²/kg]
37	disponibles como variables globales para	86	a=a_kg*rho_s; %area especifica de los
38	la funcion derivada. La rutina de	87	residuos [m²/m³ residuos]
39	optimizacion no permite que las	88	VS_S=(C_celulosa*32.4+C_proteina*17.
40	variables de optimizacion p(i) sean	89	9+C_acgraso*0.256)*Fv_s;%kg/s de VS
41	variables globales.	90	en el sustrato.
42	k1=p(1);	91	
43	k2=0.5*p(1)*(1+p(2));	92	%Constantes alimentacion: Inoculo
44	k3=aa_gluc*k1*(1+p(3));	93	rho_i=Hh2o_final*1000+(1-
45	k4=aa_gluc*k2*(1+p(3));	94	Hh2o_final)*590; %densidad
46	k5=acgraso_gluc*k2*(1+p(4));	95	(sup:agua)[kg inoculo/m³ inoculo].
47		96	Fm_i=prop_R_S*VS_S/(1-Hh2o_final);
48	%Constantes fisicas del reactor	97	%Fm_i es flujo masico [kg reciclo/s].
49	R=0.075; %radio del lecho [m] EDITABLE	98	EDITABLE
50	VARIAR	99	Fv_i=Fm_i/rho_i; %flujo volumetrico [m³
51	alfa_grad=45; %grado de apertura del	100	inoculo /s].
52	lecho [grados] EDITABLE	101	ntm_i=Hh2o_final/0.018+(1-
53	alfa_rad= alfa_grad*2*pi/360; %grado	102	Hh2o_final)/PM_salida; %numero de
54	de apertura de lecho [radianes]	103	moles por unidad de masa que entra al
55	L=2*sin(alfa_rad/2)*R; %ancho del lecho	104	reactor [mol inoculo/kg inoculo].
56	[m].	105	EDITABLE
57	H=R*(1+cos(alfa_rad/2)); %altura del	106	nt_i=ntm_i*Fm_i;%numero total de
58	lecho [m].	107	moles que entran por unidad de tiempo
59	S=(2*pi-	108	al reactor(fase sol-liq). Se asumira
60	alfa_rad)*R^2/2+L*cos(alfa_rad/2)*R;	109	constante para el balance de energia
61	%area transversal del lecho [m²].	110	[mol inoculo/s].
62	P_atm=1; %presion del gas en atm [atm]	111	
63	EDITABLE	112	%Constantes alimentacion

113	Fm=Fm_s+Fm_i; %flujo masico total que	161	Ccrit_cl=259.50; %Concentracion limite
114	entra al reactor [kg/s].	162	de H2S en el liquido [mol/m ³]
115	Fv=Fv_s+Fv_i; %flujo volumetrico total	163	Ccrit_f=484.25; %Concentracion limite
116	que entra al reactor [m ³ /s].	164	de H2S en el liquido [mol/m ³]
117	nt=nt_s+nt_i; %numero total de moles	165	
118	que entran al reactor [mol/s].	166	%Otros
119		167	Cinter_cl=0; %[mol/m ³]
120	%Constantes alimentacion: Energia	168	Dcl=2.23e-9;%Difusividad del cl [m ² /s]
121	lambda_h2s=18600;%calor latente de	169	
122	cambio de fase del H2S [J/mol].	170	%%RESOLUCION
123	lambda_nh3=22700;%calor latente de	171	z_columna=(t*(24*60*60))*Fv/S;%[m];
124	cambio de fase del NH3 [J/mol].	172	%cambio de variables tiempo a distancia
125	lambda_ch4=8600;%calor latente de	173	de reactor (largo). z_columna es un
126	cambio de fase del CH4 [J/mol].	174	vector columna en [m].
127	lambda_co2=25256;%calor latente de	175	
128	cambio de fase del CO2 [J/mol].	176	%CB para el primer z. Evaluaremos cada
129	lambda_h2o=40626;%calor latente de	177	x(i). %VER EXCEL,EXPERIMENTOS
130	cambio de fase del H2O [J/mol].	178	(alimentacion).
131	lambda_cl=10388;%calor latente de	179	xi1=(C_celulosa*Fv_s)/Fv; %valor inicial
132	cambio de fase del Cl [J/mol].	180	de la concentracion de celulosa
133	lambda_f=5567;%calor latente de	181	[mol/m ³]. EDITABLE
134	cambio de fase del F [J/mol].	182	xi2=0; %valor inicial de la concentracion
135	gx=757.1;%generacion de calor	183	de glucosa [mol/m ³].
136	especifica de los MO [J/(mol·s)].	184	xi3=(C_proteina*Fv_s)/Fv; %valor inicial
137	h_liq=4.54;%coef. global de	185	de la concentracion de proteina
138	transferencia de calor en el liquido	186	[mol/m ³]. EDITABLE
139	[W/(m ² ·K)]	187	xi4=0; %valor inicial de la concentracion
140	cp=75.348;%Calor especifico del agua	188	de amino acidos [mol/m ³].
141	[J/mol·K]	189	xi5=0; %valor inicial de la concentracion
142		190	de H2S [mol/m ³].
143	%Constantes evaporacion:	191	xi6=(C_acgraso*Fv_s)/Fv; %valor inicial
144	Concentraciones limite de diferentes	192	de la concentracion de acidos grasos
145	componentes en la fase liquida. Sobre	193	[mol/m ³]. EDITABLE
146	este valor (semejante a la solubilidad)	194	xi7=(0*Fv_i)/Fv; %valor inicial de la
147	cada molecula saldra a la fase gas en la	195	concentracion de los MO [mol/m ³].
148	misma tasa en que se genere. Usaremos	196	xi8=0; %valor inicial de la concentracion
149	datos de solubilidad a 40°C	197	de NH3 [mol/m ³].
150	Ccrit_h2s=70.59; %Concentracion limite	198	xi9=0; %valor inicial de la concentracion
151	de H2S en el liquido [mol/m ³]	199	de CH4 [mol/m ³].
152	Ccrit_nh3=18823.53; %Concentracion	200	xi10=0; %valor inicial de la concentracion
153	limite de NH3 en el liquido [mol/m ³]	201	de CO2 [mol/m ³].
154	Ccrit_ch4=0; %Ccrit_ch4=1.00;	202	xi11=(C_agua*Fv_s+Hh2o_final*Fm_i/0.
155	%Concentracion limite de CH4 en el	203	018)/Fv; %valor inicial de la
156	liquido [mol/m ³]	204	concentracion de H2O [mol/m ³].
157	Ccrit_co2=22.73; %Concentracion limite	205	xi12=(C_cloro*Fv_s)/Fv; %valor inicial de
158	de H2S en el liquido [mol/m ³]	206	la concentracion de Cl total [mol/m ³].
159	Ccrit_h2o=55555.56; %Concentracion	207	xi13=0; %valor inicial de la concentracion
160	limite de H2S en el liquido [mol/m ³]	208	de F total [mol/m ³].

```

209 xi14=36+273.15; %valor inicial de la
210 temperatura [K].
211 xi15=0; %valor inicial del flujo molar de
212 H2S en fase gas [mol/s].
213 xi16=0; %valor inicial del flujo molar de
214 NH3 en fase gas [mol/s].
215 xi17=0; %valor inicial del flujo molar de
216 CH4 en fase gas [mol/s].
217 xi18=0; %valor inicial del flujo molar de
218 CO2 en fase gas [mol/s].
219 xi19=0; %valor inicial del flujo molar de
220 H2O en fase gas [mol/s].
221 xi20=0; %valor inicial del flujo molar de
222 Cl en fase gas [mol/s].
223 xi21=0; %valor inicial del flujo molar de F
224 en fase gas [mol/s].
225 xi22=0; %valor inicial del flujo molar total
226 en fase gas [mol/s].
227 xi23=0;%valor inicial de la concentracion
228 de glucosa no degradable [mol/m³].
229 xi24=0;%valor inicial de la concentracion
230 de aa no degradable [mol/m³].
231 xi25=0;%valor inicial de la concentracion
232 de acgraso no degradable [mol/m³].
233 xi26=(1-
234 Hh2o_final)*Fm_i*(1/PM_salida)/Fv;%
235 valor inicial de concentracion de especie
236 'inerte organico' que entra con el reciclo
237 [mol/m³]
238
239 %Solucion
240 lside_options('absolute tolerance',1e-
241 2);
242 %lside_options('integration
243 method','stiff');
244 %Matriz para espacio en z
245 z=z_columna';%en [m] un vector fila,
246 para ser compatible con lside.
247 %valor de las concentraciones en z
248
249 x_max=[xi1;xi1;xi3;xi3;xi6;xi7;xi1;xi1;
250 xi1;xi11;xi12;xi12;xi14;1;1;1;1;1;1;1;
251 1;1;1]; %valores maximos permitidos
252 lside_options ("integration
253 method","stiff");
254 %lside_options ("initial step size",1e-
255 3);
256 x_modelo=lside('biogas_reciclo_dCdz',[
257 xi1;xi2;xi3;xi4;xi5;xi6;xi7;xi8;xi9;xi10;xi1
258 1;xi12;xi13;xi14;xi15;xi16;xi17;xi18;xi19;
259 xi20;xi21;xi22;xi23;xi24;xi25;xi26],z);
260 %resolver
261
262 %Ajustar concentraciones de salida de
263 salida de H2S y NH3. Salen en equilibrio
264 de Henry.
265 Ntgas=x_modelo(length(z),22); %flujo
266 molar de gas final (mol/s)
267 H_h2s=1e-3;%Constante de Henry para
268 el H2S [mol/(m³ Pa)].
269 Nh2sliq_ode=x_modelo(length(z),5)*Fv;
270 %flujo molar en fase liq. de h2s que sale
271 de los calculos [mol/s]
272 Ch2sliq_real=Nh2sliq_ode/(Fv+(Ntgas/(
273 P_pa*H_h2s))); %flujo molar en fase liq.
274 de h2s ajustado [mol/s]
275 Nh2sliq_real=Ch2sliq_real*Fv; %flujo
276 molar real de h2s en el liq (mol/s)
277 Nh2sgas_real=Nh2sliq_ode-
278 Nh2sliq_real; %flujo molar en fase gas de
279 h2s ajustado [mol/s]
280 x_modelo(length(z),5)=Ch2sliq_real;
281 %reescribir concentracion en liq.
282 x_modelo(length(z),15)=Nh2sgas_real;
283 %reescribir fase gas.
284
285 H_nh3=5.9e-1;%Constante de Henry
286 para el NH3[mol/(m³ Pa)].
287 Nnh3liq_ode=x_modelo(length(z),8)*Fv;
288 %flujo molar en fase liq. de nh3 que sale
289 de los calculos [mol/s]
290 Cnh3liq_real=Nnh3liq_ode/(Fv+(Ntgas/(
291 P_pa*H_nh3))); %flujo molar en fase liq.
292 de nh3 ajustado [mol/s]
293 Nnh3liq_real=Cnh3liq_real*Fv; %flujo
294 molar real de nh3 en el liq (mol/s)
295 Nnh3gas_real=Nnh3liq_ode-
296 Nnh3liq_real; %flujo molar en fase gas de
297 nh3 ajustado [mol/s]
298 x_modelo(length(z),8)=Cnh3liq_real;
299 %reescribir concentracion en liq.
300 x_modelo(length(z),16)=Nnh3gas_real;
301 %reescribir fase gas.
302
303 %Arreglar Nt gas:
304 x_modelo(length(z),22)=x_modelo(lengt
305 h(z),15)+x_modelo(length(z),16)+x_mod
306 elo(length(z),17)+x_modelo(length(z),18

```

```

307 )+x_modelo(length(z),19)+x_modelo(len
308 gth(z),20)+x_modelo(length(z),21);
309 Ntgas=x_modelo(length(z),22); %flujo
310 molar de gas final (mol/s)
311
312 %Solucion concentracion en liquido
313 Cliq(:,1:13)=x_modelo(:,1:13);
314 %corregir los valores de concentracion
315 de glucosa, aminoacido y acido graso.
316 Cliq(:,2)=x_modelo(:,2)+x_modelo(:,23);
317 %concentracion de glucosa degradable +
318 no degradable.
319 Cliq(:,4)=x_modelo(:,4)+x_modelo(:,24);
320 %concentracion de aminoacido
321 degradable + no degradable.
322 Cliq(:,6)=x_modelo(:,6)+x_modelo(:,25);
323 %concentracion de acido graso
324 degradable + no degradable.
325 Cliq(:,14)=x_modelo(:,26); %inerte
326 organico del reciclo.
327
328 %Cliq(:,1) es la concentracion de celulosa
329 en el liquido, para cada z [mol/m3].
330 %Cliq(:,2) es la concentracion de glucosa
331 en el liquido, para cada z [mol/m3].
332 %Cliq(:,3) es la concentracion de
333 proteina en el liquido, para cada z
334 [mol/m3].
335 %Cliq(:,4) es la concentracion de amino
336 acidos en el liquido, para cada z
337 [mol/m3].
338 %Cliq(:,5) es la concentracion de H2S en
339 el liquido, para cada z [mol/m3].
340 %Cliq(:,6) es la concentracion de acidos
341 grasos en el liquido, para cada z
342 [mol/m3].
343 %Cliq(:,7) es la concentracion de MO en
344 el liquido, para cada z [mol/m3].
345 %Cliq(:,8) es la concentracion de NH3 en
346 el liquido, para cada z [mol/m3].
347 %Cliq(:,9) es la concentracion de CH4 en
348 el liquido, para cada z [mol/m3].
349 %Cliq(:,10) es la concentracion de CO2
350 en el liquido, para cada z [mol/m3].
351 %Cliq(:,11) es la concentracion de H2O
352 en el liquido, para cada z [mol/m3].
353 %Cliq(:,12) es la concentracion de Cl total
354 en el liquido, para cada z [mol/m3].
355
356 %Cliq(:,13) es la concentracion de F total
357 en el liquido, para cada z [mol/m3].
358 %Cliq(:,14) es la concentracion de inerte
359 organico del reciclo, para cada z
360 [mol/m3].
361
362 %Solucion T liquido
363 Tliq=x_modelo(:,14); %es la temperatura
364 del líquido para cada z en [K].
365
366 %Solucion T gas
367 Tgas=zeros(length(z),1);
368 for j=1:length(z)
369     Tpromedio=0;
370     puntos_recorridos=0;
371     for i=1:j
372         puntos_recorridos=puntos_recorridos+1
373         ;
374
375         Tpromedio=(Tpromedio*(puntos_recorr
376 idos-1)+Tliq(i))/puntos_recorridos;
377         end
378         Tgas(j)=Tpromedio; %es la
379 temperatura de todo el gas para
380 diferentes largos totales de reactor. La
381 temperatura es homogénea dentro del
382 reactor. Si el largo del reactor es z3,
383 entonces la temperatura del gas es
384 Tgas(length(z3)). En [K].
385     end
386
387 %Solucion concentraciones en gas
388 Fv_g=x_modelo(:,22).*Tgas(:)*R_m3/P_
389 pa; %Flujo volumetrico de gas generado
390 para diferentes largos totales del reactor
391 en [m3 gas/s]. Misma logica que para
392 Tgas.
393 Cgas=x_modelo(:,15:21)./Fv_g(:);
394 %Concentración a partir de los moles
395 generados por unidad de tiempo y flujo
396 de gas generado por unidad de tiempo.
397 %Cgas(:,1) es la concentracion de H2S en
398 todo el gas, para diferentes largos del
399 reactor [mol/m3 gas]. Misma logica que
400 para Tgas.
401 %Cgas(:,2) es la concentracion de NH3 en
402 el gas, para diferentes largos del reactor

```

```

403 [mol/m3 gas]. Misma logica que para
404 Tgas.
405 %Cgas(:,3) es la concentracion de CH4 en
406 el gas, para diferentes largos del reactor
407 [mol/m3 gas]. Misma logica que para
408 Tgas.
409 %Cgas(:,4) es la concentracion de CO2 en
410 el gas, para diferentes largos del reactor
411 [mol/m3 gas]. Misma logica que para
412 Tgas.
413 %Cgas(:,5) es la concentracion de H2O en
414 el gas, para diferentes largos del reactor
415 [mol/m3 gas]. Misma logica que para
416 Tgas.
417 %Cgas(:,6) es la concentracion de Cl total
418 en el gas, para diferentes largos del
419 reactor [mol/m3 gas]. Misma logica que
420 para Tgas.
421 %Cgas(:,7) es la concentracion de F total
422 en el gas, para diferentes largos del
423 reactor [mol/m3 gas]. Misma logica que
424 para Tgas.
425
426 %Solucion humedad
427 PMLiq=[32.4 0.180 17.9 0.367 0.034
428 0.256 0.113 0.017 0.016 0.044 0.018
429 35.453 19 PM_salida]; %Pesos
430 moleculares de las moleculas
431 liquidas[kg/mol].
432 PMLiq_hum(1:11)=PMLiq(1:11);
433 PMLiq_hum(12)=PMLiq(14);
434 Cliq_hum(:,1:11)=Cliq(:,1:11);
435 Cliq_hum(:,12)=Cliq(:,14);
436 Mliq_hum=Cliq_hum.*PMLiq_hum.*Fv;
437 %Flujo masico de las moleculas en cada z
438 [kg/s].
439 SMLiq_hum=sum(Mliq_hum,2); %Suma
440 de los flujos masicos de todas las
441 moleculas en cada z [kg/s].
442 Humedad=Mliq_hum(:,11)./SMLiq_hum;
443 %Fraccion de agua total en cada z [].
444 %Cliq(:,1) es la concentracion de celulosa
445 en el liquido, para cada z [mol/m3].
446 %Cliq(:,2) es la concentracion de glucosa
447 en el liquido, para cada z [mol/m3].
448 %Cliq(:,3) es la concentracion de
449 proteina en el liquido, para cada z
450 [mol/m3].
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
%Cliq(:,4) es la concentracion de amino
acidos en el liquido, para cada z
[mol/m3].
%Cliq(:,5) es la concentracion de H2S en
el liquido, para cada z [mol/m3].
%Cliq(:,6) es la concentracion de acidos
grasos en el liquido, para cada z
[mol/m3].
%Cliq(:,7) es la concentracion de MO en
el liquido, para cada z [mol/m3].
%Cliq(:,8) es la concentracion de NH3 en
el liquido, para cada z [mol/m3].
%Cliq(:,9) es la concentracion de CH4 en
el liquido, para cada z [mol/m3].
%Cliq(:,10) es la concentracion de CO2
en el liquido, para cada z [mol/m3].
%Cliq(:,11) es la concentracion de H2O
en el liquido, para cada z [mol/m3].
%Cliq(:,12) es la concentracion de Cl total
en el liquido, para cada z [mol/m3].
%Cliq(:,13) es la concentracion de F total
en el liquido, para cada z [mol/m3].
%Cliq(:,14) es la concentracion de inerte
organico del reciclo, para cada z
[mol/m3].

%Proporcion C:N
C_especie=[200*6 6 13*50 13 16 0];
%numero de moles de C por mol de
especie.
N_especie=[0 0 50*3 3 0 1]; %numero de
moles de N por mol de especie.
Nliq(:,1:4)=x_modelo(:,1:4)*Fv; %Flujo
molar de las moleculas degradables en
cada z [mol/s]. Celulosa, Glucosa,
Proteina, Aminoacido
Nliq(:,5)=x_modelo(:,6)*Fv; %Flujo
molar de las moleculas degradables en
cada z [mol/s]. AcGraso
Nliq(:,6)=x_modelo(:,8)*Fv; %Flujo
molar de las moleculas degradables en
cada z [mol/s]. NH3
NC=sum(Nliq.*C_especie,2); %flujo
molar de C para cada largo de reactor
[mol/s]
NN=sum(Nliq.*N_especie,2); %flujo
molar de N para cada largo de reactor
[mol/s]

```

```

499 CN=(NC*12)/(NN*14); %proporcion C:N
500 para cada posicion del reactor
501
502 %Calculo de composicion de salida sin
503 agua
504 %Concentraciones totales en el liquido.
505 Cliq_sinagua(:,1:10)=Cliq(:,1:10);
506 Cliq_sinagua(:,11:13)=Cliq(:,12:14);
507 PMliq_sinagua=[32.4 0.180 17.9 0.367
508 0.034 0.256 0.113 0.017 0.016 0.044
509 35.453 19 PM_salida]; %Pesos
510 moleculares de las molculas
511 liquidas[kg/mol].
512 Nliq_sinagua=Cliq_sinagua.*PMliq_sina
513 gua.*Fv;
514 %Composiciones molares.
515 C_especie_sinagua=[200*6 6 13*50 13
516 16 2 5 0 0 1 0 0 C_salida]; %numero de
517 moles de C por mol de especie.
518 N_especie_sinagua=[0 0 50*3 3 0 0 1 1 0
519 0 0 0 N_salida]; %numero de moles de N
520 por mol de especie.
521 H_especie_sinagua=[200*10 12 50*32
522 25 32 6 7 3 0 0 0 0 H_salida]; %numero
523 de moles de H por mol de especie.
524 O_especie_sinagua=[200*5 6 50*6 7 2 0
525 2 0 2 2 0 0 O_salida]; %numero de moles
526 de O por mol de especie.
527 NC=sum(Nliq_sinagua.*C_especie_sina
528 ua,2); %flujo molar de C para cada largo
529 de reactor [mol/s]
530 NN=sum(Nliq_sinagua.*N_especie_sina
531 gua,2); %flujo molar de N para cada largo
532 de reactor [mol/s]
533 NH=sum(Nliq_sinagua.*H_especie_sina
534 gua,2); %flujo molar de N para cada largo
535 de reactor [mol/s]
536 NO=sum(Nliq_sinagua.*O_especie_sina
537 gua,2); %flujo molar de N para cada largo
538 de reactor [mol/s]
539 Hh2o_final=Humedad(length(z)); %H2O
540
541 %Proporcion de materia org. de salida.
542 C_salida=NC(length(t))/NN(length(t));
543 H_salida=NH(length(t))/NN(length(t));
544 O_salida=NO(length(t))/NN(length(t));
545 N_salida=1;
546 PM_salida=(C_salida*12+H_salida*1+O_
547 salida*16+N_salida*14)/1000; %kg/mol
548
549 %Agua extra requerida
550 Eh2o=max(0,-(Humedad-
551 0.55).*SMliq_hum); %kg/s
552 j=0;
553 for i=2:length(Eh2o);
554 if (Eh2o(i-1)<=0 &&
555 Eh2o(i)>=0) || (Eh2o(i-1)>=0 &&
556 Eh2o(i)<=0);
557 j=j+1;
558 Rh2o(j,1)=i;
559 end
560 end
561
562 %H2S salida gas
563 Fv_g_final=Fv_g(length(z));
564 Nh2s_salida=x_modelo(length(z),15);
565 %flujo de h2s en la salida [mol/s]
566 Ngas_salida=x_modelo(length(z),22);
567 %flujo molar de salida gaseosa [mol/s]
568 yh2s_gas=Nh2s_salida/Ngas_salida;
569 %fraccion molar de h2s en la salida
570 gaseosa []
571 P_h2s=P_atm*(yh2s_gas);%Presion
572 parcial de h2s en la salida gaseosa [atm]
573 %H2S salida liq
574 Nh2s_liq=x_modelo(length(z),5)*Fv;
575 %flujo molar de h2s en la salida del
576 reactor [mol/s]
577 Nt_liq=sum(Cliq.*Fv,2); %Flujo Molar
578 total en fase liquida en todo el reactor
579 [mol/s]
580 Nt_liq_salida=Nt_liq(length(z)); %flujo
581 molar total en la salida liquida [mol/s]
582 yh2s_liq=Nh2s_liq/Nt_liq_salida;%Fracci
583 on molar de h2s en la salida liquida.
584
585 %NH3 salida gas
586 Nnh3_salida=x_modelo(length(z),16);
587 %flujo de nh3 en la salida [mol/s]
588 ynh3_gas=Nnh3_salida/Ngas_salida;
589 %fraccion molar de nh3 en la salida
590 gaseosa []
591 P_nh3=P_atm*(ynh3_gas);%Presion
592 parcial de h2s en la salida gaseosa [atm]
593 %NH3 salida liq
594 Nnh3_liq=x_modelo(length(z),8)*Fv;
595 %flujo molar de h2s en la salida del
596 reactor [mol/s]

```



```

597     ynh3_liq=Nnh3_liq/Nt_liq_salida;%Fracc
598     ion molar de h2s en la salida liquida.
599

```

1.3 BIOGAS_RECICLO_DCDZ.M

```

1     function
2     derivada=biogas_reciclo_dCdz(x,z);
3     global k1 k2 k3 k4 k5 R alfa_grad alfa_rad
4     L H S P_atm P_pa R_l R_m3 rho_s Fm_s
5     Fv_s ntm_s nt_s rho_i Fm_i Fv_i ntm_i
6     nt_i Fm Fv nt lambda_h2s lambda_nh3
7     lambda_ch4 lambda_co2 lambda_h2o
8     lambda_cl lambda_f gx h_liq cp
9     Ccrit_h2s Ccrit_nh3 Ccrit_ch4 Ccrit_co2
10    Ccrit_h2o Ccrit_cl Ccrit_f z_columna xi1
11    xi2 xi3 xi4 xi5 xi6 xi7 xi8 xi9 xi10 xi11 xi12
12    xi13 xi14 xi15 xi16 xi17 xi18 xi19 xi20 xi21
13    xi22 xi23 xi24 xi25 z x_max x_export
14    Cinter_cl Cinter_f Dcl Df rp a;
15
16    %%Variables
17    Ccelulosa=x(1); %x(1) es la concentracion
18    de celulosa [mol/m3].
19    Cglucosa=x(2); %x(2) es la concentracion
20    de glucosa [mol/m3].
21    Cproteina=x(3); %x(3) es la
22    concentracion de proteina [mol/m3].
23    Caa=x(4); %x(4) es la concentracion de
24    amino acidos [mol/m3].
25    Ch2s=x(5); %x(5) es la concentracion de
26    H2S [mol/m3].
27    Cacgraso=x(6); %x(6) es la concentracion
28    de acidos grasos [mol/m3].
29    X=x(7); %x(7) es la concentracion de
30    biomasa [mol/m3].
31    Cnh3=x(8); %x(8) es la concentracion de
32    NH3 [mol/m3].
33    Cch4=x(9); %x(9) es la concentracion de
34    CH4 [mol/m3].
35    Cco2=x(10); %x(10) es la concentracion
36    de CO2 [mol/m3].
37    Ch2o=x(11); %x(11) es la concentracion
38    de H2O [mol/m3].
39    Ccl=x(12); %x(12) es la concentracion de
40    Cl total [mol/m3].
41    Cf=x(13); %x(13) es la concentracion de
42    Fluor total [mol/m3].
43    T=x(14); %x(14) es la temperatura [K].
44
45    Nh2s=x(15); %x(15) son los moles de H2S
46    que se evaporan [mol/s].
47    Nnh3=x(16); %x(16) son los moles de
48    NH3 que se evaporan [mol/s].
49    Nch4=x(17); %x(17) son los moles de CH4
50    que se evaporan [mol/s].
51    Nco2=x(18); %x(18) son los moles de CO2
52    que se evaporan [mol/s].
53    Nh2o=x(19); %x(19) son los moles de
54    H2O que se evaporan [mol/s].
55    Ncl=x(20); %x(20) son los moles de Cl
56    total que se evaporan [mol/s].
57    Nf=x(21); %x(21) son los moles de F total
58    que se evaporan [mol/s].
59    NT=x(22); %x(22) son los moles totales
60    (todas las especies) que se evaporan
61    [mol/s].
62    CglucosaN=x(23);%x(23) es la
63    concentracion de glucosa no degradable
64    [mol/m3].
65    CaaN=x(24);%x(24) es la concentracion
66    de aa no degradable [mol/m3].
67    CacgrasoN=x(25);%x(25) es la
68    concentracion de acgraso no degradable
69    [mol/m3].
70    ClnerteOrg=x(26); %x(26) es la
71    concentracion de inerte organico
72    reciclado [mol/m3].
73
74    %%Temperatura en la interfase
75    Tinter=T;%en el biogas sera la misma que
76    la temperatura del liquido. En el
77    compost, sera la T ambiente. [K]
78
79    %%Velocidades de reacciones
80    r1=k1*Ccelulosa;%[mol/(m3.s)]
81    r2=k2*(Cglucosa);%[mol/(m3.s)]
82    r3=k3*Cproteina;%[mol/(m3.s)]
83    r4=k4*(Caa);%[mol/(m3.s)]
84    r5=k5*(Cacgraso);%[mol/(m3.s)]
85
86    %%Flujos de salida desde el liquido hacia
87    el gas. PONER POSITIVOS, por favor, para

```

87	hacer compatibles con BE y entre los BM	136	$dC_{nh3} = (-f_{nh3}/F_v) + (3 \cdot r_4) \cdot S/F_v$;
88	de Biogas y Compost.	137	%Ec para CH4
89	$f_{h2s} = 0; \% (C_{h2s} > C_{crit_h2s}) \cdot (r_2) \cdot S$; % es	138	$dC_{ch4} = (-$
90	el flux*L de H2S que sale del liq. al gas	139	$f_{ch4}/F_v) + (3 \cdot r_2 + 6.5 \cdot r_4 + 11.5 \cdot r_5) \cdot S/F_v$;
91	[mol/(m·s)].	140	%Ec para CO2
92	$f_{nh3} = 0; \% (C_{nh3} > C_{crit_nh3}) \cdot (3 \cdot r_4) \cdot S$; %	141	$dC_{co2} = (-$
93	es el flux*L de NH3 que sale del liq. al gas	142	$f_{co2}/F_v) + (3 \cdot r_2 + 6.5 \cdot r_4 + 4.5 \cdot r_5) \cdot S/F_v$;
94	[mol/(m·s)].	143	%Ec para H2O
95	$f_{ch4} = (C_{ch4} > C_{crit_ch4}) \cdot (3 \cdot r_2 + 6.5 \cdot r_4 + 11$	144	$dC_{h2o} = (-f_{h2o}/F_v) + (-200 \cdot r_1 - 50 \cdot r_3 - 6 \cdot r_4 -$
96	$.5 \cdot r_5) \cdot S$; % es el flux*L de CH4 que sale	145	$7 \cdot r_5) \cdot S/F_v$;
97	del liq. al gas [mol/(m·s)].	146	%Ec para Cl total
98	$f_{co2} = (C_{co2} > C_{crit_co2}) \cdot (3 \cdot r_2 + 6.5 \cdot r_4 + 4.$	147	$dC_{cl} = -f_{cl}/F_v$;
99	$5 \cdot r_5) \cdot S$; % es el flux*L de CO2 que sale	148	%Ec para F total
100	del liq. al gas [mol/(m·s)].	149	$dC_f = -ff/F_v$;
101	$f_{cl} = 0$; % es el flux*L de Cl que sale del liq.	150	%Ec para T
102	al gas [mol/(m·s)].	151	$\%dT = (1/(c_p \cdot nt)) \cdot (g_x \cdot X \cdot S -$
103	$ff = 0; \% -D_f \cdot (C_{inter_f} - C_f) \cdot a \cdot S/r_p$; % es el	152	$(f_{h2s} \cdot \lambda_{h2s} + f_{nh3} \cdot \lambda_{nh3} + f_{ch4} \cdot \lambda_{ch4} + f_{co2} \cdot \lambda_{co2} + f_{h2o} \cdot \lambda_{h2o} + f_{cl} \cdot \lambda_{cl} + ff \cdot \lambda_{da_f}) \cdot L \cdot h_{liq} \cdot (T - T_{inter}))$;
104	flux*L de F que sale del liq. al gas	153	$dT = 0$;
105	[mol/(m·s)].	154	%Fase gas: listaremos aqui los valores de
106	$f_{h2o} = 0.0728 \cdot (f_{h2s} + f_{nh3} + f_{ch4} + f_{co2} + f_{cl}$	155	las derivadas dNi/dz. Seran anotadas
107	$+ ff)$; % es el flux*L de H2O que sale del	156	como dNi, simplemente.
108	liq. al gas [mol/(m·s)].	157	%Ec para H2S
109		158	$dN_{h2s} = f_{h2s}$;
110	%Ecuacion diferencial:	159	%Ec. para NH3
111		160	$dN_{nh3} = f_{nh3}$;
112	% Fase sol-liq: listaremos aqui los valores	161	%Ec. para CH4
113	de las derivadas de dCi/dz. Seran notadas	162	$dN_{ch4} = f_{ch4}$;
114	como dCi, simplemente.	163	%Ec. para CO2
115	%Ec para celulosa	164	$dN_{co2} = f_{co2}$;
116	$dC_{celulosa} = -(r_1) \cdot S/F_v$;	165	%Ec. para H2O
117	%Ec para glucosa	166	$dN_{h2o} = f_{h2o}$;
118	$dC_{glucosa} = (200 \cdot 0.68 \cdot r_1 - r_2) \cdot S/F_v$;	167	%Ec. para Cl total
119	%Ec para glucosa no degradable	168	$dN_{cl} = f_{cl}$;
120	$dC_{glucosaN} = (200 \cdot (1 - 0.68) \cdot r_1) \cdot S/F_v$;	169	%Ec. para F total
121	%Ec para Proteinas	170	$dN_f = ff$;
122	$dC_{proteina} = -(r_3) \cdot S/F_v$;	171	%Ec. para todas las especies
123	%Ec para amino acidos	172	$dNT = dN_{h2s} + dN_{nh3} + dN_{ch4} + dN_{co2} + dN_{h2o} + dN_{cl} + dN_f$;
124	$dC_{aa} = (50 \cdot 0.8 \cdot r_3 - r_4) \cdot S/F_v$;	173	%Ec. para el inerte organico que entra
125	%Ec para aa no degradables	174	con el ciclo
126	$dC_{aaN} = 50 \cdot 0.2 \cdot r_3 \cdot S/F_v$;	175	$dI_{inerteOrg} = 0$;
127	%Ec para H2S	176	
128	$dC_{h2s} = (-f_{h2s}/F_v) + (r_4) \cdot S/F_v$;	177	%%Respuesta
129	%Ec para acidos grasos	178	derivada(1)=dCcelulosa;
130	$dC_{cgraso} = -(r_5) \cdot S/F_v$;	179	derivada(2)=dCglucosa;
131	%Ec para acgrasos no degradables	180	derivada(3)=dCproteina;
132	$dC_{cgrasoN} = 0$;	181	
133	%Ec para Microorganismos	182	
134	$dX = 0$;	183	
135	%Ec para NH3	184	

185	derivada(4)=dCaa;	197	derivada(16)=dNnh3;
186	derivada(5)=dCh2s;	198	derivada(17)=dNch4;
187	derivada(6)=dCacgraso;	199	derivada(18)=dNco2;
188	derivada(7)=dX;	200	derivada(19)=dNh2o;
189	derivada(8)=dCnh3;	201	derivada(20)=dNcl;
190	derivada(9)=dCch4;	202	derivada(21)=dNf;
191	derivada(10)=dCco2;	203	derivada(22)=dNT;
192	derivada(11)=dCh2o;	204	derivada(23)=dCglucosaN;
193	derivada(12)=dCcl;	205	derivada(24)=dCaaN;
194	derivada(13)=dCf;	206	derivada(25)=dCacgrasoN;
195	derivada(14)=dT;	207	derivada(26)=dInerteOrg;
196	derivada(15)=dNh2s;	208	end

Anexo J CÓDIGO AJUSTE DE PARÁMETROS

J.1 BIOGAS_MAIN_EXP.M

1	%%%Este archivo permite calcular	31	1398;0.1415252437;0.1625439611;0.20180
2	parametros (p) a partir de datos	32	8011;0.2354544811;0.2760757193;0.30827
3	experimentales.	33	0588;0.3292066939;0.3556659664;0.37365
4	clear all;	34	16629;0.3874241745;0.3970307079;0.4051
5	close all;	35	738381;0.4197016546;0.4221799986;0.423
6	clc;	36	3483608;0.4270658767;0.4309250124;0.43
7	pkg load struct;	37	328534;0.4356456676;0.4382656313;0.444
8	pkg load optim;	38	3397568;0.451077295;0.456363033;0.4575
9		39	303989;0.4585555477;0.4583540733;0.459
10	global p_past x_export CN z z_columna x Fv;	40	3555192;0.4605110337;0.461607291;0.464
11	%%%PUNTOS EXPERIMENTALES	41	08424;0.4652516059;0.4663241603;0.4674
12	%Tiempo (d)	42	322691;0.4685285264;0.469660338;0.4707
13	texp=[0;0.1292279368;0.1731890386;0.238	43	21041;0.4719239612];
14	3340808;0.3034791229;0.4115231194;0.58	44	%Estos valores seran para comparar los
15	50662072;0.6717492388;0.7817405056;0.8	45	obtenidos con el modelo. Necesitamos
16	910236741;1.085219628;1.278353435;1.51	46	construir una formula para obtener zexp a
17	2084877;1.914579744;2.400040126;2.8849	47	partir del tiempo en un experimento batch.
18	69434;3.285340005;3.790568131;5.431054	48	En el caso de Cexp, quizas deberiamos
19	83;6.019602521;6.439917861;7.322739396	49	comparar el flujo de metano obtenido en la
20	;7.953477943;8.752094791;9.550711639;9.	50	fase gaseosa. En el liquido llegara a una
21	88717634;15.75055109;20.82237076;26.73	51	concentracion limite y no crecera mas,
22	623456;30.95712152;37.70947403;41.2957	52	transfiriendo a la fase gaseosa lo demas.
23	1689;48.46998033;52.90182275;58.388442	53	%Sobre el comentario anterior, hemos
24	49;64.29875086;68.51963782;74.42816848	54	optado por hacer el ajuste en un pfr, asi que
25	;79.70383275;85.19045249;90.04420584;9	55	convertiremos internamente las unidades
26	6.16369196;99.75171253];	56	en el archivo param. Pasaremos
27	%Produccion especifica de metano (l / g VS	57	directamente texp y PEMexp a la maquina
28	agregado)	58	de optimizacion. Luego, convertiremos el
29	PEMexp=[0;0.02520829891;0.04063303987	59	tiempo del experimento batch a un z.
30	;0.05745037411;0.07426770836;0.0980834	60	

```

61      %Apuesta inicial
62      pin=[6.8506e-005; -5.1288e-001; 4.9879e-
63      001; -5.0000e-001];
64      %pin=p_past;
65
66      %Parametros para la rutina de optimizacion.
67      tolerance=1e-3;
68      maxiterations=10000;
69      wt=ones(size(PEMexp));
70      %dp=1e-3*(ones(size(pin)));
71      dp=1e-3*(ones(size(pin)));
72      dp(1)=1e-3;%k1
73      dp(2)=1e-3;%k2
74      %dp(3)=1e-3;%k3
75      %dp(4)=1e-3;%beta4
76      %dp(5)=1e-3;%beta5
77
78      limites=[pin*0.5,pin*1.5];
79      limites(2,1)=-0.6;
80      limites(2,2)=0.6;
81      limites(4,1)=-0.5;
82      limites(4,2)=0.5;
83      limites(3,1)=-0.5;
84      limites(3,2)=0.5;
85      options.bounds=limites;
86      %leasqr (x, y, pin, F, stol, niter, wt, dp, dfdp,
87      options)
88      [f,p]=leasqr(texp,PEMexp,pin,'biogas_mode
89      loexp',tolerance,maxiterations,wt,dp,"dfdp
90      ",options);
91
92      %Comparacion de soluciones:
93      PEMmodelo=f;
94      figure(1);
95      plot(texp,PEMexp,'x',texp,PEMmodelo,'o');
96      legend('Experimental','Modelo');
97      xlabel('Tiempo (d)');
98      ylabel('Produccion de metano (l / g VS
99      agregado)');
100     title('Ajuste de parametros');
101
102     %figure(2);
103     %plot(texp,x_export(:,1));
104     %legend('Celulosa');
105     %xlabel('Tiempo (d)');
106     %ylabel('(mol/m^3)');
107     %figure(3);
108     %plot(texp,x_export(:,3));
109     %legend('Proteina');
110     %xlabel('Tiempo (d)');
111     %ylabel('(mol/m^3)');
112     %figure(4);
113     %plot(texp,x_export(:,6));
114     %legend('Ac.graso');
115     %xlabel('Tiempo (d)');
116     %ylabel('(mol/m^3)');
117     %
118     %figure(5);
119     %plot(texp,x_export(:,7));
120     %legend('MO');
121     %xlabel('Tiempo (d)');
122     %ylabel('(mol/m^3)');
123     %figure(6);
124     %plot(texp,x_export(:,9));
125     %legend('CH4_liq');
126     %xlabel('Tiempo (d)');
127     %ylabel('(mol/m^3)');
128     %figure(7);
129     %plot(texp,x_export(:,17));
130     %legend('NCH4');
131     %xlabel('Tiempo (d)');
132     %ylabel('(mol/s)');
133     %figure(8);
134     %plot(texp,x_export(:,14));
135     %legend('T');
136     %xlabel('Tiempo (d)');
137     %ylabel('(K)');
138     %figure(9);
139     %plot(texp,x_export(:,2));
140     %legend('Glucosa');
141     %xlabel('Tiempo (d)');
142     %ylabel('(mol/m^3)');
143     %figure(10);
144     %plot(texp,x_export(:,4));
145     %legend('AA');
146     %xlabel('Tiempo (d)');
147     %ylabel('(mol/m^3)');
148
149     figure(27);
150     plot(z,CN);
151     legend('CN');
152     xlabel('Largo de reactor (m)');
153     ylabel('Proporcion C:N');
154
155     %mostrar parametros finales
156     %display(p);
157     %display((p-p_past)./p_past);
158     p_past=p;

```

J.2 BIOGAS_MODELOEXP.M

```

1      function                                48      P_atm=1; %presion del gas en atm [atm]
2      PEMmodelo=biogas_modeloexp(t,p);        49      EDITABLE
3      global x Fv z_columna CN z D Cinter k1    50      P_pa=P_atm*101325; %presion del gas
4      k2 k3 k4 k5 R alfa_grad alfa_rad L H S    51      en Pa [Pa]
5      P_atm P_pa R_l R_m3 rho_s Fm_s Fv_s      52      R_l=0.08205746; %constante gases
6      ntm_s nt_s rho_i Fm_i Fv_i ntm_i nt_i Fm  53      ideales en litros [l·atm/(mol·K)]
7      Fv nt lambda_h2s lambda_nh3            54      R_m3=8.315684; %constante gases
8      lambda_ch4 lambda_co2 lambda_h2o        55      ideales en m³ [m³·Pa/(mol·K)]
9      lambda_cl lambda_f gx h_liq cp          56
10     Ccrit_h2s Ccrit_nh3 Ccrit_ch4 Ccrit_co2  57      %Constantes alimentacion: Sustrato
11     Ccrit_h2o Ccrit_cl Ccrit_f z_columna xi1  58      rho_s=590; %densidad aparente [kg
12     xi2 xi3 xi4 xi5 xi6 xi7 xi8 xi9 xi10 xi11  59      sustrato/m³ sustrato].
13     xi13 xi14 xi15 xi16 xi17 xi18 xi19 xi20 xi21  60      Fm_s=0.039; % flujo masico [kg
14     xi22 xi23 xi24 xi25 z x_max x_export    61      sustrato/s]. EDITABLE
15     Cinter_cl Cinter_f Dcl Df rp a;          62      Fv_s=Fm_s/rho_s;%; flujo volumetrico
16                                              63      [m³ sustrato/s].
17     %%PROPORCION CINETICA                    64      ntm_s=43.235;%numero de moles por
18     aa_gluc=0.722;                            65      unidad de masa que entra al reactor [mol
19     acgraso_gluc=0.444;                       66      sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
20                                              67      nt_s=ntm_s*Fm_s;%numero total de
21     %%CONSTANTES                             68      moles que entran por unidad de tiempo
22     %Constantes por ajustar: Primero se        69      al reactor(fase sol-liq). Se asumira
23     exportan los parametros, para que esten    70      constante para el balance de energia
24     disponibles como variables globales para  71      [mol sustrato/s].
25     la funcion derivada. La rutina de         72      rp=2e-3; %radio de partícula [m].
26     optimizacion no permite que las           73      a_kg=18000; %area BET de los residuos
27     variables de optimizacion p(i) sean       74      [m²/kg]
28     variables globales.                       75      a=a_kg*rho_s; %area especifica de los
29     k1=p(1);                                   76      residuos [m²/m³ residuos]
30     k2=0.5*p(1)*(1+p(2));                     77
31     k3=aa_gluc*k1*(1+p(3));                   78      %Constantes alimentacion: Inoculo
32     k4=aa_gluc*k2*(1+p(3));                   79      rho_i=1000; %densidad (sup:agua)[kg
33     k5=acgraso_gluc*k2*(1+p(4));              80      inoculo/m³ inoculo].
34                                              81      Fm_i=36*Fm_s; %36 es un factor de
35     %Constantes fisicas del reactor            82      conversion en [kg inoculo/kg inoculo].
36     R=0.1; % radio del lecho [m] EDITABLE      83      Fm es flujo masico [kg inoculo/s].
37     alfa_grad=90; %grado de apertura del      84      EDITABLE
38     lecho [grados] EDITABLE                   85      Fv_i=Fm_i/rho_i; %flujo volumetrico [m³
39     alfa_rad= alfa_grad*pi/360; %grado de     86      inoculo /s].
40     apertura de lecho [radianes]             87      ntm_i=54.158; %numero de moles por
41     L=2*sin(alfa_rad/2)*R; %ancho del lecho   88      unidad de masa que entra al reactor [mol
42     [m].                                       89      inoculo/kg inoculo]. EDITABLE
43     H=R*(1+cos(alfa_rad/2)); %altura del     90      nt_i=ntm_i*Fm_i;%numero total de
44     lecho [m].                                 91      moles que entran por unidad de tiempo
45     S=(2*pi-                                   92      al reactor(fase sol-liq). Se asumira
46     alfa_rad)*R^2/2+L*cos(alfa_rad/2)*R;    93      constante para el balance de energia
47     %area transversal del lecho [m²].         94      [mol inoculo/s].

```

95		143	Ccrit_h2o=55555.56; %Concentracion
96	%Constantes alimentacion	144	limite de H2S en el liquido [mol/m ³]
97	Fm=Fm_s+Fm_i; %flujo masico total que	145	Ccrit_cl=259.50; %Concentracion limite
98	entra al reactor [kg/s].	146	de H2S en el liquido [mol/m ³]
99	Fv=Fv_s+Fv_i; %flujo volumetrico total	147	Ccrit_f=484.25; %Concentracion limite
100	que entra al reactor [m ³ /s].	148	de H2S en el liquido [mol/m ³]
101	nt=nt_s+nt_i; %numero total de moles	149	
102	que entran al reactor [mol/s].	150	%Otros
103		151	Cinter_cl=0; %[mol/m3]
104	%Constantes alimentacion: Energia	152	Cinter_f=0; %[mol/m3]
105	lambda_h2s=18600;%calor latente de	153	Dcl=2.23e-9;%Difusividad del cl [m ² /s]
106	cambio de fase del H2S [J/mol].	154	Df=2.23e-9;%Difusividad del f [m ² /s]
107	lambda_nh3=30500;%- calor de	155	
108	disolucion del NH3 [J/mol].	156	%%RESOLUCION
109	lambda_ch4=8600;%calor latente de	157	z_columna=(t*(24*60*60))*Fv/S;%[m];
110	cambio de fase del CH4 [J/mol].	158	%cambio de variables tiempo a distancia
111	lambda_co2=19400;%- calor de	159	de reactor (largo). z_columna es un
112	disolucion del CO2 [J/mol].	160	vector columna en [m].
113	lambda_h2o=40626;%calor latente de	161	
114	cambio de fase del H2O [J/mol].	162	%CB para el primer z. Evaluaremos cada
115	lambda_cl=10388;%calor latente de	163	x(i). %VER EXCEL,EXPERIMENTOS
116	cambio de fase del Cl [J/mol].	164	(alimentacion).
117	lambda_f=5567;%calor latente de	165	xi1=(2.337*Fv_s)/Fv; %valor inicial de la
118	cambio de fase del F [J/mol].	166	concentracion de celulosa [mol/m ³].
119	gx=757.1;%generacion de calor	167	xi2=0; %valor inicial de la concentracion
120	especifica de los MO [J/(mol·s)].	168	de glucosa [mol/m ³].
121	h_liq=4.54;%coef. global de	169	xi3=(1.781*Fv_s)/Fv; %valor inicial de la
122	transferencia de calor en el liquido	170	concentracion de proteina [mol/m ³].
123	[W/(m ² ·K)]	171	xi4=0; %valor inicial de la concentracion
124	cp=75.348;%Calor especifico del agua	172	de amino acidos [mol/m ³].
125	[J/mol·K]	173	xi5=0; %valor inicial de la concentracion
126		174	de H2S [mol/m ³].
127	%Constantes evaporacion:	175	xi6=(80.027*Fv_s)/Fv; %valor inicial de la
128	Concentraciones limite de diferentes	176	concentracion de acidos grasos
129	componentes en la fase liquida. Sobre	177	[mol/m ³]. Se asume que podran ser
130	este valor (semejante a la solubilidad)	178	degradados solo el 50%
131	cada molecula saldra a la fase gas en la	179	xi7=(213.419*Fv_i)/Fv; %valor inicial de
132	misma tasa en que se genere. Usaremos	180	la concentracion de los MO [mol/m ³].
133	datos de solubilidad a 40°C	181	xi8=0; %valor inicial de la concentracion
134	Ccrit_h2s=70.59; %Concentracion limite	182	de NH3 [mol/m ³].
135	de H2S en el liquido [mol/m ³]	183	xi9=0; %valor inicial de la concentracion
136	Ccrit_nh3=18823.53; %Concentracion	184	de CH4 [mol/m ³].
137	limite de NH3 en el liquido [mol/m ³]	185	xi10=0; %valor inicial de la concentracion
138	%Ccrit_ch4=1.00; %Concentracion limite	186	de CO2 [mol/m ³].
139	de CH4 en el liquido [mol/m ³]	187	xi11=(24996.333*Fv_s+53455.556*Fv_i)
140	Ccrit_ch4=0;	188	/Fv; %valor inicial de la concentracion de
141	Ccrit_co2=22.73; %Concentracion limite	189	H2O [mol/m ³].
142	de H2S en el liquido [mol/m ³]	190	xi12=(18.625*Fv_s)/Fv; %valor inicial de
		191	la concentracion de Cl total [mol/m ³].

```

192 xi13=0; %valor inicial de la concentracion
193 de F total [mol/m³].
194 xi14=36+273.15; %valor inicial de la
195 temperatura [K].
196 xi15=0; %valor inicial del flujo molar de
197 H2S en fase gas [mol/s].
198 xi16=0; %valor inicial del flujo molar de
199 NH3 en fase gas [mol/s].
200 xi17=0; %valor inicial del flujo molar de
201 CH4 en fase gas [mol/s].
202 xi18=0; %valor inicial del flujo molar de
203 CO2 en fase gas [mol/s].
204 xi19=0; %valor inicial del flujo molar de
205 H2O en fase gas [mol/s].
206 xi20=0; %valor inicial del flujo molar de
207 Cl en fase gas [mol/s].
208 xi21=0; %valor inicial del flujo molar de F
209 en fase gas [mol/s].
210 xi22=0; %valor inicial del flujo molar total
211 en fase gas [mol/s].
212 xi23=0; %valor inicial de la concentracion
213 de glucosa no degradable [mol/m³].
214 xi24=0; %valor inicial de la concentracion
215 de aa no degradable [mol/m³].
216 xi25=0; %valor inicial de la concentracion
217 de acgraso no degradable [mol/m³].
218
219 %Solucion
220 lsode_options('absolute tolerance',1e-
221 2);
222 %lsode_options('integration
223 method','stiff');
224 %Matriz para espacio en z
225 z=z_columna;%en [m] un vector fila,
226 para ser compatible con lsode.
227 %valor de las concentraciones en z
228
229 x_max=[xi1;xi1;xi3;xi3;xi6;xi7;xi1;xi1;
230 xi1;xi11;xi12;xi12;xi14;1;1;1;1;1;1;1;
231 1;1]; %valores maximos permitidos
232 %lsode_options ("integration
233 method","stiff");
234 %lsode_options ("initial step size",1e1);
235
236 x=lsode("biogas_dCdz",[xi1;xi2;xi3;xi4;xi5
237 ;xi6;xi7;xi8;xi9;xi10;xi11;xi12;xi13;xi14;xi
238 15;xi16;xi17;xi18;xi19;xi20;xi21;xi22;xi2
239 3;xi24;xi25],z); %resolver
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253 %Produccion especifica de metano (l/g
254 VS agregado)
255 %Entiendo que x, despues de la
256 ejecucion de lsode, tendra guardados los
257 valores de las concentraciones
258 respectivas en cada columna. Cada valor
259 cambiara de fila en fila con z. Asi, el
260 vector x(:,1) tiene el valor de la
261 composicion de celulosa en todo el largo
262 del reactor.
263 %Usaremos gases ideales para
264 transformar el flujo molar de metano
265 (mol/s) en (l/s): V=nRT/P
266 %El vector T tiene la temperatura en la
267 fase liquida. La temperatura del gas sera
268 un promedio de todas las temperaturas
269 liquidas del largo que ha sido recorrido.
270 Tliq=x(:,14);
271 Tgas=zeros(length(z),1);
272 for j=1:length(z)
273 Tpromedio=0;
274 puntos_recorridos=0;
275 for i=1:j
276
277 puntos_recorridos=puntos_recorridos+1
278 ;
279
280 Tpromedio=(Tpromedio*(puntos_recorr
281 idos-1)+Tliq(i))/puntos_recorridos;
282 end
283 Tgas(j)=Tpromedio;
284 end
285 Fm_SV_entrada=0.217*Fm_s*1000;%
286 [g/s]
287 PEMmodelo=(x(:,17)*R_l.*Tgas/P_atm)/
288 Fm_SV_entrada; % [l/g SV agregado]

```

```

289     x_export=x; %Exportacion de valores de
290     conx_modeloexptemperatura, etc.
291
292     %Proporcion C:N
293     C_especie=[200*6 6 13*50 13 16 0];
294     %numero de moles de C por mol de
295     especie.
296     N_especie=[0 0 50*3 3 0 1]; %numero de
297     moles de N por mol de especie.
298     Nliq(:,1:4)=x(:,1:4)*Fv; %Flujo molar de
299     las moleculas degradables en cada z
300     [mol/s].
301     Nliq(:,5)=x(:,6)*Fv; %Flujo molar de las
302     moleculas degradables en cada z [mol/s].
303
304     Nliq(:,6)=x(:,8)*Fv; %Flujo molar de las
305     moleculas degradables en cada z [mol/s].
306     NC=sum(Nliq.*C_especie,2); %flujo
307     molar de C para cada largo de reactor
308     [mol/s]
309     NN=sum(Nliq.*N_especie,2); %flujo
310     molar de N para cada largo de reactor
311     [mol/s]
312     CN=(NC*12)./(NN*14); %proporcion C:N
313     para cada posicion del reactor
314
315     end

```

J.3 BIOGAS_DCDZ.M

```

1     function derivada=biogas_dCdz(x,z);
2     global k1 k2 k3 k4 k5 R alfa_grad alfa_rad
3     L H S P_atm P_pa R_l R_m3 rho_s Fm_s
4     Fv_s ntm_s nt_s rho_i Fm_i Fv_i ntm_i
5     nt_i Fm Fv nt lambda_h2s lambda_nh3
6     lambda_ch4 lambda_co2 lambda_h2o
7     lambda_cl lambda_f gx h_liq cp
8     Ccrit_h2s Ccrit_nh3 Ccrit_ch4 Ccrit_co2
9     Ccrit_h2o Ccrit_cl Ccrit_f z_columna xi1
10    xi2 xi3 xi4 xi5 xi6 xi7 xi8 xi9 xi10 xi11 xi12
11    xi13 xi14 xi15 xi16 xi17 xi18 xi19 xi20 xi21
12    xi22 xi23 xi24 xi25 z x_max x_export
13    Cinter_cl Cinter_f Dcl Df rpa;
14
15    %%Variables
16    Ccelulosa=x(1); %x(1) es la concentracion
17    de celulosa [mol/m3].
18    Cglucosa=x(2); %x(2) es la concentracion
19    de glucosa [mol/m3].
20    Cproteina=x(3); %x(3) es la
21    concentracion de proteina [mol/m3].
22    Caa=x(4); %x(4) es la concentracion de
23    amino acidos [mol/m3].
24    Ch2s=x(5); %x(5) es la concentracion de
25    H2S [mol/m3].
26    Cacgraso=x(6); %x(6) es la concentracion
27    de acidos grasos [mol/m3].
28    X=x(7); %x(7) es la concentracion de
29    biomasa [mol/m3].
30    Cnh3=x(8); %x(8) es la concentracion de
31    NH3 [mol/m3].
32    Cch4=x(9); %x(9) es la concentracion de
33    CH4 [mol/m3].
34
35    Cco2=x(10); %x(10) es la concentracion
36    de CO2 [mol/m3].
37    Ch2o=x(11); %x(11) es la concentracion
38    de H2O [mol/m3].
39    Ccl=x(12); %x(12) es la concentracion de
40    Cl total [mol/m3].
41    Cf=x(13); %x(13) es la concentracion de
42    Fluor total [mol/m3].
43    T=x(14); %x(14) es la temperatura [K].
44    Nh2s=x(15); %x(15) son los moles de H2S
45    que se evaporan [mol/s].
46    Nnh3=x(16); %x(16) son los moles de
47    NH3 que se evaporan [mol/s].
48    Nch4=x(17); %x(17) son los moles de CH4
49    que se evaporan [mol/s].
50    Nco2=x(18); %x(18) son los moles de CO2
51    que se evaporan [mol/s].
52    Nh2o=x(19); %x(19) son los moles de
53    H2O que se evaporan [mol/s].
54    Ncl=x(20); %x(20) son los moles de Cl
55    total que se evaporan [mol/s].
56    Nf=x(21); %x(21) son los moles de F total
57    que se evaporan [mol/s].
58    NT=x(22); %x(22) son los moles totales
59    (todas las especies) que se evaporan
60    [mol/s].
61    CglucosaN=x(23);%x(23) es la
62    concentracion de glucosa no degradable
63    [mol/m3].
64    CaaN=x(24);%x(24) es la concentracion
65    de aa no degradable [mol/m3].

```


65	CacgrasoN=x(25);%x(25) es la	114	dCglucosa=(200*0.68*r1-r2)*S/Fv;
66	concentracion de acgraso no degradable	115	%Ec para glucosa no degradable
67	[mol/m ³].	116	dCglucosaN=(200*(1-0.68)*r1)*S/Fv;
68		117	%Ec para Proteinas
69	%%Temperatura en la interfase	118	dCproteina=-r3)*S/Fv;
70	Tinter=T;%en el biogas sera la misma que	119	%Ec para amino acidos
71	la temperatura del liquido. En el	120	dCaa=(50*0.8*r3-r4)*S/Fv;
72	compost, sera la T ambiente. [K]	121	%Ec para aa no degradables
73		122	dCaaN=50*0.2*r3)*S/Fv;
74	%%Velocidades de reacciones	123	%Ec para H2S
75	r1=k1*Ccelulosa;%[mol/(m ³ .s)]	124	dCh2s=(-fh2s/Fv)+(r4)*S/Fv;
76	r2=k2*(Cglucosa);%[mol/(m ³ .s)]	125	%Ec para acidos grasos
77	r3=k3*Cproteina;%[mol/(m ³ .s)]	126	dCacgraso=-r5)*S/Fv;
78	r4=k4*(Caa);%[mol/(m ³ .s)]	127	%Ec para acgrasos no degradables
79	r5=k5*(Cacgraso);%[mol/(m ³ .s)]	128	dCacgrasoN=0;
80		129	%Ec para Microorganismos
81	%%Flujos de salida desde el liquido hacia	130	dX=0;
82	el gas. PONER POSITIVOS, por favor, para	131	%Ec para NH3
83	hacer compatibles con BE y entre los BM	132	dCnh3=(-fnh3/Fv)+(3*r4)*S/Fv;
84	de Biogas y Compost.	133	%Ec para CH4
85	fh2s=(Ch2s>Ccrit_h2s)*(r2)*S; % es el	134	dCch4=(-
86	flux*L de H2S que sale del liq. al gas	135	fch4/Fv)+(3*r2+6.5*r4+11.5*r5)*S/Fv;
87	[mol/(m.s)].	136	%Ec para CO2
88	fnh3=(Cnh3>Ccrit_nh3)*(3*r4)*S; % es	137	dCco2=(-
89	el flux*L de NH3 que sale del liq. al gas	138	fco2/Fv)+(3*r2+6.5*r4+4.5*r5)*S/Fv;
90	[mol/(m.s)].	139	%Ec para H2O
91	fch4=(Cch4>Ccrit_ch4)*(3*r2+6.5*r4+11	140	dCh2o=(-fh2o/Fv)+(-200*r1-50*r3-6*r4-
92	.5*r5)*S; % es el flux*L de CH4 que sale	141	7*r5)*S/Fv;
93	del liq. al gas [mol/(m.s)].	142	%Ec para Cl total
94	fco2=(Cco2>Ccrit_co2)*(3*r2+6.5*r4+4.	143	dCcl=-fcl/Fv;
95	5*r5)*S; % es el flux*L de CO2 que sale	144	%Ec para F total
96	del liq. al gas [mol/(m.s)].	145	dCf=-ff/Fv;
97	fcl=0; % es el flux*L de Cl que sale del liq.	146	%Ec para T
98	al gas [mol/(m.s)].	147	%dT=(1/(cp*nt))*(gx*X*S-
99	ff=0;%-Df*(Cinter_f-Cf)*a*S/rp; % es el	148	(fh2s*lambda_h2s+fnh3*lambda_nh3+
100	flux*L de F que sale del liq. al gas	149	ch4*lambda_ch4+fco2*lambda_co2+fh
101	[mol/(m.s)].	150	2o*lambda_h2o+fcl*lambda_cl+ff*
102	fh2o=0.0728*(fh2s+fnh3+fch4+fco2+fcl	151	da_f)-L*h_liq*(T-Tinter));
103	+ff); % es el flux*L de H2O que sale del	152	dT=0;
104	liq. al gas [mol/(m.s)].	153	%Fase gas: listaremos aqui los valores de
105		154	las derivadas dNi/dz. Seran anotadas
106	%%Ecuacion diferencial:	155	como dNi, simplemente.
107		156	%Ec para H2S
108	% Fase sol-liq: listaremos aqui los valores	157	dNh2s=fh2s;
109	de las derivadas de dCi/dz. Seran notadas	158	%Ec. para NH3
110	como dCi, simplemente.	159	dNnh3=fnh3;
111	%Ec para celulosa	160	%Ec. para CH4
112	dCcelulosa=-r1)*S/Fv;	161	dNch4=fch4;
113	%Ec para glucosa	162	%Ec. para CO2

163	dNco2=fco2;	193	derivada(19)=dNh2o;
164	%Ec. para H2O	194	derivada(20)=dNcl;
165	dNh2o=fh2o;	195	derivada(21)=dNf;
166	%Ec. para Cl total	196	derivada(22)=dNT;
167	dNcl=fcl;	197	derivada(23)=dCglucosaN;
168	%Ec. para F total	198	derivada(24)=dCaaN;
169	dNf=ff;	199	derivada(25)=dCacgrasoN;
170	%Ec. para todas las especies	200	
171	dNT=dNh2s+dNnh3+dNch4+dNco2+dNh	201	%%Impedir concentraciones negativas
172	2o+dNcl+dNf;	202	(posibles por problemas numericos)
173		203	%rango_relativo=1e-2;
174	%%Respuesta	204	%for j=1:22
175	derivada(1)=dCcelulosa;	205	% x_crit=x_max(j)*rango_relativo;
176	derivada(2)=dCglucosa;	206	% if derivada(j)<0
177	derivada(3)=dCproteina;	207	% if (x(j)<x_crit)
178	derivada(4)=dCaa;	208	% derivada(j)=0;%derivada(j)/1e5;
179	derivada(5)=dCh2s;	209	% if j==1%celulosa
180	derivada(6)=dCacgraso;	210	% control1=0;
181	derivada(7)=dX;	211	% elseif j==3%Proteina
182	derivada(8)=dCnh3;	212	% control4=0;
183	derivada(9)=dCch4;	213	% end
184	derivada(10)=dCco2;	214	% end
185	derivada(11)=dCh2o;	215	% end
186	derivada(12)=dCcl;	216	%end
187	derivada(13)=dCf;	217	%for j=1:22
188	derivada(14)=dT;	218	%if (x(j)<0)
189	derivada(15)=dNh2s;	219	%derivada(j)=0;
190	derivada(16)=dNnh3;	220	%end
191	derivada(17)=dNch4;	221	%end
192	derivada(18)=dNco2;	222	end

Anexo K CÁLCULOS: DIMENSIONAMIENTO DIGESTIÓN

Los cálculos y resultados del dimensionamiento del depósito de alimentación se encuentran en: <https://goo.gl/8kHXgj>.

K.1 CONDICIONES INICIALES DE LOS MODELOS

Las alimentaciones utilizadas para evaluar los modelos se encuentran disponibles en: <https://goo.gl/8kHXgj>, pestañas A1 hasta A20.

Cabe mencionar que la alimentación A1 corresponde a la utilizada como condición inicial en el ajuste de parámetros. Esta información fue obtenida de otra fuente [49], pues el experimento no reportó la composición de la alimentación utilizada.

K.2 RESULTADOS MODELO N°1

Los resultados del modelo se encuentran en: <https://goo.gl/8kHXgj> pestaña *Casos reactor*.

K.3 RESULTADOS MODELO N°2

Los resultados del modelo se encuentran en: <https://goo.gl/8kHXgj> pestaña *Dim. reactor*.

K.4 RESULTADOS MODELO N°3

K.4.1 Resultados Modelo n°3

Los resultados del modelo se encuentran en: <https://goo.gl/8kHXgj> pestaña *Corroboración resultados*.

K.4.2 Resultados Modelo n°3 corregido

Los resultados del modelo se encuentran en: <https://goo.gl/8kHXgj> pestaña *Corroboración resultados corregido*.

Anexo L DEFINICIÓN DE RENDIMIENTO EN EL SISTEMA

Como ha sido explicado en este trabajo, los residuos de alimentos tienen una composición variada. Existe, además, una característica difícil de inferir: la degradabilidad.

Si bien es posible inferir la proporción de carbohidratos, proteínas y lípidos, no es posible para los microorganismos degradar todas estas moléculas, por su estructura tridimensional en la materia prima. Un conjunto de restricciones espaciales o barreras físicas podrían impedir a los microorganismos acceder a parte de los residuos. La degradabilidad no puede ser inferida a priori, pues depende fuertemente de la estructura interna de los residuos, que no ha sido formalizada en la literatura.

Teniendo lo anterior presente, resulta imposible definir la redimiento de la misma manera que en otros reactores. Así, se optará por utilizar una medida del cambio tomando los productos como referencia.

Considerando la indefinición de los reactantes posibles de convertir, no se optará por una medida de rendimiento usual (moles de producto obtenido por mol de reactante consumido) sino por una medida sostenida en los solamente en los productos. Así, se definirá el rendimiento como los moles de producto obtenido por mol de producto posible de obtener.

Para estimar este último valor, se evaluó con el propio modelo el flujo de productos posible de obtener cuando el sistema llegara al estado estacionario. A fin de estimar la producción en estado estacionario, se evaluó el modelo para tiempos de residencia prolongados, y se estimó que el sistema habría llegado al estado estacionario cuando las concentraciones variaran menos de un 1% en términos relativos. Considerando que el producto de interés es el metano, esta fue la molécula evaluada para definir el rendimiento.

Con esto, el rendimiento queda definido por la siguiente fórmula:

$$Y = \frac{\dot{n}_{CH_4 \text{ obtenido}}}{\dot{n}_{CH_4 \text{ estadoestacionario}}} \quad (78)$$

Anexo M EQUILIBRIO GAS-LÍQUIDO DE SALIDA DEL REACTOR

Las especies H_2S y NH_3 son contaminantes habituales del biogás y deben ser separados antes su combustión. Estas especies han sido seguidas especialmente en la composición gaseosa.

La primera estimación de su concentración en fase gas está sostenida en el supuesto de equilibrio de Henry entre las fases líquida y gaseosa.

El agua, de modo similar, se asumió en equilibrio, aunque considerando que la concentración de agua en la fase líquida es muy alta (fracción molar igual a 1,0). Esto permite usar directamente la presión de vapor en un equilibrio de Raoult.

Este anexo presenta el cálculo separado del flujo molar de agua y los dos contaminantes mencionados, H_2S y NH_3 .

M.1 EQUILIBRIO GAS-LÍQUIDO PARA EL AGUA

Se asumirá que antes del ingreso de los gases a la fase gaseosa, su flujo es saturado en agua, cumpliendo un equilibrio de Raoult.

Utilizando la ecuación de Raoult, es posible obtener una estimación para la presión parcial de agua:

$$P_{H_2O} = P_{vap_{H_2O}} \cdot X_{H_2O_{liq}} \quad (79)$$

Se asumirá, como se mencionó anteriormente, que el agua es muy abundante en la fase líquida. Con ello, la fracción molar de agua en fase líquida se asumirá 1. Así, la presión parcial de agua en el flujo de salida de gases corresponde a la presión de vapor, esto es, un dato. En estos cálculos fue considerada la presión de vapor de agua para condiciones de $40^\circ C$ y presión atmosférica. En tales condiciones, la fracción molar de agua en fase gas corresponde a 0,0728.

En las siguientes ecuaciones, para el enlace con el sistema calculado, se han utilizado los flujos molares de agua y total en fase gas (\dot{n}).

Utilizando la ecuación de gases ideales y aplicando a la composición de agua, se tiene:

$$P_{H_2O} = \frac{\dot{n}_{H_2O}}{\dot{V}} RT \quad (80)$$

El flujo total de gases obedece a la misma ecuación de gases ideales, a saber:

$$P_{Total} = \frac{\dot{n}_{Total}}{\dot{V}} RT \quad (81)$$

Con esta ecuación se establece una proporción entre la presión parcial de agua y la fracción molar, concluyendo la ley de Dalton:

$$\dot{n}_{H_2O} = \dot{n}_{Total} \cdot \frac{P_{H_2O}}{P_{Total}} \quad (82)$$

Integrando en la ecuación anterior la ley de Raoult, asumiendo una fracción molar $X=1$ en la fase líquida, se tiene:

$$\dot{n}_{H_2O} = \dot{n}_{Total} \cdot \frac{P_{vap_{H_2O}}}{P_{Total}} \quad (83)$$

M.2 EQUILIBRIO GAS-LÍQUIDO PARA EL H₂S Y NH₃.

Para estos gases se asumió un equilibrio de Henry, tomando en cuenta que su fracción molar en fase líquida es pequeña (menor al 50%). Con este supuesto, la relación entre la presión parcial en fase gas y la concentración en fase líquida responde a la siguiente ecuación:

$$P_{i_{gas}} [Pa] \cdot H_i \left[\frac{mol}{m^3 Pa} \right] = C_{i_{liq}} \left[\frac{mol}{m^3} \right] \quad (84)$$

La constante de Henry (H_i) depende del componente analizado (i), en este caso, H₂S o NH₃. Estos valores han sido obtenidos de [Sander, R. **Compilation of Henry's law constants (version 4.0) for water as solvent. Atmospheric Chemistry and Physics, 15: 4399-4981, 2015**].

Los datos utilizados para cada componente corresponden a 1,0E-3 [mol/(m³ Pa)] para el H₂S y 5,9E-1 [mol/(m³ Pa)].

En términos de los flujos molares de los componentes en fase gaseosa, se tiene:

$$\frac{\dot{n}_{i_{gas}}}{\dot{n}_{Total_{gas}}} \cdot P [Pa] \cdot H_i \left[\frac{mol}{m^3 Pa} \right] = C_{i_{liq}} \left[\frac{mol}{m^3} \right] \quad (85)$$

Por otro lado, el flujo molar obtenido en la simulación (inicialmente solo en fase líquida) debe cumplir el balance de masa con los flujos de H₂S y NH₃ en equilibrio gas-líquido, es decir:

$$\dot{n}_{i_{gas}} + \dot{n}_{i_{liq}} = \dot{n}_{i_{liq, simulación}} \quad (86)$$

Usando las variables de la simulación, es decir, concentraciones y flujo volumétrico en fase líquida, la ecuación anterior se transforma en:

$$\dot{n}_{i_{gas}} + C_{i_{liq}} \cdot Fv = C_{i_{liq, simulación}} \cdot Fv \quad (87)$$

Utilizando la ecuación (85) para despejar el flujo molar de H₂S y NH₃, representados con el subíndice i, e introduciendo en la última ecuación, se tiene:

$$\frac{C_{i_{liq}} \cdot \dot{n}_{Total_{gas}}}{P \cdot H_i} + C_{i_{liq}} \cdot Fv = C_{i_{liq, simulación}} \cdot Fv \quad (88)$$

Despejando la concentración de los componentes en fase líquida (C_{i-liq}), se obtiene:

$$C_{i_{liq}} \left[\frac{mol}{m^3} \right] = \frac{C_{i_{liq, simulación}} \left[\frac{mol}{m^3} \right] \cdot Fv \left[\frac{m^3}{s} \right]}{Fv \left[\frac{m^3}{s} \right] + \frac{\dot{n}_{Total_{gas}} \left[\frac{mol}{s} \right]}{P [Pa] \cdot H_i \left[\frac{mol}{m^3 Pa} \right]}} \quad (89)$$

Con este valor y la ecuación (87) es posible obtener el valor del flujo molar de cada componente en la fase gas:

$$\dot{n}_{i_{gas}} \left[\frac{mol}{s} \right] = \left(C_{i_{liq, simulación}} \left[\frac{mol}{m^3} \right] - C_{i_{liq}} \left[\frac{mol}{m^3} \right] \right) \cdot Fv \quad (90)$$

Anexo N CÓDIGO MODELO 3

N.1 EQUIPOV2_BIOGAS_MAIN_MODELO.M

```

1      %%%Este archivo permite calcular          45
2      evolución de concentracion de          46      if Alim==2
3      compuestos en el reactor de biogas.      47      ntm_s=43.235; %numero de moles por
4      %%%Simular luego de biogas_main_exp      48      unidad de masa que entra al reactor [mol
5      clc;                                       49      sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
6      clear all;                                  50      C_celulosa=2.337; %valor inicial de la
7                                                    51      concentracion de celulosa [mol/m³].
8      global Fm_gas Fm_digestato Fv_i ntm_s      52      C_proteina=1.781;%valor inicial de la
9      Nf_salida yf_gas Ncl_salida ycl_gas        53      concentracion de proteina [mol/m³].
10     Nco2_salida yco2_gas Nch4_salida           54      C_acgraso=80.027; %valor inicial de la
11     ych4_gas VS_S VS_reciclo tfinal2          55      concentracion de acidos grasos
12     factor_reduccion_casobase f_red           56      [mol/m³].
13     Nch4_max tfinal ynh3_liq ynh3_gas         57      C_agua=24996.333; %valor inicial de la
14     P_nh3 Nnh3_salida yh2s_liq yh2s_gas       58      concentracion de H2O [mol/m³].
15     P_h2s Fv_g_final Ngas_salida              59      C_cloro=18.625; %valor inicial de la
16     Nh2s_salida SMIliq_hum Rh2o Eh2o         60      concentracion de Cl total [mol/m³].
17     Hh2o_final C_salida H_salida O_salida     61
18     N_salida PM_salida CN x_modelo            62      elseif Alim==3
19     Mliq_hum SMIliq_hum Humedad D Fv_g        63      ntm_s=43.940; %numero de moles por
20     x_modelo k1 k2 k3 k4 k5 R alfa_grad       64      unidad de masa que entra al reactor [mol
21     alfa_rad L H S P_atm P_pa R_l R_m3        65      sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
22     rho_s Fm_s Fv_s ntm_s nt_s rho_i Fm_i      66      C_celulosa=0; %valor inicial de la
23     Fv_i ntm_i nt_i Fm Fv nt lambda_h2s       67      concentracion de celulosa [mol/m³].
24     lambda_nh3 lambda_ch4 lambda_co2          68      C_proteina=0;%valor inicial de la
25     lambda_h2o lambda_cl lambda_f gx          69      concentracion de proteina [mol/m³].
26     h_liq cp Ccrit_h2s Ccrit_nh3 Ccrit_ch4    70      C_acgraso=500.298; %valor inicial de la
27     Ccrit_co2 Ccrit_h2o Ccrit_cl Ccrit_f      71      concentracion de acidos grasos
28     z_columna xi1 xi2 xi3 xi4 xi5 xi6 xi7 xi8 xi9 72      [mol/m³].
29     xi10 xi11 xi12 xi13 xi14 xi15 xi16 xi17 xi18 73      C_agua=24996.333; %valor inicial de la
30     xi19 xi20 xi21 xi22 xi23 xi24 xi25 z x_max 74      concentracion de H2O [mol/m³].
31     x_export Cinter_cl Cinter_f Dcl Df rp a;   75      C_cloro=18.625; %valor inicial de la
32                                                    76      concentracion de Cl total [mol/m³].
33     %p se obtiene de main_modeloexp            77
34     p=[6.8506e-005; -5.1288e-001; 4.9879e-    78      elseif Alim==4
35     001; -5.0000e-001];                        79      ntm_s=43.099; %numero de moles por
36     t=[0:0.1:6];                               80      unidad de masa que entra al reactor [mol
37                                                    81      sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
38     %Inoculo                                    82      C_celulosa=3.953; %valor inicial de la
39     Fv_i=(0.004/24/3600);                       83      concentracion de celulosa [mol/m³].
40                                                    84      C_proteina=0;%valor inicial de la
41     %Alimentacion                               85      concentracion de proteina [mol/m³].
42     nciclos=100;                                86      C_acgraso=0; %valor inicial de la
43     Alim=2;                                       87      concentracion de acidos grasos
44     diary Alim2_nuevo_modelo.txt;               88      [mol/m³].

```

89	C_agua=24996.333; %valor inicial de la	137	C_agua=24911.111; %valor inicial de la
90	concentracion de H2O [mol/m ³].	138	concentracion de H2O [mol/m ³].
91	C_cloro=18.625; %valor inicial de la	139	C_cloro=18.625; %valor inicial de la
92	concentracion de Cl total [mol/m ³].	140	concentracion de Cl total [mol/m ³].
93		141	
94	elseif Alim==5	142	elseif Alim==8
95	ntm_s=33.229; %numero de moles por	143	ntm_s=32.202; %numero de moles por
96	unidad de masa que entra al reactor [mol	144	unidad de masa que entra al reactor [mol
97	sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE	145	sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
98	C_celulosa=0; %valor inicial de la	146	C_celulosa=4.429; %valor inicial de la
99	concentracion de celulosa [mol/m ³].	147	concentracion de celulosa [mol/m ³].
100	C_proteina=7.155;%valor inicial de la	148	C_proteina=3.376;%valor inicial de la
101	concentracion de proteina [mol/m ³].	149	concentracion de proteina [mol/m ³].
102	C_acgraso=0; %valor inicial de la	150	C_acgraso=151.693; %valor inicial de la
103	concentracion de acidos grasos	151	concentracion de acidos grasos
104	[mol/m ³].	152	[mol/m ³].
105	C_agua=24996.333; %valor inicial de la	153	C_agua=18027.778; %valor inicial de la
106	concentracion de H2O [mol/m ³].	154	concentracion de H2O [mol/m ³].
107	C_cloro=18.625; %valor inicial de la	155	C_cloro=18.625; %valor inicial de la
108	concentracion de Cl total [mol/m ³].	156	concentracion de Cl total [mol/m ³].
109		157	
110	elseif Alim==6	158	elseif Alim==9
111	ntm_s=43.648; %numero de moles por	159	ntm_s=33.229; %numero de moles por
112	unidad de masa que entra al reactor [mol	160	unidad de masa que entra al reactor [mol
113	sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE	161	sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
114	C_celulosa=0; %valor inicial de la	162	C_celulosa=0; %valor inicial de la
115	concentracion de celulosa [mol/m ³].	163	concentracion de celulosa [mol/m ³].
116	C_proteina=1.41507;%valor inicial de la	164	C_proteina=2.65326;%valor inicial de la
117	concentracion de proteina [mol/m ³].	165	concentracion de proteina [mol/m ³].
118	C_acgraso=406.833; %valor inicial de la	166	C_acgraso=762.812; %valor inicial de la
119	concentracion de acidos grasos	167	concentracion de acidos grasos
120	[mol/m ³].	168	[mol/m ³].
121	C_agua=24911.111; %valor inicial de la	169	C_agua=18027.778; %valor inicial de la
122	concentracion de H2O [mol/m ³].	170	concentracion de H2O [mol/m ³].
123	C_cloro=18.625; %valor inicial de la	171	C_cloro=18.625; %valor inicial de la
124	concentracion de Cl total [mol/m ³].	172	concentracion de Cl total [mol/m ³].
125		173	
126	elseif Alim==7	174	elseif Alim==10
127	ntm_s=42.963; %numero de moles por	175	ntm_s=31.945; %numero de moles por
128	unidad de masa que entra al reactor [mol	176	unidad de masa que entra al reactor [mol
129	sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE	177	sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
130	C_celulosa=3.493; %valor inicial de la	178	C_celulosa=6.549; %valor inicial de la
131	concentracion de celulosa [mol/m ³].	179	concentracion de celulosa [mol/m ³].
132	C_proteina=0.91118;%valor inicial de la	180	C_proteina=1.70847;%valor inicial de la
133	concentracion de proteina [mol/m ³].	181	concentracion de proteina [mol/m ³].
134	C_acgraso=0; %valor inicial de la	182	C_acgraso=0; %valor inicial de la
135	concentracion de acidos grasos	183	concentracion de acidos grasos
136	[mol/m ³].	184	[mol/m ³].

185	C_agua=24911.111; %valor inicial de la	233	C_agua=29500.000; %valor inicial de la
186	concentracion de H2O [mol/m ³].	234	concentracion de H2O [mol/m ³].
187	C_cloro=18.625; %valor inicial de la	235	C_cloro=18.625; %valor inicial de la
188	concentracion de Cl total [mol/m ³].	236	concentracion de Cl total [mol/m ³].
189		237	
190	elseif Alim==11	238	elseif Alim==14
191	ntm_s=31.954; %numero de moles por	239	ntm_s=50.309; %numero de moles por
192	unidad de masa que entra al reactor [mol	240	unidad de masa que entra al reactor [mol
193	sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE	241	sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
194	C_celulosa=0; %valor inicial de la	242	C_celulosa=1.455; %valor inicial de la
195	concentracion de celulosa [mol/m ³].	243	concentracion de celulosa [mol/m ³].
196	C_proteina=13.63;%valor inicial de la	244	C_proteina=0.37966;%valor inicial de la
197	concentracion de proteina [mol/m ³].	245	concentracion de proteina [mol/m ³].
198	C_acgraso=0; %valor inicial de la	246	C_acgraso=0.000; %valor inicial de la
199	concentracion de acidos grasos	247	concentracion de acidos grasos
200	[mol/m ³].	248	[mol/m ³].
201	C_agua=18027.778; %valor inicial de la	249	C_agua=29500.000; %valor inicial de la
202	concentracion de H2O [mol/m ³].	250	concentracion de H2O [mol/m ³].
203	C_cloro=18.625; %valor inicial de la	251	C_cloro=18.625; %valor inicial de la
204	concentracion de Cl total [mol/m ³].	252	concentracion de Cl total [mol/m ³].
205		253	
206	elseif Alim==12	254	elseif Alim==15
207	ntm_s=50.366; %numero de moles por	255	ntm_s=50.311; %numero de moles por
208	unidad de masa que entra al reactor [mol	256	unidad de masa que entra al reactor [mol
209	sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE	257	sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
210	C_celulosa=0.984; %valor inicial de la	258	C_celulosa=0; %valor inicial de la
211	concentracion de celulosa [mol/m ³].	259	concentracion de celulosa [mol/m ³].
212	C_proteina=0.750;%valor inicial de la	260	C_proteina=3.014;%valor inicial de la
213	concentracion de proteina [mol/m ³].	261	concentracion de proteina [mol/m ³].
214	C_acgraso=33.710; %valor inicial de la	262	C_acgraso=0.000; %valor inicial de la
215	concentracion de acidos grasos	263	concentracion de acidos grasos
216	[mol/m ³].	264	[mol/m ³].
217	C_agua=29500.000; %valor inicial de la	265	C_agua=29500.000; %valor inicial de la
218	concentracion de H2O [mol/m ³].	266	concentracion de H2O [mol/m ³].
219	C_cloro=18.625; %valor inicial de la	267	C_cloro=18.625; %valor inicial de la
220	concentracion de Cl total [mol/m ³].	268	concentracion de Cl total [mol/m ³].
221		269	
222	elseif Alim==13	270	elseif Alim==16
223	ntm_s=50.594; %numero de moles por	271	ntm_s=47.121; %numero de moles por
224	unidad de masa que entra al reactor [mol	272	unidad de masa que entra al reactor [mol
225	sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE	273	sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
226	C_celulosa=0; %valor inicial de la	274	C_celulosa=0; %valor inicial de la
227	concentracion de celulosa [mol/m ³].	275	concentracion de celulosa [mol/m ³].
228	C_proteina=0.58961;%valor inicial de la	276	C_proteina=1.00234;%valor inicial de la
229	concentracion de proteina [mol/m ³].	277	concentracion de proteina [mol/m ³].
230	C_acgraso=169.514; %valor inicial de la	278	C_acgraso=288.173; %valor inicial de la
231	concentracion de acidos grasos	279	concentracion de acidos grasos
232	[mol/m ³].	280	[mol/m ³].


```

281 C_agua=27205.556; %valor inicial de la
282 concentracion de H2O [mol/m³].
283 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
284 concentracion de Cl total [mol/m³].
285 prop_R_S=2; %proporcion masica de
286 reciclo [kg VS reciclo / kg VS sustrato]
287
288 elseif Alim==17
289 ntm_s=38.190; %numero de moles por
290 unidad de masa que entra al reactor [mol
291 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
292 C_celulosa=0; %valor inicial de la
293 concentracion de celulosa [mol/m³].
294 C_proteina=2.06365;%valor inicial de la
295 concentracion de proteina [mol/m³].
296 C_acgraso=593.298; %valor inicial de la
297 concentracion de acidos grasos
298 [mol/m³].
299 C_agua=21305.556; %valor inicial de la
300 concentracion de H2O [mol/m³].
301 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
302 concentracion de Cl total [mol/m³].
303 prop_R_S=2; %proporcion masica de
304 reciclo [kg VS reciclo / kg VS sustrato]
305
306 elseif Alim==18
307 ntm_s=53.075; %numero de moles por
308 unidad de masa que entra al reactor [mol
309 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
310 C_celulosa=0; %valor inicial de la
311 concentracion de celulosa [mol/m³].
312 C_proteina=0.29481;%valor inicial de la
313 concentracion de proteina [mol/m³].
314 C_acgraso=84.757; %valor inicial de la
315 concentracion de acidos grasos
316 [mol/m³].
317 C_agua=31138.889; %valor inicial de la
318 concentracion de H2O [mol/m³].
319 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
320 concentracion de Cl total [mol/m³].
321 prop_R_S=2; %proporcion masica de
322 reciclo [kg VS reciclo / kg VS sustrato]
323
324 elseif Alim==19
325 ntm_s=48.113; %numero de moles por
326 unidad de masa que entra al reactor [mol
327 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
328 C_celulosa=0; %valor inicial de la
329 concentracion de celulosa [mol/m³].
330
331 C_proteina=0.88442;%valor inicial de la
332 concentracion de proteina [mol/m³].
333 C_acgraso=254.271; %valor inicial de la
334 concentracion de acidos grasos
335 [mol/m³].
336 C_agua=27861.111; %valor inicial de la
337 concentracion de H2O [mol/m³].
338 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
339 concentracion de Cl total [mol/m³].
340 prop_R_S=2; %proporcion masica de
341 reciclo [kg VS reciclo / kg VS sustrato]
342
343 elseif Alim==20
344 ntm_s=45.632; %numero de moles por
345 unidad de masa que entra al reactor [mol
346 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
347 C_celulosa=0; %valor inicial de la
348 concentracion de celulosa [mol/m³].
349 C_proteina=1.17923;%valor inicial de la
350 concentracion de proteina [mol/m³].
351 C_acgraso=339.028; %valor inicial de la
352 concentracion de acidos grasos
353 [mol/m³].
354 C_agua=26222.222; %valor inicial de la
355 concentracion de H2O [mol/m³].
356 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
357 concentracion de Cl total [mol/m³].
358 prop_R_S=2; %proporcion masica de
359 reciclo [kg VS reciclo / kg VS sustrato]
360 end
361
362 %Composicion del reciclo
363 C_salida=5.869;
364 H_salida=12.214;
365 O_salida=2.1457;
366 N_salida=1;
367 Hh2o_final=0.80741;
368 PM_salida=(C_salida*12+H_salida*1+O_
369 salida*16+N_salida*14)/1000; %kg/mol
370
371 for i=1:nciclos
372 [z,Cliq,Tliq,Tgas,Cgas]=equipov2_biogas
373 _modelo(t,p,C_celulosa,C_proteina,C_a
374 cgraso,C_agua,C_cloro);
375 end
376 clc
377 C_salida
378 H_salida
379 O_salida

```

```

379 N_salida
380 Hh2o_final
381 display('-----');
382 %figure(1);
383 %plot(z,Cliq(:,:));
384 %legend('Concentracion de
385 celulosa','Concentracion de
386 glucosa','Concentracion de
387 proteina','Concentracion de
388 aminoacidos','Concentracion de
389 sulfato','Concentracion de acidos
390 grasos','Concentracion de
391 microorganismos','Concentracion de
392 NH3','Concentracion de
393 O2','Concentracion de
394 CO2','Concentracion de
395 H2O','Concentracion de Cl
396 total','Concentracion de F total');
397 %xlabel('Largo de reactor (m)')
398 %ylabel('Concentracion en fase
399 liquida(mol/m3)');
400 %title('Concentracion de compuestos en
401 fase liquida vs largo del reactor');
402
403 %figure(2);
404 %plot(z,Cliq(:,1));
405 %legend('Concentracion de celulosa');
406 %xlabel('Largo de reactor (m)')
407 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
408 %title('Concentracion de celulosa en fase
409 liquida vs largo del reactor');
410 %%%
411 %figure(3);
412 %plot(z,Cliq(:,2));
413 %legend('Concentracion de glucosa');
414 %xlabel('Largo de reactor (m)')
415 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
416 %title('Concentracion de glucosa en fase
417 liquida vs largo del reactor');
418 %
419 %figure(4);
420 %plot(z,Cliq(:,3));
421 %legend('Concentracion de proteina');
422 %xlabel('Largo de reactor (m)')
423 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
424 %title('Concentracion de proteina en
425 fase liquida vs largo del reactor');
426 %%%
427 %figure(5);
428 %plot(z,Cliq(:,4));
429 %legend('Concentracion de
430 aminoacidos');
431 %xlabel('Largo de reactor (m)')
432 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
433 %title('Concentracion de aminoacidos en
434 fase liquida vs largo del reactor');
435 %%%
436 %%%figure(6);
437 %%%plot(z,Cliq(:,5));
438 %%%legend('Concentracion de H2S');
439 %%%xlabel('Largo de reactor (m)')
440 %%%ylabel('Concentracion
441 (mol/m3)');
442 %%%title('Concentracion de H2S en
443 fase liquida vs largo del reactor');
444 %%%
445 %figure(7);
446 %plot(z,Cliq(:,6));
447 %legend('Concentracion de acidos
448 grasos');
449 %xlabel('Largo de reactor (m)')
450 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
451 %title('Concentracion de acidos grasos
452 en fase liquida vs largo del reactor');
453
454 %figure(8);
455 %plot(z,Cliq(:,7));
456 %legend('Concentracion de
457 microorganismos');
458 %xlabel('Largo de reactor (m)')
459 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
460 %title('Concentracion de
461 microorganismos en fase liquida vs largo
462 del reactor');
463 %
464 %figure(9);
465 %plot(z,Cliq(:,8));
466 %legend('Concentracion de NH3');
467 %xlabel('Largo de reactor (m)')
468 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
469 %title('Concentracion de NH3 en fase
470 liquida vs largo del reactor');
471
472 %figure(10);
473 %plot(z,Cliq(:,9));
474 %legend('Concentracion de CH4');
475 %xlabel('Largo de reactor (m)')
476 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');

```

```

477 %title('Concentracion de CH4 en fase
478 liquida vs largo del reactor');
479
480 %figure(11);
481 %plot(z,Cliq(:,10));
482 %legend('Concentracion de CO2');
483 %xlabel('Largo de reactor (m)')
484 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
485 %title('Concentracion de CO2 en fase
486 liquida vs largo del reactor');
487
488 %figure(12);
489 %plot(z,Cliq(:,11));
490 %legend('Concentracion de H2O');
491 %xlabel('Largo de reactor (m)')
492 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
493 %title('Concentracion de H2O en fase
494 liquida vs largo del reactor');
495 %
496 %figure(13);
497 %plot(z,Cliq(:,12));
498 %legend('Concentracion de Cl total');
499 %xlabel('Largo de reactor (m)')
500 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
501 %title('Concentracion de Cl total en fase
502 liquida vs largo del reactor');
503 %
504 %figure(14);
505 %plot(z,Cliq(:,13));
506 %legend('Concentracion de F total');
507 %xlabel('Largo de reactor (m)')
508 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
509 %title('Concentracion de F total en fase
510 liquida vs largo del reactor');
511 %
512 %figure(15);
513 %plot(z,Tliq(:,1));
514 %legend('Temperatura de la fase liquida
515 del reactor');
516 %xlabel('Largo de reactor (m)');
517 %ylabel('Temperatura (K)');
518 %title('Temperatura de la fase liquida vs
519 largo de reactor');
520 %
521 %%Graficos para el gas
522 %figure(16);
523 %plot(z,Cgas(:,:));
524 %legend('Concentracion de
525 H2S','Concentracion de
526 NH3','Concentracion de
527 CH4','Concentracion de
528 CO2','Concentracion de
529 H2O','Concentracion de
530 Cl total','Concentracion de F total');
531 %xlabel('Largo de reactor (m)')
532 %ylabel('Concentracion en fase gas
533 (mol/m3)');
534 %title('Concentracion de compuestos en
535 fase gas vs largo total del reactor');
536 %
537 %figure(17);
538 %plot(z,Cgas(:,1));
539 %legend('Concentracion de H2S');
540 %xlabel('Largo total de reactor (m)')
541 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
542 %title('Concentracion de H2S en fase gas
543 vs largo total del reactor');
544 %
545 %figure(18);
546 %plot(z,Cgas(:,2));
547 %legend('Concentracion de NH3');
548 %xlabel('Largo de total reactor (m)')
549 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
550 %title('Concentracion de NH3 en fase gas
551 vs largo total del reactor');
552 %
553 %figure(19);
554 %plot(z,Cgas(:,3));
555 %legend('Concentracion de CH4');
556 %xlabel('Largo total de reactor (m)')
557 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
558 %title('Concentracion de CH4 en fase gas
559 vs largo total del reactor');
560 %%
561 %figure(20);
562 %plot(z,Cgas(:,4));
563 %legend('Concentracion de CO2');
564 %xlabel('Largo total de reactor (m)')
565 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
566 %title('Concentracion de CO2 en fase gas
567 vs largo total del reactor');
568 %
569 %figure(21);
570 %plot(z,Cgas(:,5));
571 %legend('Concentracion de H2O');
572 %xlabel('Largo total de reactor (m)')
573 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');

```

```

574 %title('Concentracion de H2O en fase gas vs largo total del reactor');
575 vs largo total del reactor');
576 %
577 %figure(22);
578 %plot(z,Cgas(:,6));
579 %legend('Concentracion de Cl total');
580 %xlabel('Largo total de reactor (m)');
581 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
582 %title('Concentracion de Cl total en fase gas vs largo total del reactor');
583 gas vs largo total del reactor');
584 %
585 %figure(23);
586 %plot(z,Cgas(:,7));
587 %legend('Concentracion de F total');
588 %xlabel('Largo total de reactor (m)');
589 %ylabel('Concentracion (mol/m3)');
590 %title('Concentracion de Fl total en fase gas vs largo total del reactor');
591 gas vs largo total del reactor');
592 %
593 %figure(24);
594 %plot(z,Tgas(:,1));
595 %legend('Temperatura de la fase gas del reactor');
596 reactor');
597 %xlabel('Largo total de reactor (m)');
598 %ylabel('Temperatura (K)');
599 %title('Temperatura de la fase gas vs largo total de reactor');
600 largo total de reactor');
601
602 %figure(25);
603 %plot(z,Humedad);
604 %legend('Humedad de la fase liquida');
605 %xlabel('Largo de reactor (m)');
606 %ylabel('Humedad (Fraccion masica)');
607 %title('Humedad de la fase liquida vs largo de reactor');
608 largo de reactor');
609 %
610 %figure(26);
611 %plot(z,x_modelo(:,17));
612 %legend('Moles de CH4 (mol)');
613 %xlabel('Largo de reactor (m)');
614 %ylabel('CH4 (mol)');
615 %title('Moles de CH4 en la fase gaseosa vs largo de reactor');
616 vs largo de reactor');
617
618 %figure(27);
619 %plot(z,CN);
620 %legend('CN');
621 %xlabel('Largo de reactor (m)');
622 %ylabel('Proporcion C:N');
623 %
624 %figure(28);
625 %plot(z,Eh2o);
626 %legend('Flujo de H2O extra requerido');
627 %xlabel('Largo de reactor (m)');
628 %ylabel('Flujo de H2O (kg/s)');
629
630
631 %Mostrar
632 v_ms=Fv/S;
633 v_mms=v_ms*1000 %mm/s
634 largo_m=z(length(z));
635 largo_cm=largo_m*100
636 largo_batch_1d_cm=v_ms*3600*24*10
637 0 %cm
638 vol_l=S*largo_m*1000 %l
639 Proporcion_SVreciclo_SVsustrato=VS_re
640 ciclo/VS_S %al menos debe ser 2
641 Reciclo_kg_d=Fm_i*3600*24
642 Masa_total_kg_d=Fm*3600*24
643
644 %display('-----');
645 %Rh2o
646 %display('-----');
647 display('----gas----');
648 Fv_g_m3_s=Fv_g_final
649 Ngas_salida_mol_s=Ngas_salida
650 display('----h2s----');
651 Nh2s_gas_mol_s=Nh2s_salida
652 y_h2s_gas= yh2s_gas
653 %P_h2s_atm=P_h2s
654 %Nh2s_liq_mol_s=x_modelo(length(z),5
655 )*Fv
656 %y_h2s_liq=yh2s_liq
657 %H_h2s_test=x_modelo(length(z),5)/yh
658 2s_gas/P_pa
659 display('----nh3----');
660 Nnh3_gas_mol_s=Nnh3_salida
661 y_nh3_gas= ynh3_gas
662 %P_nh3_atm=P_nh3
663 Nnh3_liq_mol_s=x_modelo(length(z),8)
664 *Fv
665 y_nh3_liq=ynh3_liq
666 %H_nh3_test=x_modelo(length(z),8)/yn
667 h3_gas/P_pa
668 display('----h2o----');
669 Nh2o_gas_mol_s=x_modelo(length(z),1
670 9)

```

```

671 y_h2o_gas=Nh2o_gas_mol_s/Ngas_sali
672 da_mol_s
673 display('----ch4----');
674 Nch4_gas_mol_s=Nch4_salida
675 y_ch4_gas=ych4_gas
676 display('----co2----');
677 Nco2_gas_mol_s=Nco2_salida
678 y_co2_gas=yco2_gas
679 display('----f----');
680 Nf_gas_mol_s=Nf_salida
681 y_f_gas=yf_gas
682 display('----cl----');
683 Ncl_gas_mol_s=Ncl_salida

```

N.2 EQUIPOV2_BIOGAS_MODELO.M

```

1 function
2 [z,Cliq,Tliq,Tgas,Cgas]=equipov2_biogas
3 _modelo(t,p,C_celulosa,C_proteina,C_a
4 cgraso,C_agua,C_cloro);
5 global Fm_gas Fm_digestato Fv_i ntm_s
6 Nf_salida yf_gas Ncl_salida ycl_gas
7 Nco2_salida yco2_gas Nch4_salida
8 ych4_gas VS_S VS_reciclo f_red tfinal
9 ynh3_liq ynh3_gas P_nh3 Nnh3_salida
10 yh2s_liq yh2s_gas P_h2s Fv_g_final
11 Ngas_salida Nh2s_salida SMLiq_hum
12 Rh2o Eh2o Hh2o_final C_salida H_salida
13 O_salida N_salida PM_salida CN
14 x_modelo Mliq_hum SMLiq_hum
15 Humedad D Cinter Fv_g x_modelo k1 k2
16 k3 k4 k5 R alfa_grad alfa_rad L H S P_atm
17 P_pa R_l R_m3 rho_s Fm_s Fv_s ntm_s
18 nt_s rho_i Fm_i Fv_i ntm_i nt_i Fm Fv nt
19 lambda_h2s lambda_nh3 lambda_ch4
20 lambda_co2 lambda_h2o lambda_cl
21 lambda_f gx h_liq cp Ccrit_h2s Ccrit_nh3
22 Ccrit_ch4 Ccrit_co2 Ccrit_h2o Ccrit_cl
23 Ccrit_f z_columna xi1 xi2 xi3 xi4 xi5 xi6
24 xi7 xi8 xi9 xi10 xi11 xi12 xi13 xi14 xi15
25 xi16 xi17 xi18 xi19 xi20 xi21 xi22 xi23 xi24
26 xi25 z x_max x_export Cinter_cl Cinter_f
27 Dcl Df rp a;
28 %%Devuelve matriz de concentraciones
29 y temperaturas en el espacio, a partir de
30 la resolucion de EDOs para la digestion
31 anaerobica
32
33 %%PROPORCION CINETICA
34 aa_gluc=0.722;

```

```

684 y_cl_gas=ycl_gas
685 display('-----');
686 Masa_digestato_kg_d=Fm_digestato*36
687 00*24
688 Masa_gas_kg_d=Fm_gas*3600*24
689 Masa_alimentacion_kg_d=0.6
690 Error_relativo_BM_Entrada_Salida=abs(
691 Masa_alimentacion_kg_d-
692 Masa_gas_kg_d-
693 Masa_digestato_kg_d)/Masa_alimentac
694 ion_kg_d
695 diary off;

```

```

35 acgraso_gluc=0.444;
36
37 %%CONSTANTES
38 %Constantes por ajustar: Primero se
39 exportan los parametros, para que esten
40 disponibles como variables globales para
41 la funcion derivada. La rutina de
42 optimizacion no permite que las
43 variables de optimizacion p(i) sean
44 variables globales.
45 k1=p(1);
46 k2=0.5*p(1)*(1+p(2));
47 k3=aa_gluc*k1*(1+p(3));
48 k4=aa_gluc*k2*(1+p(3));
49 k5=acgraso_gluc*k2*(1+p(4));
50
51 %Constantes fisicas del reactor
52 R=0.075; % radio del lecho [m] EDITABLE
53 VARIAR
54 alfa_grad=45; %grado de apertura del
55 lecho [grados] EDITABLE
56 alfa_rad=alfa_grad*2*pi/360; %grado
57 de apertura de lecho [radianes]
58 L=2*sin(alfa_rad/2)*R; %ancho del lecho
59 [m].
60 H=R*(1+cos(alfa_rad/2)); %altura del
61 lecho [m].
62 S=(2*pi-
63 alfa_rad)*R^2/2+L/2*cos(alfa_rad/2)*R;
64 %area transversal del lecho [m^2].
65 P_atm=1; %presion del gas en atm [atm]
66 EDITABLE
67 P_pa=P_atm*101325; %presion del gas
68 en Pa [Pa]

```

69	R_l=0.08205746; %constante gases	117	nt=nt_s+nt_i; %numero total de moles
70	ideales en litros [l-atm/(mol·K)]	118	que entran al reactor [mol/s].
71	R_m3=8.315684; %constante gases	119	
72	ideales en m ³ [m ³ ·Pa/(mol·K)]	120	%Constantes alimentacion: Energia
73		121	lambda_h2s=18600;%calor latente de
74	%Constantes alimentacion: Sustrato	122	cambio de fase del H2S [J/mol].
75	rho_s=590; %densidad aparente [kg	123	lambda_nh3=22700;%calor latente de
76	sustrato/m ³ sustrato].	124	cambio de fase del NH3 [J/mol].
77	Fm_s=0.6/24/60/60; % flujo masico [kg	125	lambda_ch4=8600;%calor latente de
78	sustrato/s]. EDITABLE	126	cambio de fase del CH4 [J/mol].
79	Fv_s=Fm_s/rho_s;% flujo volumetrico	127	lambda_co2=25256;%calor latente de
80	[m ³ sustrato/s].	128	cambio de fase del CO2 [J/mol].
81	nt_s=ntm_s*Fm_s;%numero total de	129	lambda_h2o=40626;%calor latente de
82	moles que entran por unidad de tiempo	130	cambio de fase del H2O [J/mol].
83	al reactor(fase sol-liq). Se asumira	131	lambda_cl=10388;%calor latente de
84	constante para el balance de energia	132	cambio de fase del Cl [J/mol].
85	[mol sustrato/s].	133	lambda_f=5567;%calor latente de
86	rp=2e-3; %radio de particula [m].	134	cambio de fase del F [J/mol].
87	a_kg=18000; %area BET de los residuos	135	gx=757.1;%generacion de calor
88	[m ² /kg]	136	especifica de los MO [J/(mol·s)].
89	a=a_kg*rho_s; %area especifica de los	137	h_liq=4.54;%coef. global de
90	residuos [m ² /m ³ residuos]	138	transferencia de calor en el liquido
91	VS_S=(C_celulosa*32.4+C_proteina*17.	139	[W/(m ² ·K)]
92	9+C_acgraso*0.256)*Fv_s;%kg/s de VS	140	cp=75.348;%Calor especifico del agua
93	en el sustrato.	141	[J/mol·K)]
94		142	
95	%Constantes alimentacion: Inoculo	143	%Constantes evaporacion:
96	rho_i=Hh2o_final*1000+(1-	144	Concentraciones limite de diferentes
97	Hh2o_final)*590; %densidad	145	componentes en la fase liquida. Sobre
98	(sup:agua)[kg inoculo/m ³ inoculo].	146	este valor (semejante a la solubilidad)
99	Fm_i=rho_i*Fv_i; %Fm_i es flujo masico	147	cada molecula saldra a la fase gas en la
100	[kg reciclado/s]. EDITABLE	148	misma tasa en que se genere. Usaremos
101	ntm_i=Hh2o_final/0.018+(1-	149	datos de solubilidad a 40°C
102	Hh2o_final)/PM_salida; %numero de	150	Ccrit_h2s=70.59; %Concentracion limite
103	moles por unidad de masa que entra al	151	de H2S en el liquido [mol/m ³]
104	reactor [mol inoculo/kg inoculo].	152	Ccrit_nh3=18823.53; %Concentracion
105	EDITABLE	153	limite de NH3 en el liquido [mol/m ³]
106	nt_i=ntm_i*Fm_i;%numero total de	154	Ccrit_ch4=0; %Ccrit_ch4=1.00;
107	moles que entran por unidad de tiempo	155	%Concentracion limite de CH4 en el
108	al reactor(fase sol-liq). Se asumira	156	liquido [mol/m ³]
109	constante para el balance de energia	157	Ccrit_co2=22.73; %Concentracion limite
110	[mol inoculo/s].	158	de CO2 en el liquido [mol/m ³]
111		159	Ccrit_h2o=55555.56; %Concentracion
112	%Constantes alimentacion	160	limite de H2O en el liquido [mol/m ³]
113	Fm=Fm_s+Fm_i; %flujo masico total que	161	Ccrit_cl=259.50; %Concentracion limite
114	entra al reactor [kg/s].	162	de Cl en el liquido [mol/m ³]
115	Fv=Fv_s+Fv_i; %flujo volumetrico total	163	Ccrit_f=484.25; %Concentracion limite
116	que entra al reactor [m ³ /s].	164	de F en el liquido [mol/m ³]
		165	

```

166 %Otros
167 Cinter_cl=0; %[mol/m3]
168 Dcl=2.23e-9;%Difusividad del cl [m²/s]
169
170 %%RESOLUCION
171 z_columna=(t*(24*60*60))*Fv/S;%[m];
172 %cambio de variables tiempo a distancia
173 de reactor (largo). z_columna es un
174 vector columna en [m].
175
176 %CB para el primer z. Evaluaremos cada
177 x(i). %VER EXCEL,EXPERIMENTOS
178 (alimentacion).
179 xi1=(C_celulosa*Fv_s)/Fv; %valor inicial
180 de la concentracion de celulosa
181 [mol/m³]. EDITABLE
182 xi2=0; %valor inicial de la concentracion
183 de glucosa [mol/m³].
184 xi3=(C_proteina*Fv_s)/Fv; %valor inicial
185 de la concentracion de proteina
186 [mol/m³]. EDITABLE
187 xi4=0; %valor inicial de la concentracion
188 de amino acidos [mol/m³].
189 xi5=0; %valor inicial de la concentracion
190 de H2S [mol/m³].
191 xi6=(C_acgraso*Fv_s)/Fv; %valor inicial
192 de la concentracion de acidos grasos
193 [mol/m³]. EDITABLE
194 xi7=(0*Fv_i)/Fv; %valor inicial de la
195 concentracion de los MO [mol/m³].
196 xi8=0; %valor inicial de la concentracion
197 de NH3 [mol/m³].
198 xi9=0; %valor inicial de la concentracion
199 de CH4 [mol/m³].
200 xi10=0; %valor inicial de la concentracion
201 de CO2 [mol/m³].
202 xi11=(C_agua*Fv_s+Hh2o_final*Fm_i/0.
203 018)/Fv; %valor inicial de la
204 concentracion de H2O [mol/m³].
205 xi12=(C_cloro*Fv_s)/Fv; %valor inicial de
206 la concentracion de Cl total [mol/m³].
207 xi13=0; %valor inicial de la concentracion
208 de F total [mol/m³].
209 xi14=36+273.15; %valor inicial de la
210 temperatura [K].
211 xi15=0; %valor inicial del flujo molar de
212 H2S en fase gas [mol/s].
213 xi16=0; %valor inicial del flujo molar de
214 NH3 en fase gas [mol/s].
215 xi17=0; %valor inicial del flujo molar de
216 CH4 en fase gas [mol/s].
217 xi18=0; %valor inicial del flujo molar de
218 CO2 en fase gas [mol/s].
219 xi19=0; %valor inicial del flujo molar de
220 H2O en fase gas [mol/s].
221 xi20=0; %valor inicial del flujo molar de
222 Cl en fase gas [mol/s].
223 xi21=0; %valor inicial del flujo molar de F
224 en fase gas [mol/s].
225 xi22=0; %valor inicial del flujo molar total
226 en fase gas [mol/s].
227 xi23=0;%valor inicial de la concentracion
228 de glucosa no degradable [mol/m³].
229 xi24=0;%valor inicial de la concentracion
230 de aa no degradable [mol/m³].
231 xi25=0;%valor inicial de la concentracion
232 de acgraso no degradable [mol/m³].
233 xi26=(1-
234 Hh2o_final)*Fm_i*(1/PM_salida)/Fv;%
235 valor inicial de concentracion de especie
236 'inerte organico' que entra con el reciclo
237 [mol/m³]
238
239 %Solucion
240 lsode_options('absolute tolerance',1e-
241 2);
242 %lsode_options('integration
243 method','stiff');
244 %Matriz para espacio en z
245 z=z_columna;%en [m] un vector fila,
246 para ser compatible con lsode.
247 %valor de las concentraciones en z
248
249 x_max=[xi1;xi1;xi3;xi3;xi3;xi6;xi7;xi1;xi1;
250 xi1;xi11;xi12;xi12;xi14;1;1;1;1;1;1;1;
251 1;1;1]; %valores maximos permitidos
252 lsode_options ("integration
253 method","stiff");
254 %lsode_options ("initial step size",1e-
255 3);
256
257 x_modelo=lsode('biogas_reciclo_dCdz',[
258 xi1;xi2;xi3;xi4;xi5;xi6;xi7;xi8;xi9;xi10;xi1
259 1;xi12;xi13;xi14;xi15;xi16;xi17;xi18;xi19;
260 xi20;xi21;xi22;xi23;xi24;xi25;xi26],z);
261 %resolver
262

```

```

263 %Ajustar concentraciones de salida de
264 salida de H2S y NH3. Salen en equilibrio
265 de Henry.
266 Ntgas=x_modelo(length(z),22); %flujo
267 molar de gas final (mol/s)
268 H_h2s=1e-3;%Constante de Henry para
269 el H2S [mol/(m^3 Pa)].
270 Nh2sliq_ode=x_modelo(length(z),5)*Fv;
271 %flujo molar en fase liq. de h2s que sale
272 de los calculos [mol/s]
273 Ch2sliq_real=Nh2sliq_ode/(Fv+(Ntgas/(
274 P_pa*H_h2s))); %flujo molar en fase liq.
275 de h2s ajustado [mol/s]
276 Nh2sliq_real=Ch2sliq_real*Fv; %flujo
277 molar real de h2s en el liq (mol/s)
278 Nh2sgas_real=Nh2sliq_ode-
279 Nh2sliq_real; %flujo molar en fase gas de
280 h2s ajustado [mol/s]
281 x_modelo(length(z),5)=Ch2sliq_real;
282 %reescribir concentracion en liq.
283 x_modelo(length(z),15)=Nh2sgas_real;
284 %reescribir fase gas.
285
286 H_nh3=5.9e-1;%Constante de Henry
287 para el NH3[mol/(m^3 Pa)].
288 Nnh3liq_ode=x_modelo(length(z),8)*Fv;
289 %flujo molar en fase liq. de nh3 que sale
290 de los calculos [mol/s]
291 Cnh3liq_real=Nnh3liq_ode/(Fv+(Ntgas/(
292 P_pa*H_nh3))); %flujo molar en fase liq.
293 de nh3 ajustado [mol/s]
294 Nnh3liq_real=Cnh3liq_real*Fv; %flujo
295 molar real de nh3 en el liq (mol/s)
296 Nnh3gas_real=Nnh3liq_ode-
297 Nnh3liq_real; %flujo molar en fase gas de
298 nh3 ajustado [mol/s]
299 x_modelo(length(z),8)=Cnh3liq_real;
300 %reescribir concentracion en liq.
301 x_modelo(length(z),16)=Nnh3gas_real;
302 %reescribir fase gas.
303
304 %Arreglar Nt gas:
305 x_modelo(length(z),22)=x_modelo(lengt
306 h(z),15)+x_modelo(length(z),16)+x_mod
307 elo(length(z),17)+x_modelo(length(z),18
308 )+x_modelo(length(z),19)+x_modelo(len
309 gth(z),20)+x_modelo(length(z),21);
310 Ntgas=x_modelo(length(z),22); %flujo
311 molar de gas final (mol/s)
312
313 %Solucion concentracion en liquido
314 Cliq(:,1:13)=x_modelo(:,1:13);
315 %corregir los valores de concentracion
316 de glucosa, aminoacido y acido graso.
317 Cliq(:,2)=x_modelo(:,2)+x_modelo(:,23);
318 %concentracion de glucosa degradable +
319 no degradable.
320 Cliq(:,4)=x_modelo(:,4)+x_modelo(:,24);
321 %concentracion de aminoacido
322 degradable + no degradable.
323 Cliq(:,6)=x_modelo(:,6)+x_modelo(:,25);
324 %concentracion de acido graso
325 degradable + no degradable.
326 Cliq(:,14)=x_modelo(:,26); %inerte
327 organico del reciclo.
328
329 %Cliq(:,1) es la concentracion de celulosa
330 en el liquido, para cada z [mol/m^3].
331 %Cliq(:,2) es la concentracion de glucosa
332 en el liquido, para cada z [mol/m^3].
333 %Cliq(:,3) es la concentracion de
334 proteina en el liquido, para cada z
335 [mol/m^3].
336 %Cliq(:,4) es la concentracion de amino
337 acidos en el liquido, para cada z
338 [mol/m^3].
339 %Cliq(:,5) es la concentracion de H2S en
340 el liquido, para cada z [mol/m^3].
341 %Cliq(:,6) es la concentracion de acidos
342 grasos en el liquido, para cada z
343 [mol/m^3].
344 %Cliq(:,7) es la concentracion de MO en
345 el liquido, para cada z [mol/m^3].
346 %Cliq(:,8) es la concentracion de NH3 en
347 el liquido, para cada z [mol/m^3].
348 %Cliq(:,9) es la concentracion de CH4 en
349 el liquido, para cada z [mol/m^3].
350 %Cliq(:,10) es la concentracion de CO2
351 en el liquido, para cada z [mol/m^3].
352 %Cliq(:,11) es la concentracion de H2O
353 en el liquido, para cada z [mol/m^3].
354 %Cliq(:,12) es la concentracion de Cl total
355 en el liquido, para cada z [mol/m^3].
356 %Cliq(:,13) es la concentracion de F total
357 en el liquido, para cada z [mol/m^3].
358 %Cliq(:,14) es la concentracion de inerte
359 organico del reciclo, para cada z
360 [mol/m^3].

```



```

361
362 %Solucion T liquido
363 Tliq=x_modelo(:,14); %es la temperatura
364 del líquido para cada z en [K].
365
366 %Solucion T gas
367 Tgas=zeros(length(z),1);
368 for j=1:length(z)
369     Tpromedio=0;
370     puntos_recorridos=0;
371     for i=1:j
372
373         puntos_recorridos=puntos_recorridos+1
374         ;
375
376         Tpromedio=(Tpromedio*(puntos_recorr
377 idos-1)+Tliq(i))/puntos_recorridos;
378         end
379         Tgas(j)=Tpromedio; %es la
380 temperatura de todo el gas para
381 diferentes largos totales de reactor. La
382 temperatura es homogénea dentro del
383 reactor. Si el largo del reactor es z3,
384 entonces la temperatura del gas es
385 Tgas(length(z3)). En [K].
386     end
387
388 %Solucion concentraciones en gas
389 Fv_g=x_modelo(:,22).*Tgas(:)*R_m3/P_
390 pa; %Flujo volumetrico de gas generado
391 para diferentes largos totales del reactor
392 en [m³ gas/s]. Misma logica que para
393 Tgas.
394 Cgas=x_modelo(:,15:21)./Fv_g(:);
395 %Concentración a partir de los moles
396 generados por unidad de tiempo y flujo
397 de gas generado por unidad de tiempo.
398 %Cgas(:,1) es la concentracion de H2S en
399 todo el gas, para diferentes largos del
400 reactor [mol/m³ gas]. Misma logica que
401 para Tgas.
402 %Cgas(:,2) es la concentracion de NH3 en
403 el gas, para diferentes largos del reactor
404 [mol/m³ gas]. Misma logica que para
405 Tgas.
406 %Cgas(:,3) es la concentracion de CH4 en
407 el gas, para diferentes largos del reactor
408 [mol/m³ gas]. Misma logica que para
409 Tgas.
410
411 %Cgas(:,4) es la concentracion de CO2 en
412 el gas, para diferentes largos del reactor
413 [mol/m³ gas]. Misma logica que para
414 Tgas.
415 %Cgas(:,5) es la concentracion de H2O en
416 el gas, para diferentes largos del reactor
417 [mol/m³ gas]. Misma logica que para
418 Tgas.
419 %Cgas(:,6) es la concentracion de Cl total
420 en el gas, para diferentes largos del
421 reactor [mol/m³ gas]. Misma logica que
422 para Tgas.
423 %Cgas(:,7) es la concentracion de F total
424 en el gas, para diferentes largos del
425 reactor [mol/m³ gas]. Misma logica que
426 para Tgas.
427
428 %Solucion humedad
429 Pmlq=[32.4 0.180 17.9 0.367 0.034
430 0.256 0.113 0.017 0.016 0.044 0.018
431 35.453 19 PM_salida]; %Pesos
432 moleculares de las moleculas
433 liquidas[kg/mol].
434 Pmlq_hum(1:11)=Pmlq(1:11);
435 Pmlq_hum(12)=Pmlq(14);
436 Cliq_hum(:,1:11)=Cliq(:,1:11);
437 Cliq_hum(:,12)=Cliq(:,14);
438 Mliq_hum=Cliq_hum.*Pmlq_hum*Fv;
439 %Flujo masico de las moleculas en cada z
440 [kg/s].
441 SMLiq_hum=sum(Mliq_hum,2); %Suma
442 de los flujos masicos de todas las
443 moleculas en cada z [kg/s].
444 Humedad=Mliq_hum(:,11)./SMLiq_hum;
445 %Fraccion de agua total en cada z [].
446 %Cliq(:,1) es la concentracion de celulosa
447 en el liquido, para cada z [mol/m³].
448 %Cliq(:,2) es la concentracion de glucosa
449 en el liquido, para cada z [mol/m³].
450 %Cliq(:,3) es la concentracion de
451 proteina en el liquido, para cada z
452 [mol/m³].
453 %Cliq(:,4) es la concentracion de amino
454 acidos en el liquido, para cada z
455 [mol/m³].
456 %Cliq(:,5) es la concentracion de H2S en
457 el liquido, para cada z [mol/m³].

```

```

457 %Cliq(:,6) es la concentracion de acidos
458 grasos en el liquido, para cada z
459 [mol/m³].
460 %Cliq(:,7) es la concentracion de MO en
461 el liquido, para cada z [mol/m³].
462 %Cliq(:,8) es la concentracion de NH3 en
463 el liquido, para cada z [mol/m³].
464 %Cliq(:,9) es la concentracion de CH4 en
465 el liquido, para cada z [mol/m³].
466 %Cliq(:,10) es la concentracion de CO2
467 en el liquido, para cada z [mol/m³].
468 %Cliq(:,11) es la concentracion de H2O
469 en el liquido, para cada z [mol/m³].
470 %Cliq(:,12) es la concentracion de Cl total
471 en el liquido, para cada z [mol/m³].
472 %Cliq(:,13) es la concentracion de F total
473 en el liquido, para cada z [mol/m³].
474 %Cliq(:,14) es la concentracion de
475 inerte organico del reciclo, para cada z
476 [mol/m³].
477
478 %Proporcion C:N
479 C_especie=[200*6 6 13*50 13 16 0];
480 %numero de moles de C por mol de
481 especie.
482 N_especie=[0 0 50*3 3 0 1]; %numero de
483 moles de N por mol de especie.
484 Nliq(:,1:4)=x_modelo(:,1:4)*Fv; %Flujo
485 molar de las moleculas degradables en
486 cada z [mol/s]. Celulosa, Glucosa,
487 Proteina, Aminoacido
488 Nliq(:,5)=x_modelo(:,6)*Fv; %Flujo
489 molar de las moleculas degradables en
490 cada z [mol/s]. AcGraso
491 Nliq(:,6)=x_modelo(:,8)*Fv; %Flujo
492 molar de las moleculas degradables en
493 cada z [mol/s]. NH3
494 NC=sum(Nliq.*C_especie,2); %flujo
495 molar de C para cada largo de reactor
496 [mol/s]
497 NN=sum(Nliq.*N_especie,2); %flujo
498 molar de N para cada largo de reactor
499 [mol/s]
500 CN=(NC*12)/(NN*14); %proporcion C:N
501 para cada posicion del reactor
502
503 %Calculo de composicion de salida sin
504 agua
505 %Concentraciones totales en el liquido.
506
507 Cliq_sinagua(:,1:10)=Cliq(:,1:10);
508 Cliq_sinagua(:,11:13)=Cliq(:,12:14);
509 PMLiq_sinagua=[32.4 0.180 17.9 0.367
510 0.034 0.256 0.113 0.017 0.016 0.044
511 35.453 19 PM_salida]; %Pesos
512 moleculares de las moleculas
513 liquidas[kg/mol].
514 Nliq_sinagua=Cliq_sinagua.*PMLiq_sina
515 gua*Fv;
516
517 %Composiciones molares.
518 C_especie_sinagua=[200*6 6 13*50 13
519 16 2 5 0 0 1 0 0 C_salida]; %numero de
520 moles de C por mol de especie.
521 N_especie_sinagua=[0 0 50*3 3 0 0 1 1 0
522 0 0 0 N_salida]; %numero de moles de N
523 por mol de especie.
524 H_especie_sinagua=[200*10 12 50*32
525 25 32 6 7 3 0 0 0 0 H_salida]; %numero
526 de moles de H por mol de especie.
527 O_especie_sinagua=[200*5 6 50*6 7 2 0
528 2 0 2 2 0 0 O_salida]; %numero de moles
529 de O por mol de especie.
530 NC=sum(Nliq_sinagua.*C_especie_sina
531 ua,2); %flujo molar de C para cada largo
532 de reactor [mol/s]
533 NN=sum(Nliq_sinagua.*N_especie_sina
534 gua,2); %flujo molar de N para cada largo
535 de reactor [mol/s]
536 NH=sum(Nliq_sinagua.*H_especie_sina
537 gua,2); %flujo molar de N para cada largo
538 de reactor [mol/s]
539 NO=sum(Nliq_sinagua.*O_especie_sina
540 gua,2); %flujo molar de N para cada largo
541 de reactor [mol/s]
542
543 %Proporcion de materia org. de salida.
544 Hh2o_final=Humedad(length(z)); %H2O
545 C_salida=NC(length(t))/NN(length(t));
546 H_salida=NH(length(t))/NN(length(t));
547 O_salida=NO(length(t))/NN(length(t));
548 N_salida=1;
549 PM_salida=(C_salida*12+H_salida*1+O_
550 salida*16+N_salida*14)/1000; %kg/mol
551
552 %Masa inerte organico en el reciclo
553 VS_reciclo=(1-Hh2o_final)*Fm_i;
554
555 %Agua extra requerida

```

```

555     Eh2o=max(0,-(Humedad-
556     0.55).*SMliq_hum); %kg/s
557     j=0;
558     for i=2:length(Eh2o);
559         if      (Eh2o(i-1)<=0      &&
560         Eh2o(i)>=0) || (Eh2o(i-1)>=0      &&
561         Eh2o(i)<=0);
562             j=j+1;
563             Rh2o(j,1)=i;
564         end
565     end
566
567     %H2S salida gas
568     Fv_g_final=Fv_g(length(z));
569     Nh2s_salida=x_modelo(length(z),15);
570     %flujo de h2s en la salida [mol/s]
571     Ngas_salida=x_modelo(length(z),22);
572     %flujo molar de salida gaseosa [mol/s]
573     yh2s_gas=Nh2s_salida/Ngas_salida;
574     %fraccion molar de h2s en la salida
575     gaseosa []
576     P_h2s=P_atm*(yh2s_gas);%Presion
577     parcial de h2s en la salida gaseosa [atm]
578
579     %H2S salida liq
580     Nh2s_liq=x_modelo(length(z),5)*Fv;
581     %flujo molar de h2s en la salida del
582     reactor [mol/s]
583     Nt_liq=sum(Cliq*Fv,2); %Flujo Molar
584     total en fase liquida en todo el reactor
585     [mol/s]
586     Nt_liq_salida=Nt_liq(length(z)); %flujo
587     molar total en la salida liquida [mol/s]
588     yh2s_liq=Nh2s_liq/Nt_liq_salida;%Fracci
589     on molar de h2s en la salida liquida.
590
591     %NH3 salida gas
592     Nnh3_salida=x_modelo(length(z),16);
593     %flujo de nh3 en la salida [mol/s]
594     ynh3_gas=Nnh3_salida/Ngas_salida;
595     %fraccion molar de nh3 en la salida
596     gaseosa []
597     P_nh3=P_atm*(ynh3_gas);%Presion
598     parcial de h2s en la salida gaseosa [atm]
599     %NH3 salida liq
600     Nnh3_liq=x_modelo(length(z),8)*Fv;
601     %flujo molar de h2s en la salida del
602     reactor [mol/s]
603     ynh3_liq=Nnh3_liq/Nt_liq_salida;%Fracc
604     ion molar de h2s en la salida liquida.
605
606     %CH4 salida gas
607     Nch4_salida=x_modelo(length(z),17);
608     %flujo de CH4 en la salida [mol/s]
609     ych4_gas=Nch4_salida/Ngas_salida;
610     %fraccion molar de CH4 en la salida
611     gaseosa []
612     P_ch4=P_atm*(ych4_gas);%Presion
613     parcial de h2s en la salida gaseosa [atm]
614
615     %CO2 salida gas
616     Nco2_salida=x_modelo(length(z),18);
617     %flujo de CO2 en la salida [mol/s]
618     yco2_gas=Nco2_salida/Ngas_salida;
619     %fraccion molar de CO2 en la salida
620     gaseosa []
621     P_co2=P_atm*(yco2_gas);%Presion
622     parcial de h2s en la salida gaseosa [atm]
623
624     %H2O salida gas
625     Nh2o_salida=x_modelo(length(z),19);
626     %flujo de H2O en la salida [mol/s]
627     yh2o_gas=Nch4_salida/Ngas_salida;
628     %fraccion molar de H2O en la salida
629     gaseosa []
630     P_h2o=P_atm*(yh2o_gas);%Presion
631     parcial de H2O en la salida gaseosa [atm]
632
633     %F salida gas
634     Nf_salida=x_modelo(length(z),20);
635     %flujo de F en la salida [mol/s]
636     yf_gas=Nf_salida/Ngas_salida;%fraccion
637     molar de F en la salida gaseosa []
638     P_f=P_atm*(yf_gas);%Presion parcial de
639     F en la salida gaseosa [atm]
640
641     %Cl salida gas
642     Ncl_salida=x_modelo(length(z),21);
643     %flujo de Cl en la salida [mol/s]
644     ycl_gas=Ncl_salida/Ngas_salida;
645     %fraccion molar de Cl en la salida
646     gaseosa []
647     P_cl=P_atm*(ycl_gas);%Presion parcial
648     de Cl en la salida gaseosa [atm]
649
650     % Verificación BM. Calculo de Flujo
651     masico en el digestato de salida.

```

652	Fm_digestato=SMliq_hum(length(z))-	658	a*0.044+Nh2o_salida*0.018+Ncl_salida
653	Fm_i; %Flujo masico de digestato de	659	*0.035453+Nf_salida*0.018998403;
654	salida. Es la resta entre el Fm que sale del	660	%Flujo masico de gases de salida. [kg/s]
655	reactor y el que es reciclado. [kg/s]	661	en
656	Fm_gas=Nh2s_salida*0.034+Nnh3_salid		
657	a*0.017+Nch4_salida*0.016+Nco2_salid		

Anexo O CÁLCULOS: DIMENSIONAMIENTO ADSORCIÓN

Los cálculos y resultados del dimensionamiento del equipo de adsorción se encuentran en: <https://goo.gl/PYf2xR> pestaña *Adsorción*.

Anexo P CÁLCULOS: DIMENSIONAMIENTO ALMACENAMIENTO DE BIOGÁS

Los cálculos y resultados del dimensionamiento del equipo de adsorción se encuentran en: <https://goo.gl/PYf2xR> pestaña *Almacenamiento biogás*.

Anexo Q CÁLCULOS: DIMENSIONAMIENTO ALMACENAMIENTO DIGESTATO

Los cálculos y resultados del dimensionamiento del equipo de adsorción se encuentran en: <https://goo.gl/PYf2xR> pestaña *Almacenamiento digestato*.

Anexo R CÁLCULOS DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL BIOGÁS GENERADO

Los cálculos y resultados de las características del biogás generado, esto es, su flujo, composición, poder calorífico y tiempo de consumo, se encuentran en: <https://goo.gl/oy3N43> pestaña *Características*.

Anexo S CÓDIGO MODELO 2

S.1 BIOGAS_MAIN_MODELO_PRUEBASERROR.M

1	%%Este archivo permite calcular	4	%%Simular luego de biogas_main_exp
2	evolución de concentracion de	5	clc;
3	compuestos en el reactor de biogas.	6	clear all;

```

7
8 global ntm_s VS_S VS_reciclo tfinal2
9 factor_reduccion_casobase f_red
10 Nch4_max tfinal ynh3_liq ynh3_gas
11 P_nh3 Nnh3_salida yh2s_liq yh2s_gas
12 P_h2s Fv_g_final Ngas_salida
13 Nh2s_salida SMliq_hum Rh2o Eh2o
14 Hh2o_final C_salida H_salida O_salida
15 N_salida PM_salida CN x_modelo
16 Mliq_hum SMliq_hum Humedad D Fv_g
17 x_modelo k1 k2 k3 k4 k5 R alfa_grad
18 alfa_rad L H S P_atm P_pa R_l R_m3
19 rho_s Fm_s Fv_s ntm_s nt_s rho_i Fm_i
20 Fv_i ntm_i nt_i Fm Fv nt lambda_h2s
21 lambda_nh3 lambda_ch4 lambda_co2
22 lambda_h2o lambda_cl lambda_f gx
23 h_liq cp Ccrit_h2s Ccrit_nh3 Ccrit_ch4
24 Ccrit_co2 Ccrit_h2o Ccrit_cl Ccrit_f
25 z_columna xi1 xi2 xi3 xi4 xi5 xi6 xi7 xi8 xi9
26 xi10 xi11 xi12 xi13 xi14 xi15 xi16 xi17 xi18
27 xi19 xi20 xi21 xi22 xi23 xi24 xi25 z x_max
28 x_export Cinter_cl Cinter_f Dcl Df rp a;
29
30 %p se obtiene de main_modeloexp
31 p=[6.8506e-005; -5.1288e-001; 4.9879e-
32 001; -5.0000e-001];
33 tmax_exp=99.75171253;
34
35 %%Rutinas:
36 %Rutina 1: 5 y 6
37 %Rutina 2: 1, 2, 3, 2 y 4
38 %A=[5 6]
39 %A=[1 2 3 2 4]
40 A=[0]
41 f_red=1;
42 t=[0:0.1:6]';
43 ich4=0;
44 ifred=0;
45
46 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
47 Alim=16;
48 vol_max=30%l
49 nciclos=50;
50 diary Prueba_Alum16_85.txt
51 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
52
53 for iconf=1:length(A);
54 display('-----');
55 Configuracion=A(iconf)
56
57 if A(iconf)==1
58 f_red=1;
59 t=[0:0.1:99]';
60 %t=[0:0.1:tfinal]';
61
62 ich4=1;
63 ifred=1;
64
65 %f_red=f_red*factor_reduccion_casoba
66 se
67 elseif A(iconf)==2
68 f_red
69 t=[0:0.1:99]';
70 %t=[0:0.1:tfinal]';
71
72 ich4=1;
73 ifred=0;
74
75 %f_red=f_red*factor_reduccion_casoba
76 se
77 elseif A(iconf)==3
78 f_red
79 %f_red=1;
80 %t=[0:0.1:99]';
81 t=[0:0.1:tfinal]';
82 tfinal2=tfinal;
83
84 ich4=0;
85 ifred=1;
86
87 elseif A(iconf)==4
88 f_red
89 %f_red=1;
90 %t=[0:0.1:99]';
91 t=[0:0.1:tfinal2]';
92
93 ich4=0;
94 ifred=0;
95
96 %f_red=f_red*factor_reduccion_casoba
97 se;
98
99 elseif A(iconf)==5
100 f_red=1;
101 t=[0:0.1:99]';
102 %t=[0:0.1:tfinal]';
103
104 ich4=1;
105 ifred=0;

```

```

105
106 %f_red=f_red*factor_reduccion_casoba
107 se
108
109 elseif A(iconf)==6
110 f_red=1;
111 %t=[0:0.1:99]';
112 t=[0:0.1:tfinal]';
113
114 ich4=0;
115 ifred=0;
116
117 %f_red=f_red*factor_reduccion_casoba
118 se
119 end
120
121 %Alimentacion
122 if Alim==1
123 ntm_s=43.235; %numero de moles por
124 unidad de masa que entra al reactor [mol
125 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
126 C_celulosa=2.337; %valor inicial de la
127 concentracion de celulosa [mol/m³].
128 C_proteina=1.781;%valor inicial de la
129 concentracion de proteina [mol/m³].
130 C_acgraso=80.027; %valor inicial de la
131 concentracion de acidos grasos
132 [mol/m³].
133 C_agua=24996.333; %valor inicial de la
134 concentracion de H2O [mol/m³].
135 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
136 concentracion de Cl total [mol/m³].
137 prop_R_S=4; %proporcion masica de
138 reciclaje [kg VS reciclaje / kg VS sustrato]
139
140 elseif Alim==2
141 ntm_s=43.235; %numero de moles por
142 unidad de masa que entra al reactor [mol
143 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
144 C_celulosa=2.337; %valor inicial de la
145 concentracion de celulosa [mol/m³].
146 C_proteina=1.781;%valor inicial de la
147 concentracion de proteina [mol/m³].
148 C_acgraso=80.027; %valor inicial de la
149 concentracion de acidos grasos
150 [mol/m³].
151 C_agua=24996.333; %valor inicial de la
152 concentracion de H2O [mol/m³].
153
154 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
155 concentracion de Cl total [mol/m³].
156 prop_R_S=2; %proporcion masica de
157 reciclaje [kg VS reciclaje / kg VS sustrato]
158
159 elseif Alim==3
160 ntm_s=43.940; %numero de moles por
161 unidad de masa que entra al reactor [mol
162 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
163 C_celulosa=0; %valor inicial de la
164 concentracion de celulosa [mol/m³].
165 C_proteina=0;%valor inicial de la
166 concentracion de proteina [mol/m³].
167 C_acgraso=500.298; %valor inicial de la
168 concentracion de acidos grasos
169 [mol/m³].
170 C_agua=24996.333; %valor inicial de la
171 concentracion de H2O [mol/m³].
172 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
173 concentracion de Cl total [mol/m³].
174 prop_R_S=2; %proporcion masica de
175 reciclaje [kg VS reciclaje / kg VS sustrato]
176
177 elseif Alim==4
178 ntm_s=43.099; %numero de moles por
179 unidad de masa que entra al reactor [mol
180 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
181 C_celulosa=3.953; %valor inicial de la
182 concentracion de celulosa [mol/m³].
183 C_proteina=0;%valor inicial de la
184 concentracion de proteina [mol/m³].
185 C_acgraso=0; %valor inicial de la
186 concentracion de acidos grasos
187 [mol/m³].
188 C_agua=24996.333; %valor inicial de la
189 concentracion de H2O [mol/m³].
190 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
191 concentracion de Cl total [mol/m³].
192 prop_R_S=2; %proporcion masica de
193 reciclaje [kg VS reciclaje / kg VS sustrato]
194
195 elseif Alim==5
196 ntm_s=33.229; %numero de moles por
197 unidad de masa que entra al reactor [mol
198 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
199 C_celulosa=0; %valor inicial de la
200 concentracion de celulosa [mol/m³].
201 C_proteina=7.155;%valor inicial de la
202 concentracion de proteina [mol/m³].

```

202	C_acgraso=0; %valor inicial de la	249	ntm_s=32.202; %numero de moles por
203	concentracion de acidos grasos	250	unidad de masa que entra al reactor [mol
204	[mol/m ³].	251	sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
205	C_agua=24996.333; %valor inicial de la	252	C_celulosa=4.429; %valor inicial de la
206	concentracion de H2O [mol/m ³].	253	concentracion de celulosa [mol/m ³].
207	C_cloro=18.625; %valor inicial de la	254	C_proteina=3.376;%valor inicial de la
208	concentracion de Cl total [mol/m ³].	255	concentracion de proteina [mol/m ³].
209	prop_R_S=2; %proporcion masica de	256	C_acgraso=151.693; %valor inicial de la
210	reciclo [kg VS reciclo / kg VS sustrato]	257	concentracion de acidos grasos
211		258	[mol/m ³].
212	elseif Alim==6	259	C_agua=18027.778; %valor inicial de la
213	ntm_s=43.648; %numero de moles por	260	concentracion de H2O [mol/m ³].
214	unidad de masa que entra al reactor [mol	261	C_cloro=18.625; %valor inicial de la
215	sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE	262	concentracion de Cl total [mol/m ³].
216	C_celulosa=0; %valor inicial de la	263	prop_R_S=2; %proporcion masica de
217	concentracion de celulosa [mol/m ³].	264	reciclo [kg VS reciclo / kg VS sustrato]
218	C_proteina=1.41507;%valor inicial de la	265	
219	concentracion de proteina [mol/m ³].	266	elseif Alim==9
220	C_acgraso=406.833; %valor inicial de la	267	ntm_s=33.229; %numero de moles por
221	concentracion de acidos grasos	268	unidad de masa que entra al reactor [mol
222	[mol/m ³].	269	sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
223	C_agua=24911.111; %valor inicial de la	270	C_celulosa=0; %valor inicial de la
224	concentracion de H2O [mol/m ³].	271	concentracion de celulosa [mol/m ³].
225	C_cloro=18.625; %valor inicial de la	272	C_proteina=2.65326;%valor inicial de la
226	concentracion de Cl total [mol/m ³].	273	concentracion de proteina [mol/m ³].
227	prop_R_S=2; %proporcion masica de	274	C_acgraso=762.812; %valor inicial de la
228	reciclo [kg VS reciclo / kg VS sustrato]	275	concentracion de acidos grasos
229		276	[mol/m ³].
230	elseif Alim==7	277	C_agua=18027.778; %valor inicial de la
231	ntm_s=42.963; %numero de moles por	278	concentracion de H2O [mol/m ³].
232	unidad de masa que entra al reactor [mol	279	C_cloro=18.625; %valor inicial de la
233	sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE	280	concentracion de Cl total [mol/m ³].
234	C_celulosa=3.493; %valor inicial de la	281	prop_R_S=2; %proporcion masica de
235	concentracion de celulosa [mol/m ³].	282	reciclo [kg VS reciclo / kg VS sustrato]
236	C_proteina=0.91118;%valor inicial de la	283	
237	concentracion de proteina [mol/m ³].	284	elseif Alim==10
238	C_acgraso=0; %valor inicial de la	285	ntm_s=31.945; %numero de moles por
239	concentracion de acidos grasos	286	unidad de masa que entra al reactor [mol
240	[mol/m ³].	287	sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
241	C_agua=24911.111; %valor inicial de la	288	C_celulosa=6.549; %valor inicial de la
242	concentracion de H2O [mol/m ³].	289	concentracion de celulosa [mol/m ³].
243	C_cloro=18.625; %valor inicial de la	290	C_proteina=1.70847;%valor inicial de la
244	concentracion de Cl total [mol/m ³].	291	concentracion de proteina [mol/m ³].
245	prop_R_S=2; %proporcion masica de	292	C_acgraso=0; %valor inicial de la
246	reciclo [kg VS reciclo / kg VS sustrato]	293	concentracion de acidos grasos
247		294	[mol/m ³].
248	elseif Alim==8	295	C_agua=24911.111; %valor inicial de la
		296	concentracion de H2O [mol/m ³].

```

297 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
298 concentracion de Cl total [mol/m3].
299 prop_R_S=2; %proporcion masica de
300 recicló [kg VS recicló / kg VS sustrato]
301
302 elseif Alim==11
303 ntm_s=31.954; %numero de moles por
304 unidad de masa que entra al reactor [mol
305 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
306 C_celulosa=0; %valor inicial de la
307 concentracion de celulosa [mol/m3].
308 C_proteina=13.63;%valor inicial de la
309 concentracion de proteina [mol/m3].
310 C_acgraso=0; %valor inicial de la
311 concentracion de acidos grasos
312 [mol/m3].
313 C_agua=18027.778; %valor inicial de la
314 concentracion de H2O [mol/m3].
315 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
316 concentracion de Cl total [mol/m3].
317 prop_R_S=2; %proporcion masica de
318 recicló [kg VS recicló / kg VS sustrato]
319
320 elseif Alim==12
321 ntm_s=50.366; %numero de moles por
322 unidad de masa que entra al reactor [mol
323 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
324 C_celulosa=0.984; %valor inicial de la
325 concentracion de celulosa [mol/m3].
326 C_proteina=0.750;%valor inicial de la
327 concentracion de proteina [mol/m3].
328 C_acgraso=33.710; %valor inicial de la
329 concentracion de acidos grasos
330 [mol/m3].
331 C_agua=29500.000; %valor inicial de la
332 concentracion de H2O [mol/m3].
333 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
334 concentracion de Cl total [mol/m3].
335 prop_R_S=2; %proporcion masica de
336 recicló [kg VS recicló / kg VS sustrato]
337
338 elseif Alim==13
339 ntm_s=50.594; %numero de moles por
340 unidad de masa que entra al reactor [mol
341 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
342 C_celulosa=0; %valor inicial de la
343 concentracion de celulosa [mol/m3].
344 C_proteina=0.58961;%valor inicial de la
345 concentracion de proteina [mol/m3].
346
347 C_acgraso=169.514; %valor inicial de la
348 concentracion de acidos grasos
349 [mol/m3].
350 C_agua=29500.000; %valor inicial de la
351 concentracion de H2O [mol/m3].
352 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
353 concentracion de Cl total [mol/m3].
354 prop_R_S=2; %proporcion masica de
355 recicló [kg VS recicló / kg VS sustrato]
356
357 elseif Alim==14
358 ntm_s=50.309; %numero de moles por
359 unidad de masa que entra al reactor [mol
360 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
361 C_celulosa=1.455; %valor inicial de la
362 concentracion de celulosa [mol/m3].
363 C_proteina=0.37966;%valor inicial de la
364 concentracion de proteina [mol/m3].
365 C_acgraso=0.000; %valor inicial de la
366 concentracion de acidos grasos
367 [mol/m3].
368 C_agua=29500.000; %valor inicial de la
369 concentracion de H2O [mol/m3].
370 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
371 concentracion de Cl total [mol/m3].
372 prop_R_S=2; %proporcion masica de
373 recicló [kg VS recicló / kg VS sustrato]
374
375 elseif Alim==15
376 ntm_s=50.311; %numero de moles por
377 unidad de masa que entra al reactor [mol
378 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
379 C_celulosa=0; %valor inicial de la
380 concentracion de celulosa [mol/m3].
381 C_proteina=3.014;%valor inicial de la
382 concentracion de proteina [mol/m3].
383 C_acgraso=0.000; %valor inicial de la
384 concentracion de acidos grasos
385 [mol/m3].
386 C_agua=29500.000; %valor inicial de la
387 concentracion de H2O [mol/m3].
388 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
389 concentracion de Cl total [mol/m3].
390 prop_R_S=2; %proporcion masica de
391 recicló [kg VS recicló / kg VS sustrato]
392
393 elseif Alim==16

```



```

393 ntm_s=47.121; %numero de moles por 441 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
394 unidad de masa que entra al reactor [mol 442 concentracion de Cl total [mol/m³].
395 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE 443 prop_R_S=2; %proporcion masica de
396 C_celulosa=0; %valor inicial de la 444 recicló [kg VS recicló / kg VS sustrato]
397 concentracion de celulosa [mol/m³]. 445
398 C_proteina=1.00234;%valor inicial de la 446 elseif Alim==19
399 concentracion de proteina [mol/m³]. 447 ntm_s=48.113; %numero de moles por
400 C_acgraso=288.173; %valor inicial de la 448 unidad de masa que entra al reactor [mol
401 concentracion de acidos grasos 449 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
402 [mol/m³]. 450 C_celulosa=0; %valor inicial de la
403 C_agua=27205.556; %valor inicial de la 451 concentracion de celulosa [mol/m³].
404 concentracion de H2O [mol/m³]. 452 C_proteina=0.88442;%valor inicial de la
405 C_cloro=18.625; %valor inicial de la 453 concentracion de proteina [mol/m³].
406 concentracion de Cl total [mol/m³]. 454 C_acgraso=254.271; %valor inicial de la
407 prop_R_S=2; %proporcion masica de 455 concentracion de acidos grasos
408 recicló [kg VS recicló / kg VS sustrato] 456 [mol/m³].
409 457 C_agua=27861.111; %valor inicial de la
410 elseif Alim==17 458 concentracion de H2O [mol/m³].
411 ntm_s=38.190; %numero de moles por 459 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
412 unidad de masa que entra al reactor [mol 460 concentracion de Cl total [mol/m³].
413 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE 461 prop_R_S=2; %proporcion masica de
414 C_celulosa=0; %valor inicial de la 462 recicló [kg VS recicló / kg VS sustrato]
415 concentracion de celulosa [mol/m³]. 463
416 C_proteina=2.06365;%valor inicial de la 464 elseif Alim==20
417 concentracion de proteina [mol/m³]. 465 ntm_s=45.632; %numero de moles por
418 C_acgraso=593.298; %valor inicial de la 466 unidad de masa que entra al reactor [mol
419 concentracion de acidos grasos 467 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
420 [mol/m³]. 468 C_celulosa=0; %valor inicial de la
421 C_agua=21305.556; %valor inicial de la 469 concentracion de celulosa [mol/m³].
422 concentracion de H2O [mol/m³]. 470 C_proteina=1.17923;%valor inicial de la
423 C_cloro=18.625; %valor inicial de la 471 concentracion de proteina [mol/m³].
424 concentracion de Cl total [mol/m³]. 472 C_acgraso=339.028; %valor inicial de la
425 prop_R_S=2; %proporcion masica de 473 concentracion de acidos grasos
426 recicló [kg VS recicló / kg VS sustrato] 474 [mol/m³].
427 475 C_agua=26222.222; %valor inicial de la
428 elseif Alim==18 476 concentracion de H2O [mol/m³].
429 ntm_s=53.075; %numero de moles por 477 C_cloro=18.625; %valor inicial de la
430 unidad de masa que entra al reactor [mol 478 concentracion de Cl total [mol/m³].
431 sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE 479 prop_R_S=2; %proporcion masica de
432 C_celulosa=0; %valor inicial de la 480 recicló [kg VS recicló / kg VS sustrato]
433 concentracion de celulosa [mol/m³]. 481 end
434 C_proteina=0.29481;%valor inicial de la 482
435 concentracion de proteina [mol/m³]. 483 %Composicion del recicló
436 C_acgraso=84.757; %valor inicial de la 484 C_salida=10.869;
437 concentracion de acidos grasos 485 H_salida=21.214;
438 [mol/m³]. 486 O_salida= 9.1457;
439 C_agua=31138.889; %valor inicial de la 487 N_salida=1;
440 concentracion de H2O [mol/m³]. 488 Hh2o_final=0.90741;

```

```

489     PM_salida=(C_salida*12+H_salida*1+O_
490     salida*16+N_salida*14)/1000; %kg/mol
491
492     for i=1:nciclos
493     [z,Cliq,Tliq,Tgas,Cgas]=biogas_modelo_p
494     ruebaserror(t,p,prop_R_S,C_celulosa,C_
495     proteina,C_acgraso,C_agua,C_cloro);
496     end
497     clc
498     C_salida
499     H_salida
500     O_salida
501     N_salida
502     Hh2o_final
503     display('-----');
504
505     largo_m=z(length(z))
506     %Mostrar
507     v_ms=Fv/S%/m/s
508     largo_batch_1d_m=v_ms*3600*24 %m
509     Cch4_max=x_modelo(length(z),17)
510     %[mol/m3]
511     display('-----');
512     v_mm=v_ms*1000 %cm
513     largo_cm=largo_m*100 %cm
514     tau_d=largo_m/v_ms/3600/24 %d
515     tfinal=tau_d;
516     vol_l=S*largo_m*1000 %l
517     factor_reduccion_casobase=vol_max/vol
518     l_l %multiplicar por este valor el caso
519     base y recalculer para obtener un
520     volumen de 40 l
521     largo_batch_1d_cm=largo_batch_1d_m
522     *100 %cm
523     if ifred
524     %f_red=factor_reduccion_casobase;
525
526     f_red=f_red*factor_reduccion_casobase
527     ;
528     end
529     Caso_base_kgdia=Fm_s*3600*24
530     Reciclo_kgdia=Fm_i*3600*24
531     Relacion_reciclo_sustrato=Fm_i/Fm_s
532     Proporcion_SVreciclo_SVsustrato=VS_re
533     ciclo/VS_S %al menos debe ser 2
534
535     display('----gas----');
536     Fv_g_m3_s=Fv_g_final
537     Ngas_salida_mol_s=Ngas_salida
538     display('----h2s----');
539     Nh2s_gas_mol_s=Nh2s_salida
540     y_h2s_gas= yh2s_gas
541     %P_h2s_atm=P_h2s
542     Nh2s_liq_mol_s=x_modelo(length(z),5)*
543     Fv
544     y_h2s_liq=yh2s_liq
545     H_h2s_test=x_modelo(length(z),5)/yh2s
546     _gas/P_pa
547     display('----nh3----');
548     Nnh3_gas_mol_s=Nnh3_salida
549     y_nh3_gas= ynh3_gas
550     %P_nh3_atm=P_nh3
551     Nnh3_liq_mol_s=x_modelo(length(z),8)
552     *Fv
553     y_nh3_liq=ynh3_liq
554     H_nh3_test=x_modelo(length(z),8)/ynh
555     3_gas/P_pa
556     display('----h2o----');
557     Nh2o_gas_mol_s=x_modelo(length(z),1
558     9)
559     y_h2o_gas=Nh2o_gas_mol_s/Ngas_sali
560     da_mol_s
561     end
562     diary off;

```

S.2 BIOGAS_MODELO_PRUEBASERROR.M

```

1      function                                48      %Constantes fisicas del reactor
2      [z,Cliq,Tliq,Tgas,Cgas]=biogas_modelo_p 49      R=0.075; % radio del lecho [m] EDITABLE
3      ruebaserror(t,p,prop_R_S,C_celulosa,C_ 50      VARIAR
4      proteina,C_acgraso,C_agua,C_cloro);    51      alfa_grad=45; %grado de apertura del
5      global ntm_s VS_S VS_reciclo f_red tfinal 52      lecho [grados] EDITABLE
6      ynh3_liq ynh3_gas P_nh3 Nnh3_salida     53      alfa_rad=alfa_grad*2*pi/360; %grado
7      yh2s_liq yh2s_gas P_h2s Fv_g_final     54      de apertura de lecho [radianes]
8      Ngas_salida Nh2s_salida SMliq_hum      55      L=2*sin(alfa_rad/2)*R; %ancho del lecho
9      Rh2o Eh2o Hh2o_final C_salida H_salida 56      [m].
10     O_salida N_salida PM_salida CN         57      H=R*(1+cos(alfa_rad/2)); %altura del
11     x_modelo Mliq_hum SMliq_hum           58      lecho [m].
12     Humedad D Cinter Fv_g x_modelo k1 k2    59      S=(2*pi-
13     k3 k4 k5 R alfa_grad alfa_rad L H S P_atm 60      alfa_rad)*R^2/2+L*cos(alfa_rad/2)*R;
14     P_pa R_l R_m3 rho_s Fm_s Fv_s ntm_s     61      %area transversal del lecho [m^2].
15     nt_s rho_i Fm_i Fv_i ntm_i nt_i Fm Fv nt 62      P_atm=1; %presion del gas en atm [atm]
16     lambda_h2s lambda_nh3 lambda_ch4       63      EDITABLE
17     lambda_co2 lambda_h2o lambda_cl        64      P_pa=P_atm*101325; %presion del gas
18     lambda_f gx h_liq cp Ccrit_h2s Ccrit_nh3 65      en Pa [Pa]
19     Ccrit_ch4 Ccrit_co2 Ccrit_h2o Ccrit_cl 66      R_l=0.08205746; %constante gases
20     Ccrit_f z_columna xi1 xi2 xi3 xi4 xi5 xi6 67      ideales en litros [l-atm/(mol·K)]
21     xi7 xi8 xi9 xi10 xi11 xi12 xi13 xi14 xi15 68      R_m3=8.315684; %constante gases
22     xi16 xi17 xi18 xi19 xi20 xi21 xi22 xi23 xi24 69      ideales en m³ [m³·Pa/(mol·K)]
23     xi25 z x_max x_export Cinter_cl Cinter_f 70
24     Dcl Df rp a;                            71      %Constantes alimentacion: Sustrato
25     %%Devuelve matriz de concentraciones    72      rho_s=590; %densidad aparente [kg
26     y temperaturas en el espacio, a partir de 73      sustrato/m³ sustrato].
27     la esolucion de EDOs para la digestion 74      Fm_s=0.6/24/60/60; % flujo masico [kg
28     anaerobica                               75      sustrato/s]. EDITABLE
29                                             76      Fv_s=Fm_s/rho_s; %flujo volumetrico
30     %%PROPORCION CINETICA                    77      [m³ sustrato/s].
31     aa_gluc=0.722;                          78      %%%ntm_s=33.229; %numero de moles
32     acgraso_gluc=0.444;                    79      por unidad de masa que entra al reactor
33                                             80      [mol sustrato/kg de sustrato]. EDITABLE
34     %%CONSTANTES                            81      ntm_s=ntm_s*Fm_s;%numero total de
35     %Constantes por ajustar: Primero se     82      moles que entran por unidad de tiempo
36     exportan los parametros, para que esten 83      al reactor(fase sol-liq). Se asumira
37     disponibles como variables globales para 84      constante para el balance de energia
38     la funcion derivada. La rutina de      85      [mol sustrato/s].
39     optimizacion no permite que las        86      rp=2e-3; %radio de partícula [m].
40     variables de optimizacion p(i) sean    87      a_kg=18000; %area BET de los residuos
41     variables globales.                   88      [m²/kg]
42     k1=p(1);                               89      a=a_kg*rho_s; %area especifica de los
43     k2=0.5*p(1)*(1+p(2));                 90      residuos [m²/m³ residuos]
44     k3=aa_gluc*k1*(1+p(3));              91      VS_S=(C_celulosa*32.4+C_proteina*17.
45     k4=aa_gluc*k2*(1+p(3));              92      9+C_acgraso*0.256)*Fv_s;%kg/s de VS
46     k5=acgraso_gluc*k2*(1+p(4));         93      en el sustrato.
47                                             94

```

95	%Constantes alimentacion: Inoculo	143	cp=75.348;%Calor especifico del agua
96	rho_i=Hh2o_final*1000+(1-	144	[J/mol·K])
97	Hh2o_final)*590; %densidad	145	
98	(sup:agua)[kg inoculo/m ³ inoculo].	146	%Constantes evaporacion:
99	Fv_i=0.004/24/60/60 ; %flujo	147	Concentraciones limite de diferentes
100	volumetrico [m ³ inoculo /s].	148	componentes en la fase liquida. Sobre
101	Fm_i=Fv_i*rho_i;%prop_R_S*VS_S/(1-	149	este valor (semejante a la solubilidad)
102	Hh2o_final); %Fm_i es flujo masico [kg	150	cada molecula saldra a la fase gas en la
103	reciclo/s]. EDITABLE	151	misma tasa en que se genere. Usaremos
104	ntm_i=Hh2o_final/0.018+(1-	152	datos de solubilidad a 40°C
105	Hh2o_final)/PM_salida; %numero de	153	Ccrit_h2s=70.59; %Concentracion limite
106	moles por unidad de masa que entra al	154	de H2S en el liquido [mol/m ³]
107	reactor [mol inoculo/kg inoculo].	155	Ccrit_nh3=18823.53; %Concentracion
108	EDITABLE	156	limite de NH3 en el liquido [mol/m ³]
109	nt_i=ntm_i*Fm_i;%numero total de	157	Ccrit_ch4=0; %Ccrit_ch4=1.00;
110	moles que entran por unidad de tiempo	158	%Concentracion limite de CH4 en el
111	al reactor(fase sol-liq). Se asumira	159	liquido [mol/m ³]
112	constante para el balance de energia	160	Ccrit_co2=22.73; %Concentracion limite
113	[mol inoculo/s].	161	de H2S en el liquido [mol/m ³]
114		162	Ccrit_h2o=55555.56; %Concentracion
115	%Constantes alimentacion	163	limite de H2S en el liquido [mol/m ³]
116	Fm=Fm_s+Fm_i; %flujo masico total que	164	Ccrit_cl=259.50; %Concentracion limite
117	entra al reactor [kg/s].	165	de H2S en el liquido [mol/m ³]
118	Fv=Fv_s+Fv_i; %flujo volumetrico total	166	Ccrit_f=484.25; %Concentracion limite
119	que entra al reactor [m ³ /s].	167	de H2S en el liquido [mol/m ³]
120	nt=nt_s+nt_i; %numero total de moles	168	
121	que entran al reactor [mol/s].	169	%Otros
122		170	Cinter_cl=0; %[mol/m ³]
123	%Constantes alimentacion: Energia	171	Dcl=2.23e-9;%Difusividad del cl [m ² /s]
124	lambda_h2s=18600;%calor latente de	172	
125	cambio de fase del H2S [J/mol].	173	%%RESOLUCION
126	lambda_nh3=22700;%calor latente de	174	z_columna=(t*(24*60*60))*Fv/S;%[m];
127	cambio de fase del NH3 [J/mol].	175	%cambio de variables tiempo a distancia
128	lambda_ch4=8600;%calor latente de	176	de reactor (largo). z_columna es un
129	cambio de fase del CH4 [J/mol].	177	vector columna en [m].
130	lambda_co2=25256;%calor latente de	178	
131	cambio de fase del CO2 [J/mol].	179	%CB para el primer z. Evaluaremos cada
132	lambda_h2o=40626;%calor latente de	180	x(i). %VER EXCEL,EXPERIMENTOS
133	cambio de fase del H2O [J/mol].	181	(alimentacion).
134	lambda_cl=10388;%calor latente de	182	xi1=(C_celulosa*Fv_s)/Fv; %valor inicial
135	cambio de fase del Cl [J/mol].	183	de la concentracion de celulosa
136	lambda_f=5567;%calor latente de	184	[mol/m ³]. EDITABLE
137	cambio de fase del F [J/mol].	185	xi2=0; %valor inicial de la concentracion
138	gx=757.1;%generacion de calor	186	de glucosa [mol/m ³].
139	especifica de los MO [J/(mol·s)].	187	xi3=(C_proteina*Fv_s)/Fv; %valor inicial
140	h_liq=4.54;%coef. global de	188	de la concentracion de proteina
141	transferencia de calor en el liquido	189	[mol/m ³]. EDITABLE
142	[W/(m ² ·K)]	190	xi4=0; %valor inicial de la concentracion
		191	de amino acidos [mol/m ³].

```

192 xi5=0; %valor inicial de la concentracion
193 de H2S [mol/m3].
194 xi6=(C_acgraso*Fv_s)/Fv; %valor inicial
195 de la concentracion de acidos grasos
196 [mol/m3]. EDITABLE
197 xi7=(0*Fv_i)/Fv; %valor inicial de la
198 concentracion de los MO [mol/m3].
199 xi8=0; %valor inicial de la concentracion
200 de NH3 [mol/m3].
201 xi9=0; %valor inicial de la concentracion
202 de CH4 [mol/m3].
203 xi10=0; %valor inicial de la concentracion
204 de CO2 [mol/m3].
205 xi11=(C_agua*Fv_s+Hh2o_final*Fm_i/0.
206 018)/Fv; %valor inicial de la
207 concentracion de H2O [mol/m3].
208 xi12=(C_cloro*Fv_s)/Fv; %valor inicial de
209 la concentracion de Cl total [mol/m3].
210 xi13=0; %valor inicial de la concentracion
211 de F total [mol/m3].
212 xi14=36+273.15; %valor inicial de la
213 temperatura [K].
214 xi15=0; %valor inicial del flujo molar de
215 H2S en fase gas [mol/s].
216 xi16=0; %valor inicial del flujo molar de
217 NH3 en fase gas [mol/s].
218 xi17=0; %valor inicial del flujo molar de
219 CH4 en fase gas [mol/s].
220 xi18=0; %valor inicial del flujo molar de
221 CO2 en fase gas [mol/s].
222 xi19=0; %valor inicial del flujo molar de
223 H2O en fase gas [mol/s].
224 xi20=0; %valor inicial del flujo molar de
225 Cl en fase gas [mol/s].
226 xi21=0; %valor inicial del flujo molar de F
227 en fase gas [mol/s].
228 xi22=0; %valor inicial del flujo molar total
229 en fase gas [mol/s].
230 xi23=0;%valor inicial de la concentracion
231 de glucosa no degradable [mol/m3].
232 xi24=0;%valor inicial de la concentracion
233 de aa no degradable [mol/m3].
234 xi25=0;%valor inicial de la concentracion
235 de acgraso no degradable [mol/m3].
236 xi26=(1-
237 Hh2o_final)*Fm_i*(1/PM_salida)/Fv;%
238 valor inicial de concentracion de especie
239 'inerte organico' que entra con el recicl
240 [mol/m3].
241
242 %Solucion
243 lsode_options('absolute tolerance',1e-
244 2);
245 %lsode_options('integration
246 method','stiff');
247 %Matriz para espacio en z
248 z=z_columna;%en [m] un vector fila,
249 para ser compatible con lsode.
250 %valor de las concentraciones en z
251
252 x_max=[xi1;xi1;xi3;xi3;xi3;xi6;xi7;xi1;xi1;
253 xi1;xi11;xi12;xi12;xi14;1;1;1;1;1;1;1;
254 1;1;1]; %valores maximos permitidos
255 lsode_options ("integration
256 method","stiff");
257 %lsode_options ("initial step size",1e-
258 3);
259 x_modelo=lsode('biogas_reciclo_dCdz',[
260 xi1;xi2;xi3;xi4;xi5;xi6;xi7;xi8;xi9;xi10;xi1
261 1;xi12;xi13;xi14;xi15;xi16;xi17;xi18;xi19;
262 xi20;xi21;xi22;xi23;xi24;xi25;xi26],z);
263 %resolver
264
265 %Ajustar concentraciones de salida de
266 salida de H2S y NH3. Salen en equilibrio
267 de Henry.
268 Ntgas=x_modelo(length(z),22); %flujo
269 molar de gas final (mol/s)
270 H_h2s=1e-3;%Constante de Henry para
271 el H2S [mol/(m3 Pa)].
272 Nh2sliq_ode=x_modelo(length(z),5)*Fv;
273 %flujo molar en fase liq. de h2s que sale
274 de los calculos [mol/s]
275 Ch2sliq_real=Nh2sliq_ode/(Fv+(Ntgas/(
276 P_pa*H_h2s))); %flujo molar en fase liq.
277 de h2s ajustado [mol/s]
278 Nh2sliq_real=Ch2sliq_real*Fv; %flujo
279 molar real de h2s en el liq (mol/s)
280 Nh2sgas_real=Nh2sliq_ode-
281 Nh2sliq_real; %flujo molar en fase gas de
282 h2s ajustado [mol/s]
283 x_modelo(length(z),5)=Ch2sliq_real;
284 %reescribir concentracion en liq.
285 x_modelo(length(z),15)=Nh2sgas_real;
286 %reescribir fase gas.
287
288 H_nh3=5.9e-1;%Constante de Henry
289 para el NH3[mol/(m3 Pa)].

```

```

290 Nnh3liq_ode=x_modelo(length(z),8)*Fv; 339 puntos_recorridos=0;
291 %flujo molar en fase liq. de nh3 que sale 340 for i=1:j
292 de los calculos [mol/s] 341
293 Cnh3liq_real=Nnh3liq_ode/(Fv+(Ntgas/( 342 puntos_recorridos=puntos_recorridos+1
294 P_pa*H_nh3))); %flujo molar en fase liq. 343 ;
295 de nh3 ajustado [mol/s] 344
296 Nnh3liq_real=Cnh3liq_real*Fv; %flujo 345 Tpromedio=(Tpromedio*(puntos_recorr
297 molar real de nh3 en el liq (mol/s) 346 idos-1)+Tliq(i))/puntos_recorridos;
298 Nnh3gas_real=Nnh3liq_ode- 347 end
299 Nnh3liq_real; %flujo molar en fase gas de 348 Tgas(j)=Tpromedio; %es la
300 nh3 ajustado [mol/s] 349 temperatura de todo el gas para
301 x_modelo(length(z),8)=Cnh3liq_real; 350 diferentes largos totales de reactor. La
302 %reescribir concentracion en liq. 351 temperatura es homogenea dentro del
303 x_modelo(length(z),16)=Nnh3gas_real; 352 reactor. Si el largo del reactor es z3,
304 %reescribir fase gas. 353 entonces la temperatura del gas es
305 354 Tgas(length(z3)). En [K].
306 %Arreglar Nt gas: 355 end
307 x_modelo(length(z),22)=x_modelo(lengt 356
308 h(z),15)+x_modelo(length(z),16)+x_mod 357 %Solucion concentraciones en gas
309 elo(length(z),17)+x_modelo(length(z),18 358 Fv_g=x_modelo(:,22).*Tgas(:)*R_m3/P_
310 )+x_modelo(length(z),19)+x_modelo(len 359 pa; %Flujo volumetrico de gas generado
311 gth(z),20)+x_modelo(length(z),21); 360 para diferentes largos totales del reactor
312 Ntgas=x_modelo(length(z),22); %flujo 361 en [m³ gas/s]. Misma logica que para
313 molar de gas final (mol/s) 362 Tgas.
314 363 Cgas=x_modelo(:,15:21)./Fv_g(:);
315 %Solucion concentracion en liquido 364 %Concentración a partir de los moles
316 Cliq(:,1:13)=x_modelo(:,1:13); 365 generados por unidad de tiempo y flujo
317 %corregir los valores de concentracion 366 de gas generado por unidad de tiempo.
318 de glucosa, aminoacido y acido graso. 367
319 Cliq(:,2)=x_modelo(:,2)+x_modelo(:,23); 368 %Solucion humedad
320 %concentracion de glucosa degradable + 369 PMLiq=[32.4 0.180 17.9 0.367 0.034
321 no degradable. 370 0.256 0.113 0.017 0.016 0.044 0.018
322 Cliq(:,4)=x_modelo(:,4)+x_modelo(:,24); 371 35.453 19 PM_salida]; %Pesos
323 %concentracion de aminoacido 372 moleculares de las moleculas
324 degradable + no degradable. 373 liquidas[kg/mol].
325 Cliq(:,6)=x_modelo(:,6)+x_modelo(:,25); 374 PMLiq_hum(1:11)=PMLiq(1:11);
326 %concentracion de acido graso 375 PMLiq_hum(12)=PMLiq(14);
327 degradable + no degradable. 376 Cliq_hum(:,1:11)=Cliq(:,1:11);
328 Cliq(:,14)=x_modelo(:,26); %inerte 377 Cliq_hum(:,12)=Cliq(:,14);
329 organico del reciclo. 378 Mliq_hum=Cliq_hum.*PMLiq_hum*Fv;
330 379 %Flujo masico de las moleculas en cada z
331 %Solucion T liquido 380 [kg/s].
332 Tliq=x_modelo(:,14); %es la temperatura 381 SMLiq_hum=sum(Mliq_hum,2); %Suma
333 del líquido para cada z en [K]. 382 de los flujos masicos de todas las
334 383 moleculas en cada z [kg/s].
335 %Solucion T gas 384 Humedad=Mliq_hum(:,11)./SMLiq_hum;
336 Tgas=zeros(length(z),1); 385 %Fraccion de agua total en cada z [].
337 for j=1:length(z) 386
338 Tpromedio=0; 387 %Proporcion C:N

```

```

388 C_especie=[200*6 6 13*50 13 16 0];
389 %numero de moles de C por mol de
390 especie.
391 N_especie=[0 0 50*3 3 0 1]; %numero de
392 moles de N por mol de especie.
393 Nliq(:,1:4)=x_modelo(:,1:4)*Fv; %Flujo
394 molar de las moleculas degradables en
395 cada z [mol/s]. Celulosa, Glucosa,
396 Proteina, Aminoacido
397 Nliq(:,5)=x_modelo(:,6)*Fv; %Flujo
398 molar de las moleculas degradables en
399 cada z [mol/s]. AcGraso
400 Nliq(:,6)=x_modelo(:,8)*Fv; %Flujo
401 molar de las moleculas degradables en
402 cada z [mol/s]. NH3
403 NC=sum(Nliq.*C_especie,2); %flujo
404 molar de C para cada largo de reactor
405 [mol/s]
406 NN=sum(Nliq.*N_especie,2); %flujo
407 molar de N para cada largo de reactor
408 [mol/s]
409 CN=(NC*12)./(NN*14); %proporcion C:N
410 para cada posicion del reactor
411
412 %Calculo de composicion de salida sin
413 agua
414 %Concentraciones totales en el liquido.
415 Cliq_sinagua(:,1:10)=Cliq(:,1:10);
416 Cliq_sinagua(:,11:13)=Cliq(:,12:14);
417 PMLiq_sinagua=[32.4 0.180 17.9 0.367
418 0.034 0.256 0.113 0.017 0.016 0.044
419 35.453 19 PM_salida]; %Pesos
420 moleculares de las moleculas
421 liquidas[kg/mol].
422 Nliq_sinagua=Cliq_sinagua.*PMLiq_sina
423 gua*Fv;
424 %Composiciones molares.
425 C_especie_sinagua=[200*6 6 13*50 13
426 16 2 5 0 0 1 0 0 C_salida]; %numero de
427 moles de C por mol de especie.
428 N_especie_sinagua=[0 0 50*3 3 0 0 1 1 0
429 0 0 0 N_salida]; %numero de moles de N
430 por mol de especie.
431 H_especie_sinagua=[200*10 12 50*32
432 25 32 6 7 3 0 0 0 0 H_salida]; %numero
433 de moles de H por mol de especie.
434 O_especie_sinagua=[200*5 6 50*6 7 2 0
435 2 0 2 2 0 0 O_salida]; %numero de moles
436 de O por mol de especie.
437 NC=sum(Nliq_sinagua.*C_especie_sinag
438 ua,2); %flujo molar de C para cada largo
439 de reactor [mol/s]
440 NN=sum(Nliq_sinagua.*N_especie_sina
441 gua,2); %flujo molar de N para cada largo
442 de reactor [mol/s]
443 NH=sum(Nliq_sinagua.*H_especie_sina
444 gua,2); %flujo molar de N para cada largo
445 de reactor [mol/s]
446 NO=sum(Nliq_sinagua.*O_especie_sina
447 gua,2); %flujo molar de N para cada largo
448 de reactor [mol/s]
449 Hh2o_final=Humedad(length(z)); %H2O
450
451 %Proporcion de materia org. de salida.
452 C_salida=NC(length(t))/NN(length(t));
453 H_salida=NH(length(t))/NN(length(t));
454 O_salida=NO(length(t))/NN(length(t));
455 N_salida=1;
456 PM_salida=(C_salida*12+H_salida*1+O_
457 salida*16+N_salida*14)/1000; %kg/mol
458
459 %Masa inerte organico en el reciclo
460 VS_reciclo=(1-Hh2o_final)*Fm_i;
461
462 %Agua extra requerida
463 Eh2o=max(0,-(Humedad-
464 0.55).*SMliq_hum); %kg/s
465 j=0;
466 for i=2:length(Eh2o);
467 if (Eh2o(i-1)<=0 &&
468 Eh2o(i)>=0) || (Eh2o(i-1)>=0 &&
469 Eh2o(i)<=0);
470 j=j+1;
471 Rh2o(j,1)=i;
472 end
473 end
474
475 %H2S salida gas
476 Fv_g_final=Fv_g(length(z));
477 Nh2s_salida=x_modelo(length(z),15);
478 %flujo de h2s en la salida [mol/s]
479 Ngas_salida=x_modelo(length(z),22);
480 %flujo molar de salida gaseosa [mol/s]
481 yh2s_gas=Nh2s_salida/Ngas_salida;
482 %fraccion molar de h2s en la salida
483 gaseosa []

```

484	P_h2s=P_atm*(yh2s_gas);%Presion	499	Nnh3_salida=x_modelo(length(z),16);
485	parcial de h2s en la salida gaseosa [atm]	500	%flujo de nh3 en la salida [mol/s]
486	%H2S salida liq	501	ynh3_gas=Nnh3_salida/Ngas_salida;
487	Nh2s_liq=x_modelo(length(z),5)*Fv;	502	%fraccion molar de nh3 en la salida
488	%flujo molar de h2s en la salida del	503	gaseosa []
489	reactor [mol/s]	504	P_nh3=P_atm*(ynh3_gas);%Presion
490	Nt_liq=sum(Cliq*Fv,2); %Flujo Molar	505	parcial de h2s en la salida gaseosa [atm]
491	total en fase liquida en todo el reactor	506	%NH3 salida liq
492	[mol/s]	507	Nnh3_liq=x_modelo(length(z),8)*Fv;
493	Nt_liq_salida=Nt_liq(length(z)); %flujo	508	%flujo molar de h2s en la salida del
494	molar total en la salida liquida [mol/s]	509	reactor [mol/s]
495	yh2s_liq=Nh2s_liq/Nt_liq_salida;%Fracci	510	ynh3_liq=Nnh3_liq/Nt_liq_salida;%Fracci
496	on molar de h2s en la salida liquida.	511	ion molar de h2s en la salida liquida.
497		512	
498	%NH3 salida gas	513	End

Anexo T CÁLCULOS PARA DETERMINAR EL CASO BASE

Los cálculos realizados para determinar el caso base se encuentran en: <https://goo.gl/q1ojNk>, pestañas *Caso base 1* y *Caso base 2*. En la primera se analiza estudia el caso base considerando flujos con rango de seguridad; y en el segundo, sin rango.

Anexo U CÁLCULO COLUMNA DE DIGESTATO DEL SIFÓN

Se determinó la columna de digestato requerida para evitar la transferencia de biogás hacia el exterior a través de sifón. Los cálculos se encuentran en: <https://goo.gl/P2nyRE>, pestaña *Cálculo columna*.

Anexo V CÁLCULOS DE LOS REQUERIMIENTOS TÉRMICOS

Se determinaron las pérdidas de calor del reactor y el depósito de alimentación, y se concluyó que 5 [cm] de aislante permiten una aislación suficiente. Los cálculos se encuentran en: <https://goo.gl/y7sMwc> pestaña *Pérdidas en reactor y depósito alm.*

Anexo W CÁLCULOS DE VOLÚMENES Y FORMAS DE COMPONENTES

Los cálculos de las formas y volúmenes de los componentes del equipo se detallan en <https://goo.gl/fXghPr> pestaña *V* y *d v4*. Las otras pestañas presenten corresponden a cálculos preliminares.