



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

**DISEÑO DE UNA PLANTA INDUSTRIAL DE COMPOSTAJE DE PILAS
ESTÁTICAS AIREADAS CON RECUPERACIÓN DE CALOR**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

RALF ANDREAS ZINK POHLHAMMER

PROFESOR GUÍA:
Ramón Frederick González

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
María Elena Lienqueo Contreras
Rubén Fernández Urrutia

SANTIAGO DE CHILE
2022

RESUMEN DE LA MEMORIA PARA OPTAR
AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: RALF ANDREAS ZINK POHLHAMMER
FECHA: 2022
PROF. GUÍA: RAMÓN FRÉDERICK GONZÁLEZ

DISEÑO DE UNA PLANTA INDUSTRIAL DE COMPOSTAJE DE PILAS ESTÁTICAS AIREADAS CON RECUPERACIÓN DE CALOR

El siguiente trabajo consiste en el diseño de una planta de compostaje industrial con una capacidad de procesamiento de 4000 toneladas anuales para la gestión municipal de residuos orgánicos, pensado para un municipio de la Región de La Araucanía. El método de pilas estáticas aireadas permite aprovechar el calor de los gases emitidos del proceso de fermentación, por medio un intercambiador de calor integrado en el sistema de ventilación.

Se realizó el dimensionamiento y disposición general de la planta, obteniéndose una superficie total de $9775 m^2$. Dentro de esta superficie, se destinan $2500 m^2$ para la construcción de un galpón para la zona de fermentación, en donde se ubican 10 lotes en los cuales se sitúan pilas de 46 toneladas.

El desarrollo de ingeniería básica para el proceso de fermentación dentro de la planta de compostaje indica que para cumplir con los requerimientos de ventilación de para los 10 lotes se necesita un ventilador con una potencia de 95 kW. La integración de un intercambiador de tubos y carcasa permite una recuperación de calor de 130,6 kW para ser utilizado dentro de las operaciones de la planta.

La estimación del costo de inversión supone un aproximado de mil millones de pesos, mientras que los ingresos anuales percibidos por la producción de compost se estiman en 240 millones de pesos.

*"Nada es más sagrado que la integridad de tu propia mente."
-Ralph Waldo Emerson*

Agradecimientos

Agradezco profundamente a mis padres, Albert y Pilar, por haberme entregado la oportunidad de estudiar en las mejores condiciones y por todo el apoyo que me entregaron a lo largo de la carrera.

A mi hermano Thomas, quien me preguntaba cómo me iba con la ingeniería cada vez que llegaba a casa.

A Marysella, mi profesora de matemáticas en enseñanza media, quien me ayudó a entrar a la universidad que tanto deseaba.

Quisiera agradecer también todos mis amigos, del colegio, primer año y de especialidad, quienes me han apoyado tanto emocional como académicamente a lo largo de todos estos años de estudio.

Por último, agradezco a mi profesores guía y co-guía, Ramón y María Elena, por haberme ayudado a realizar mi trabajo de título este último año y terminar así con mi etapa universitaria.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Revalorización de residuos orgánicos en Chile	1
1.2. ¿Qué es el compostaje?	1
1.3. Motivaciones	1
2. Antecedentes	3
2.1. Conceptos básicos del compostaje	3
2.2. Beneficios del compostaje	4
2.3. Etapas del proceso de compostaje	5
2.3.1. Preparación de la mezcla	5
2.3.2. Fermentación	5
2.3.3. Maduración del compost	6
2.4. Variables principales de operación	7
2.5. Compostaje por pilas estáticas aireadas	8
2.6. Tipos de control	9
2.7. Sistema de recuperación de calor	10
3. Objetivos	12
3.1. Objetivo general	12
3.2. Objetivos específicos	12
3.3. Alcances	13
4. Metodología	14
4.1. Estimación de procesamiento	14
4.2. Dimensionamiento de la planta	15
4.3. Sistema de aireación	16
4.4. Recuperación de calor	21
5. Resultados	25
5.1. Estimación de procesamiento	25
5.2. Selección de comunas	27
5.3. Dimensionamiento zona de fermentación	28
5.4. Layout general de la planta	29
5.5. Sistema de ventilación	31
5.5.1. Flujo de aire	31
5.5.2. Pérdidas de carga	38
5.5.3. Potencia del ventilador	40
5.6. Recuperación de calor	41

5.7. Evaluación económica	43
6. Trabajo siguiente	45
7. Conclusiones	46
Bibliografía	47

Índice de Tablas

5.1.	Datos relacionados a la generación de residuos municipales en la Región de La Araucanía.	25
5.2.	Distribución de coberturas de residuos orgánicos municipales para las comunas en la provincia de Cautín.	26
5.3.	Porcentaje de residuos orgánicos municipales revalorizables por comuna con una capacidad de planta de 2000 toneladas anuales de residuos orgánicos municipales.	27
5.4.	Selección de comunas ideales para la ejecución de un piloto.	27
5.5.	Dimensiones seleccionadas para la pila a formarse en un lote dentro de la zona de fermentación.	28
5.6.	Detalle de la disposición general de la planta.	30
5.7.	Valores de los flujos de aire requeridos.	31
5.8.	Valores para el flujo de aire máximo ajustado.	31
5.9.	Descripción de las secciones del sistema de ventilación junto con sus largos respectivos.	33
5.10.	Dimensiones de las canaletas del lote de compostaje y del biofiltro.	33
5.11.	Dimensión de los orificios de una canaleta.	34
5.12.	Dimensiones del conector de las canaletas al manifold.	35
5.13.	Dimensiones del manifold principal y la tubería de extracción.	36
5.14.	Pérdidas de carga asociadas al sistema de ventilación.	38
5.15.	Velocidad promedio del aire dentro de la pila.	39
5.16.	Pérdida de carga asociada al compost y biofiltro.	39
5.17.	Potencia ideal y requerida para el ventilador en el sistema de ventilación.	40
5.18.	Valores para la entalpía de entrada y salida para el fluido caliente, aire húmedo saturado.	41
5.19.	Resultados para el balance de energía de los fluidos caliente y frío.	41
5.20.	Resultados para la superficie preliminar del intercambiador de calor.	42
5.21.	Estimación de costos para la ejecución de la planta en pesos chilenos (CLP).	43
5.22.	Estimación de ingresos anuales de la planta en pesos chilenos	44

Índice de Ilustraciones

2.1.	Etapas del proceso de compostaje en base a la temperatura del compost a lo largo del tiempo.	6
2.2.	Sistema simplificado de compostaje de pilas estáticas aireadas.	8
2.3.	Diagrama de flujo del sistema de recuperación de calor de Agrilab Techonologies para la planta de compostaje de Burley-Demeritt Farm en Lee, New Hampshire.	11
5.1.	Layout general de la planta.	29
5.2.	Esquema de las etapas para un lote en el proceso de fermentación.	32
5.3.	Sección transversal de la canaleta.	34
5.4.	Vista superior de la canaleta.	34
5.5.	Vista lateral de la conexión entre las canaletas y el manifold principal.	35

Capítulo 1

Introducción

1.1. Revalorización de residuos orgánicos en Chile

Hoy en día existe en Chile un gran problema asociado al manejo de los residuos orgánicos generados. La escasa infraestructura para la disposición y tratamiento de estos residuos tiene como consecuencia que hoy en día solamente cerca del 1% de los residuos orgánicos sean procesados apropiadamente a nivel nacional[1]. Es así como, al no haber una correcta separación de los residuos tanto industriales como residenciales, la materia orgánica acaba en los rellenos sanitarios junto al resto de basura inerte. Este problema resulta en emisiones de gas metano, debido a la degradación de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas dentro del relleno sanitario. Este gas de efecto invernadero es 80 veces más potente que el dióxido de carbono en cuanto a la captación de calor durante los primeros 20 años, por lo que resulta de gran importancia mitigar este tipo de emisiones dada la actual crisis climática. Sin embargo, el correcto procesamiento de los residuos orgánicos trae consigo diversos beneficios tanto ambientales como económicos. Destinar los residuos orgánicos al tratamiento de estos en plantas de compostaje conlleva un menor impacto ambiental al recircular la materia orgánica, reduciendo las emisiones y carga patógena asociadas a la descomposición de estos. En contraste a la disposición final de estos residuos en rellenos sanitarios, el compostaje favorece a un desarrollo sustentable en base a la economía circular.

1.2. ¿Qué es el compostaje?

El compostaje es el tratamiento aeróbico de materia orgánica, en donde esta se descompone por medio de microorganismos tales como bacteria y hongos[2]. Este proceso biológico tiene como resultado compost, un producto de alto valor el cual puede ser utilizado como abono, fertilizante o mejorador de suelos. Existen diversos mecanismos de compostaje que tienen como función optimizar el proceso biológico para obtener una buena calidad del producto y manejar efectivamente las emisiones no deseadas como las de metano o amoníaco.

1.3. Motivaciones

La motivación de este trabajo nace de la oportunidad de entregar una solución innovadora que contribuya a la correcta gestión de residuos en el país. Se espera que el diseño propuesto sea utilizable como proyecto piloto para la gestión de residuos orgánicos municipales en

alguna comuna en la Región de La Araucanía, en donde el calor recuperado del proceso de compostaje pueda ser aprovechado dentro de la planta para uso en calefacción o calentar agua para uso doméstico u otro fin.

En el mismo sentido, este trabajo es desarrollado teniendo en consideración las iniciativas encontradas en las propuestas para la Hoja de Ruta Nacional a una Economía Circular al 2040 y la Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos desarrolladas por el Ministerio de Medio Ambiente. El compostaje podría cumplir un rol fundamental en un nuevo modelo económico circular, al utilizar la materia orgánica desechada para la producción de nuevos alimentos, cerrando así el ciclo de la materia orgánica.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Conceptos básicos del compostaje

El compostaje es un proceso biológico aeróbico, en donde diversos organismos, principalmente hongos y bacterias degradan la materia orgánica (MO), generando un compuesto orgánico denominado humus. Otros productos resultantes de este proceso son dióxido de carbono y agua. Este proceso puede llevarse a cabo por medio de distintos tipos de residuos orgánicos, provenientes de los residuos orgánicos municipales, la agricultura, la industria forestal y lodos del tratamiento de aguas servidas. Las principales variables que repercuten directamente en el proceso de compostaje son la temperatura, la humedad, la concentración de oxígeno y la porosidad del compost. Estas variables afectan tanto en la eficiencia del proceso de degradación como en la calidad del producto final. El humus, producto final de proceso de compostaje, tiene un color negrozco debido al alto contenido de carbono de este. Estas sustancias húmicas son de gran uso en la agricultura y horticultura para remediar la degradación de los suelos.

2.2. Beneficios del compostaje

Se pueden apreciar grandes beneficios ambientales por parte del compostaje al cerrar el ciclo natural de la materia orgánica. Los residuos orgánicos que terminan en rellenos sanitarios se descomponen de manera anaeróbica, debido a la escasa concentración de oxígeno dentro del relleno. Esto genera emisiones de metano, las cuales pueden ser fácilmente evitadas prohibiendo el ingreso de residuos orgánicos a los rellenos sanitarios.

El proceso de compostaje si es llevado de manera óptima reduce las emisiones indeseadas de metano y amoníaco, emitiendo principalmente dióxido de carbono y agua. Si bien el dióxido de carbono es un gas de efecto invernadero al igual que el metano, la repercusión de este último es considerablemente más grave en la atmósfera.

El compost puede además mejorar los suelos al enriquecer estos con nutrientes y microbioma, lo cual aumenta la capacidad de retener carbono y actuar como regulador atmosférico.

El compostaje puede llegar a ser una herramienta importante en una futura bioeconomía circular, donde los residuos orgánicos sean utilizados para crear un producto de gran valor tanto económico como ambiental.

2.3. Etapas del proceso de compostaje

Se pueden diferenciar cuatro etapas dentro del proceso de compostaje en base a la temperatura dentro del compost. Finalmente se culmina el proceso en la etapa de curado, donde la composición y temperatura de la MO se estabiliza y se forma el humus.

El proceso de compostaje se puede separar en tres fases que van desde la preparación de la mezcla de la materia orgánica hasta la maduración completa compost. Estas tres fases cumplen con objetivos distintos, pero todas igual importancia en cuanto a la calidad resultado final.

2.3.1. Preparación de la mezcla

Esta primera fase consiste en preparar una mezcla homogénea a partir de distintos residuos orgánicos, con el objetivo de lograr las condiciones ideales en cuanto a la humedad, porosidad y composición de la materia orgánica.

En el caso de compostar residuos orgánicos domiciliarios, esta suele mezclarse con biomasa lignocelulósica tales como astillas de madera, aserrín o paja, con tal de balancear la relación de carbono y nitrógeno de la mezcla con el alto contenido de carbono encontrado en esta última.

La incorporación de este material amaderado en los residuos orgánicos municipales ayuda además a regular la humedad y la porosidad de la pila, lo cual facilita posteriormente una mejor degradación por parte de los microorganismos presentes.

2.3.2. Fermentación

El proceso de compostaje continua con la fase de fermentación, en donde se sitúan las pilas de los residuos orgánicos en un espacio determinado ya sea abierto o cerrado. Aquí es donde comienza el proceso de degradación biológica por parte de los microorganismos

Esta fase se separa en tres etapas que se distinguen a partir la temperatura en la que se encuentra el compost durante este periodo. El proceso comienza a temperatura ambiente en la etapa mesofílica, en donde bacterias comienzan con la degradación de la materia orgánica. Estas primeras bacterias se desarrollan de manera óptima en una temperatura de 30°C. Esta primera etapa tiene una duración de alrededor de un par de días.

El proceso aeróbico provoca un aumento de la temperatura dentro del compost, llegando a la segunda etapa llamada etapa termofílica. A lo largo de esta etapa, las bacterias mesofílicas se inactivan debido a las temperaturas superiores, mientras que bacterias y hongos termofílicos se activan y continúan con la degradación de la MO. La temperatura dentro del compost se estabiliza naturalmente alrededor de los 70 °C, al ser letal para gran parte de los microbios. Es en esta etapa donde se alcanza la mayor actividad biológica. Durante el proceso es esencial contar con un método de extracción del excedente de calor para evitar que la temperatura del compost llegue a niveles excesivos.

A medida que se completa la degradación de la MO, la actividad comienza a decaer al igual que la temperatura dentro del compost. El proceso continúa por lo tanto en la etapa de enfriamiento, en donde se completa el proceso de degradación.

Esta fase puede durar entre 4 semanas hasta 2 meses dependiendo del método de compostaje utilizado.

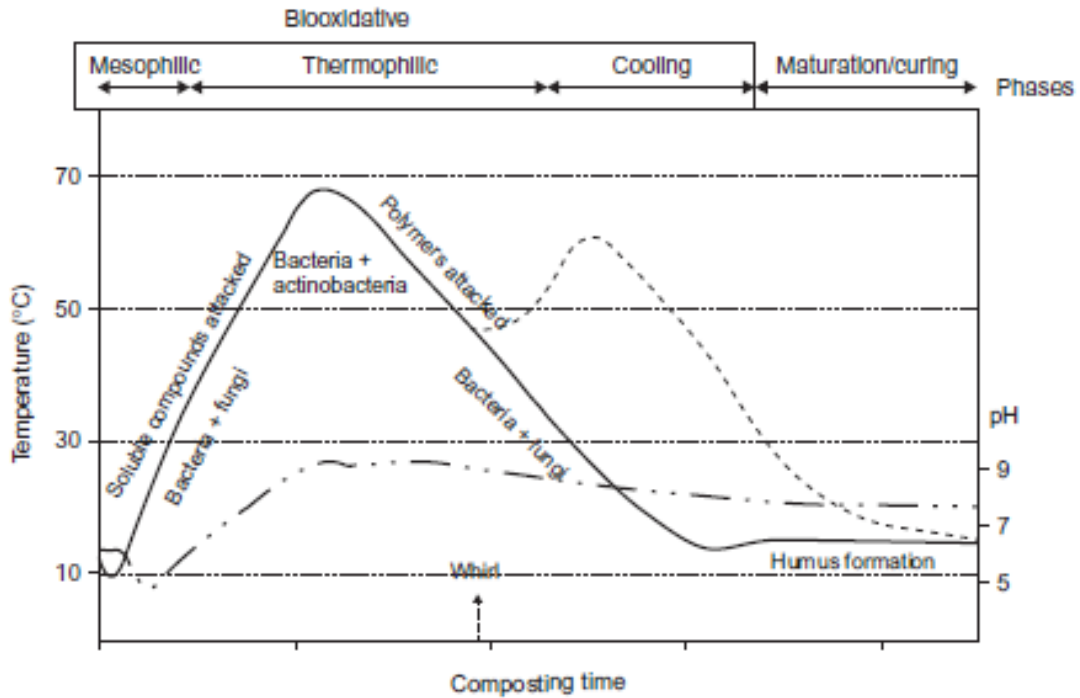


Figura 2.1: Etapas del proceso de compostaje en base a la temperatura del compost a lo largo del tiempo.

2.3.3. Maduración del compost

En esta última fase del proceso se caracteriza por una menor actividad microbiana y una temperatura constante y cercana a la temperatura ambiente. Durante este periodo ocurre la humificación de la materia orgánica degradada, la cual se puede observar a través del color negrozco resultante.

Dentro de esta fase se estabilizan también la acidez, la humedad y la relación C/N del compost. La maduración del compost es de gran importancia, ya que un compost inmaduro puede causar daños al aplicarse en alguna plantación. Se espera que el compost ya finalizado presente en promedio un acidez de 8,1, una relación C/N de 13,2 y una humedad ideal entre 35 % y 45 %. [2]

2.4. Variables principales de operación

Temperatura

El control de la temperatura durante el proceso de compostaje resulta fundamental para mantener la actividad biológica en óptima condición. Esta puede variar entre los 40° y 65°. Sin embargo, es importante que la materia orgánica supere los 55°, dado que a partir de esa temperatura se inactivan gran parte de los microorganismos patogénicos.

La temperatura durante la etapa termofílica no debe exceder los 70°C dado que el proceso podría acabarse súbitamente al acabar con gran parte de la población microbiana. Por otro lado, una temperatura baja causaría una disminución en la actividad biológica, realentizando el proceso.

Concentración de oxígeno y humedad

Contar con una cantidad adecuada de oxígeno en el medio es esencial para asegurar el proceso aeróbico llevado a cabo por los organismos. En general, una concentración de oxígeno entre 15 % y 20 % resulta adecuado para el proceso de degradación. [2]. La deficiencia de oxígeno en el proceso puede conllevar la proliferación de microorganismos anaeróbicos y emisiones no deseables. Por el contrario, un exceso en la concentración de oxígeno puede resultar en una disminución en la temperatura del compost, debido al exceso de ventilación.

La humedad dentro del compost permite la subsistencia de los organismos encargados del proceso biológico. Un contenido de agua entre el 50 % y 60 % de la mezcla de compost permite que el proceso se realice sin impedimentos (Bernal, y otros, 2017). Un valor bajo en la humedad causa una disminución en la velocidad de degradación, mientras que el exceso de humedad en el entorno puede provocar que los poros o cavidades dentro del compost se saturen con agua e impida así el flujo de oxígeno y por consiguiente el proceso aeróbico de degradación.

Porosidad

El tamaño de las partículas del compost y las cavidades interpartículas influyen de forma importante en el proceso de compostaje, al determinar estas la superficie disponible para el proceso de compostaje. La materia orgánica debe pasar por un tratamiento físico de fragmentación para que el tamaño de las partículas dentro del compost sea del tamaño adecuado para el desarrollo del proceso biológico. Si la MO es triturada es partículas muy finas, la pila del compost se compacta e impide el movimiento de aire a través de esta. En el caso contrario de que las partículas sean demasiado grandes, los microorganismos tendrán una mayor dificultad para alcanzar el núcleo de las partículas, quedando incompleto el proceso de compostaje. Se considera que un espacio total interpartículas entre un 60 % y 70 % resulta óptimo para la ventilación del compost.[2]

Relación Carbono/Nitrógeno

La relación C/N es una medición simple que indica el balance de nutrientes dentro de la materia orgánica. Se tiene que una relación óptima de C/N varía entre 25 y 35, para entregarla a los microorganismos la cantidad adecuada de materia orgánica y reducir las pérdidas de

nitrógeno dentro del compost.

Una práctica común para balancear la relación C/N es mezclar diferentes tipos de residuos orgánicos con distintas cantidades de carbono. Por ejemplo, los residuos orgánicos domiciliarios se suelen mezclar con podas, paja o astillas de madera, las cuales poseen una mayor relación de C/N.

2.5. Compostaje por pilas estáticas aireadas

Existen diferentes métodos de compostaje cuyos usos dependen principalmente del tipo de materia prima con la que se trabaja. Estos métodos se categorizan en sistemas abiertos o sistemas cerrados. Los sistemas abiertos trabajan el compost en contacto con el aire exterior, mientras que en los sistemas cerrados el compost no está en contacto directo con el aire, sino que se le es inyectado de manera controlada.

Dentro de los sistemas abiertos se encuentra el método de pilas estáticas aireadas, en donde la materia orgánica es apilada sobre un sistema de ventilación el cual fuerza una corriente de aire. El flujo se realiza mediante la expulsión o la succión de aire a través de ventiladores mecánicos.

La ventaja de este sistema en comparación al sistema abierto tradicional de pila giratoria es que se puede prescindir de la labor de voltear la pila, aumentando la eficiencia del proceso y disminuyendo los costos de operación.



Figura 2.2: Sistema simplificado de compostaje de pilas estáticas aireadas.

2.6. Tipos de control

El flujo de aire se debe controlar de tal manera que las variables de temperatura, humedad y concentración de oxígeno se mantengan en los niveles adecuados. Para ello, se tienen distintos tipos de control, ya sean manuales o automáticos, con o sin retroalimentación.

Manual: Se regula el flujo de aire manualmente por medio de válvulas.

Temporizador Encendido/Apagado: Un temporizador controla el tiempo de encendido y apagado del ventilador según los requerimientos de aireación a lo largo del periodo de compostaje de la pila. En el caso de contar con un único ventilador, se trabaja en conjunto a válvulas en cada pila para regular el flujo de aire que ingresa en cada una.

Control por retroalimentación basado en la concentración de O_2 : Se instalan sensores en los ductos de los gases de escape, permitiendo medir la concentración de oxígeno y así regular el flujo de aire necesario para cada pila. Esta estrategia de control se utiliza cuando el suministro de aire se encuentra cercana a la demanda estequiométrica del sustrato.

Control por retroalimentación basado en la temperatura: Se controla la temperatura por medio de termostatos insertados dentro de la pila, los cuales activan el ventilador al superar un punto fijado de temperatura. Se emplea este método de control cuando la extracción de calor resulta cubre la mayor parte de la demanda total de aire.

Control basado en el flujo de aire:

Se controla el flujo de aire según valores predeterminados para el suministro de aire dadas las características de la materia orgánica y la actividad biológica a lo largo del proceso.

2.7. Sistema de recuperación de calor

Otra ventaja del sistema de pilas estáticas aireadas es la posibilidad de integrar un sistema de recuperación de calor, el cual absorba el exceso de calor generado en el compost y pueda ser aprovechado para otras necesidades dentro de la planta. Actualmente se han desarrollado tres métodos que permiten recuperar el calor del compost.

El primer método es el uso directo del aire húmedo caliente, el cual se usa principalmente en invernaderos con el fin potenciar el crecimiento de las plantas al proporcionar una temperatura adecuada y un nivel mayor de dióxido de carbono.

El segundo método consiste en calentar agua directamente por medio de una tubería situada en el medio de la pila de compost. Este método se conoce como el método de Jean Pain, inventor francés que utilizó el calor del compost para calefaccionar su vivienda de esta forma.

El último método consiste en capturar el calor latente utilizando un intercambiador de calor tipo condensador. Este método es el que se ha empleado comúnmente en la actualidad al poseer una mayor eficiencia de recuperación de calor al aprovechar el calor latente del vapor de agua.

El sistema de recuperación de calor que se empleará en el trabajo es este último. En este, El sistema de aireación trabaja creando succión en la pila y circula el aire y el vapor de agua generado en el proceso hacia el intercambiador de calor. El intercambio de calor se efectúa primariamente por medio del calor latente del vapor de agua, el cual es cedido al agua que circula dentro de los tubos del intercambiador de calor.

La recuperación del exceso de calor del proceso de compostaje se mide en base a la energía obtenida por hora. La cantidad de energía disponible depende de la escala y la temperatura de operación de la planta. Este puede alcanzar valores de 20035 kJ/hr para proyectos piloto y 204907 kJ/hr para sistemas comerciales.[4]

Esta tecnología ha sido implementada efectivamente a escala comercial en Estados Unidos: La compañía Agrilab Technologies ha sido parte de distintos proyectos de compostaje en E.E.U.U, tanto en el compostaje de residuos orgánicos municipales como compostaje de estiércol en granjas. Se destaca la

planta de compostaje en la granja Burley-Demeritt, New Hampshire, parte de la Universidad de New Hampshire (NHU), que utiliza un intercambiador de tubo y carcasa con una recuperación de calor entre 17700 y 32940 kJ/h bajo temperaturas entre 51 y 66 °C [5]

Otra investigación realizada por G. Irvine[6] concluyó que la energía que se puede obtener a partir del compost se comprende entre 7000 y 10000 kJ/kg compost dentro de un periodo de 15 días.

Figure 1. Flow diagram of UNH heat recovery system

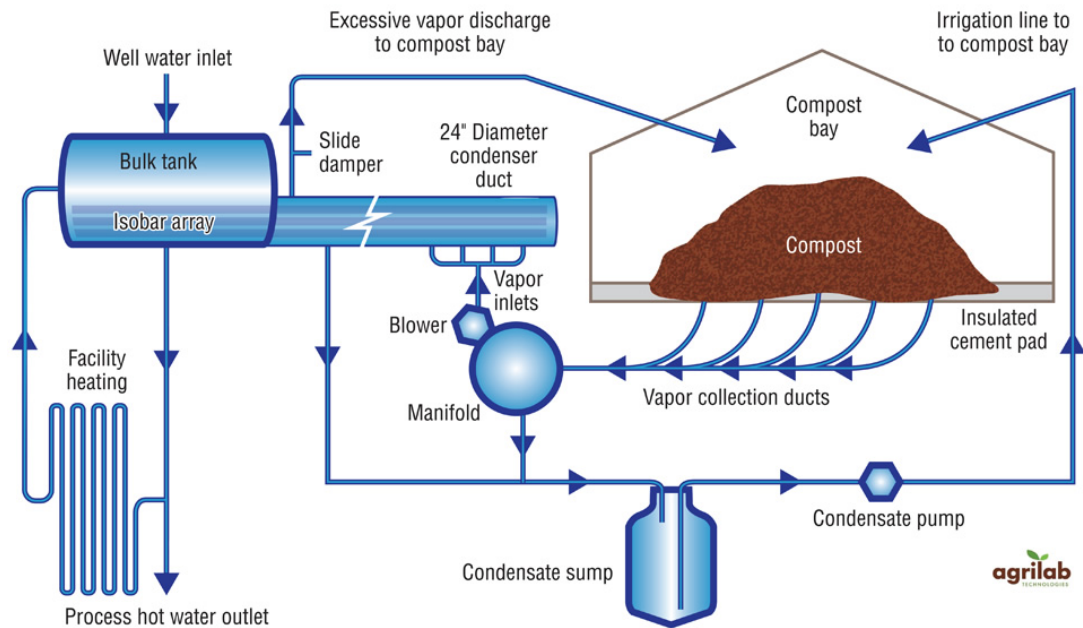


Figura 2.3: Diagrama de flujo del sistema de recuperación de calor de Agrilab Technologies para la planta de compostaje de Burley-Demeritt Farm en Lee, New Hampshire.

Capítulo 3

Objetivos

3.1. Objetivo general

Este trabajo tiene como objetivo diseñar una planta de compostaje de pilas estáticas aireadas con recuperación de calor para la gestión de residuos orgánicos municipales en la Región de La Araucanía.

3.2. Objetivos específicos

El trabajo se divide en 4 objetivos específicos señalados a continuación.

- Estimar la generación de residuos orgánicos municipales por comuna dentro de la Región de La Araucanía.
- Dimensionar planta según capacidad de procesamiento determinada.
- Diseñar la zona de fermentación de la planta.
- Diseñar sistema de aireación de la zona de fermentación
- Dimensionar el intercambiador de calor integrado en el sistema de aireación.
- Estimar el costo de inversión y los ingresos anuales para la planta.

3.3. Alcances

Los alcances del trabajo a desarrollar están comprendidos dentro del marco de ingeniería de prefactibilidad para la ejecución de un proyecto piloto para la gestión de residuos orgánicos municipales. Esto contempla el diseño general de la planta de compostaje y la ingeniería básica para el proceso de fermentación, quedando fuera de los alcances la ingeniería de detalle para planta.

Por otro lado, la evaluación económica para la planta contempla la inversión total estimada y los ingresos estimados, dejando fuera los costos de operación de la planta.

Capítulo 4

Metodología

4.1. Estimación de procesamiento

En primer lugar, es importante que la planta se ubique en un sector donde, tanto la materia orgánica de entrada como la demanda por el producto final se encuentren cercanos a este, con el fin de disminuir los costos de operación por transporte. Por esto, se acotó el rango para la ubicación de la planta de compostaje, teniendo en cuenta únicamente la provincia de Cautín en la Región de la Araucanía. Se justifica esta elección dado que es en esta provincia donde se encuentra la mayor producción agrícola dentro de la zona sur.

Para dimensionar la planta de compostaje es necesario estimar la cantidad de residuos orgánicos municipales disponibles en la zona. Para ello, se estima la cantidad de residuos orgánicos municipales por comuna, teniendo como información la generación de residuos municipales de la región. Se divide este valor por la cantidad de habitantes en la región de la Araucanía, quedando el valor de generación de residuos municipales per cápita. Luego, se pondera este valor por el factor de 0,58 asociado a la parte de los residuos municipales que corresponden a materia orgánica. Finalmente, se multiplica este valor con la población de cada comuna, lo que entrega un estimado de la generación de residuos orgánicos municipales por comuna.

Una vez determinada la generación de residuos orgánicos municipales por comuna, se busca la capacidad de procesamiento tal que cubra en la mayoría de las comunas entre el 30 % y el 100 % de los residuos orgánicos municipales. Se tendrá además como criterio de selección la cercanía de la comuna con la Ruta 5 Sur, para facilitar la entrada y salida de la materia prima y el compost respectivamente.

4.2. Dimensionamiento de la planta

A partir de la capacidad de procesamiento se procede a dimensionar la planta de compostaje en función a la superficie necesaria para llevar a cabo el proceso de compostaje. Luego, en base a la superficie determinada se dimensionan las superficies necesarias para los procesos de pre-tratamiento y post-tratamiento.

Se dimensiona el tamaño de la pila asumiendo una geometría de trapecio isósceles con un grado de inclinación de 45° y una altura máxima de 1,8 metros para evitar una compactación perjudicial en la materia orgánica. Una vez seleccionadas las dimensiones de largo, ancho y alto de la pila y teniendo una densidad típica de una pila de compost de 600 kg/m^3 , se determina la masa total de esta.

La altura de la pila no debe superar los 1,8 metros para evitar una compactación excesiva de la materia orgánica que pueda traer problemas en la aireación dentro de la pila.

El periodo típico de un proceso de compostaje con forzamiento de aire se encuentra entre las 4 y 6 semanas. Asumiendo entonces que la pila permanecerá en el sitio durante 6 semanas y teniendo la cantidad anual de procesamiento de materia orgánica, se determina la cantidad de lotes necesarios de la siguiente forma.

$$N^\circ \text{Lotes} = \frac{\text{Capacidad anual de procesamiento}}{V_{pila} \cdot 52/6} \quad (4.1)$$

El volumen de la pila calculada debe ser cercana a la cantidad de materia orgánica ingresada cada cuatro días, que es el periodo estimado de recolección de los residuos orgánicos.

4.3. Sistema de aireación

El sistema de ventilación a diseñar se empleará en la zona de fermentación de la planta, en donde se encuentra el mayor requerimiento de aireación a lo largo del proceso.

El diseño contempla un ventilador único conectado a los lotes por medio de un colector o manifold principal y por otro lado a un biofiltro situado afuera del galpón. El ventilador genera una succión a través del compost, extrayendo los gases dentro de este y enviándolos al exterior. El biofiltro, comúnmente compuesto de astillas de madera, absorben parte de los gases evitando la propagación de malos olores.

Para dimensionar el tamaño del sistema de ventilación y la potencia necesaria para el ventilador, se considera el flujo de aire máximo requerido para la etapa termofílica del proceso de compostaje.

Se considera en régimen máximo la succión de aire de dos pilas simultáneamente, cuya masa multiplicada por el requerimiento de aire anterior entrega requerimiento total de aire en metros cúbicos por hora.

Se opta por emplear un tipo de control de encendido/apagado para el sistema de aireación debido a la mayor facilidad que se tiene para determinar los flujos de aire en comparación a los tipos de control con retroalimentación.

El tamaño del sistema de aireación se determina calculando las áreas de las secciones transversales a través de la ecuación general de flujo. Se busca un área transversal tal que la velocidad del aire no supere los 15 metros por segundo para evitar una generación excesiva de ruido y una mayor pérdida por fricción.

$$Q = V \cdot A \tag{4.2}$$

Donde:

- Q : Caudal (m^3/s)
- V : Velocidad media (m/s)
- A : Área de la sección transversal (m^2)

Se comienza el cálculo definiendo en primer lugar la sección transversal de las canaletas. Estas son de forma rectangular, por lo que es necesario determinar el diámetro hidráulico para calcular la velocidad del aire dentro de estas.

$$D_h = \frac{4 \cdot \text{Área}}{\text{Perímetro}} = \frac{2(a \cdot b)}{a + b} \quad (4.3)$$

Donde:

- D_h : Diámetro hidráulico de la sección transversal (m)
- a, b : ancho y alto de la canaleta (m)

Luego, la tubería que conecta las canaletas al colector principal debe ser igual a la suma de las áreas transversales de las canaletas. Por último, el diámetro del colector principal será igual a la suma de dos tuberías conectoras.

Para determinar la potencia requerida por el ventilador es necesario determinar la pérdida de carga dentro del sistema de aireación. Para ello, se debe calcular la pérdida de carga del sistema desde las pilas de compost hasta el biofiltro, considerando las pérdidas asociadas a las canaletas, las tuberías, el intercambiador de calor y las pérdidas ocurridas dentro del compost y el biofiltro.

Se calcula la pérdida de carga en las tuberías según la siguiente ecuación.

$$\Delta P = \frac{f}{2} V^2 \rho \frac{L}{D} \quad (4.4)$$

Donde:

- ΔP : Pérdida de carga (Pa)
- f : factor de fricción
- V : Velocidad del fluido (m/s)
- ρ : Densidad del fluido (kg/m^3)
- L : Largo de la tubería (m)
- D : Diámetro de la tubería (m)

El factor de fricción f se determina a través del diagrama de Moody, teniendo la rugosidad relativa de la tubería y el número de Reynolds, obteniéndose este último de la ecuación 4.5.

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (4.5)$$

Donde:

- Re : Número de Reynolds
- ρ : Densidad del fluido (kg/m^3)
- μ : Viscosidad del fluido (kg/ms)
- V : Velocidad del fluido (m/s)
- D : Diámetro de la tubería (m)

Para calcular la pérdida de carga ocurrida dentro del compost y el biofiltro, se utiliza la ley de Darcy, la cual caracteriza el movimiento de un fluido en un medio poroso. Dado que esta ley aplica para un flujo laminar, se modifica esta para trabajar bajo un régimen turbulento, utilizando un exponente de velocidad n . Se añade además un exponente de compactación j el cual refleja la compactación a la que se ve sometido el medio poroso.

$$\Delta P_{pila} = k(V_{pila}^n)(L_{pila}^j) \quad (4.6)$$

Donde:

- ΔP_{pila} : Pérdida descarga a través de un medio poroso poroso.(*inwc*)
- k : Coeficiente de permeabilidad del medio
- V_{pila} : Velocidad promedio del fluido en el medio (*fps*)
- n : Coeficiente de velocidad del fluido
- L_{pila} : Alto del medio poroso (*ft*)
- j : Coeficiente de compactación del medio poroso

La dimensión de la ecuación se encuentra en pulgadas de columna de agua, por lo que se debe convertir a Pascales multiplicando el valor por 249.

La velocidad promedio dentro del medio poroso se determina a través de la siguiente ecuación.

$$V_{pila} = \frac{Q_c}{W_{pila} \cdot S_c/12} \quad (4.7)$$

Donde:

- V_{pila} : Velocidad promedio del aire dentro de la pila. (*fps*)
- Q_c : Flujo de aire dentro de la canaleta (*cfs*)
- W_{pila} : Ancho de la pila (*ft*)
- S_c : Distancia entre orificios de la canaleta (*in*)

Una vez determinada la pérdida de carga total dentro del sistema se calcula la potencia ideal del ventilador requerida a partir de la presión total y el caudal máximo requerido.

$$P_i = Q_{max} \cdot \Delta P \quad (4.8)$$

Donde:

- P_i : Potencial ideal del ventilador (W)
- Q_{max} : Flujo de aire máximo (m^3/s)
- ΔP : Pérdida de carga total ($Pa, N/m^2$)

Junto con la eficiencia del ventilador, se obtiene finalmente la potencia real requerida.

$$P = \mu \cdot P_i \quad (4.9)$$

Donde:

- P : Potencia real solicitada (W)
- μ : Eficiencia del ventilador
- P_i : Potencia ideal del ventilador (W)

4.4. Recuperación de calor

El sistema de recuperación de calor de la planta de compostaje tiene como objetivo extraer el exceso de calor del proceso aeróbico y aprovechar este para distintos fines dentro de la planta como calentar agua o calefaccionar por medio de un piso radiante. Este sistema consiste en un intercambiador de tubos y carcasa el cual cede el calor del vapor de agua proveniente del proceso de compostaje a los tubos donde fluye agua.

La metodología utilizada para la recuperación de calor se basa en el dimensionamiento de un intercambiador de tubos y carcasa capaz de recuperar parte del calor de los gases de escape y entregárselo a una red de agua para aprovechar esta energía dentro de la planta.

Se diseña el intercambiador de calor en base al flujo de aire máximo determinado. Asumiendo que los gases de escape se comporta como aire húmedo saturado, se calculan las entalpías de entrada y salida en función de las temperaturas respectivas utilizando la fórmula siguiente.

$$H = C_B(T_g - T_0) + Y'[C_A(T_g - T_0) + \lambda_0] \quad (4.10)$$

Donde:

- H : Entalpía del aire húmedo (kJ/kg)
- C_A : Calor específico del vapor de agua (kJ/kgK)
- C_B : Calor específico del aire (kJ/kgK)
- T_g : Temperatura del gas ($^{\circ}C$)
- T_0 : Temperatura de referencia, $0^{\circ}C$
- λ_0 : Calor latente del vapor de agua a $0^{\circ}C$ (kJ/kg)
- Y' : Humedad absoluta

Se calcula la humedad relativa a través de la ecuación.

$$Y' = 0,622 \frac{p_A}{p_t - p_A} \quad (4.11)$$

Donde:

- Y' : Humedad absoluta
- p_A : Presión parcial del vapor (bar)
- p_T : Presión total (bar)

A partir del flujo másico de los gases y sus respectivas entalpías de entrada y salida se calcula el flujo de calor del fluido caliente, usando la ecuación 4.12.

$$\dot{Q} = \dot{m}(H_{in} - H_{out}) \quad (4.12)$$

Por el lado del fluido frío, se considera agua en estado líquido y se calculan las entalpías usando el calor específico y temperaturas respectivas de entrada y salida del fluido, a partir de la ecuación 4.13.

$$\dot{Q} = \dot{m}c_p(T_{in} - T_{out}) \quad (4.13)$$

Donde:

- \dot{Q} : Flujo de calor (W)
- \dot{m} : Flujo de aire (kg/s)
- c_p : Capacidad calórica del aire (J/kgK)
- T_{in} : Temperatura de entrada del fluido ($^{\circ}C$)
- T_{out} : Temperatura de salida del fluido ($^{\circ}C$)

Se realiza un balance de energía entre el fluido caliente y el fluido frío teniendo ya determinadas las temperaturas de entrada y salida para ambos fluidos. Luego se fija el flujo del fluido caliente en relación al flujo de aire pico y se obtiene finalmente el flujo del fluido frío.

Una vez obtenida la transferencia de calor dentro del intercambiador se calcula la superficie de transferencia de calor preliminar utilizando la ecuación de transferencia de calor.

$$\dot{Q} = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \quad (4.14)$$

Donde:

- \dot{Q} : Flujo de calor (W)
- U : Coeficiente total de transferencia de calor (W/m^2K)
- A : Superficie de transferencia de calor (kg/s)
- ΔT_{ln} : Diferencia de temperatura media logarítmica

Se calcula coeficiente total de transferencia de calor U del intercambiador de calor a través de la ecuación 4.15

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{L_1}{k_1} + \frac{1}{h_2}} \quad (4.15)$$

- U : Coeficiente total de transferencia de calor (W/m^2K)
- h_1 : Coeficiente de convección del fluido frío (W/m^2K)
- h_2 : Coeficiente de convección del fluido caliente (W/m^2K)
- L_1 : Espesor del material intermedio (m)
- k_1 : Coeficiente de conductividad térmica del material intermedio (W/mK)

Por otro lado, la diferencia de temperatura media logarítmica se calcula a través de la ecuación 4.16, considerando contraflujo dentro del intercambiador de calor.

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (4.16)$$

Donde:

- $\Delta T_1 = T_{h,in} - T_{c,out}$ (K)
- $\Delta T_2 = T_{h,out} - T_{c,in}$ (K)
- $T_{h,in}$: Temperatura de el fluido caliente en la entrada (K)
- $T_{c,in}$: Temperatura de el fluido frío en la entrada (K)
- $T_{h,out}$: Temperatura de el fluido caliente en la salida (K)
- $T_{c,out}$: Temperatura de el fluido frío en la salida (K)

Capítulo 5

Resultados

5.1. Estimación de procesamiento

La estimación para la capacidad de procesamiento de la planta de compostaje comienza estimando la generación de residuos orgánicos municipales per cápita en la Región de La Araucanía. A través del Sistema Nacional de Declaración de Residuos (SINADER), se obtiene la generación anual de residuos municipales en la Región de la Araucanía. Luego, a partir de la población total en la región y el factor de 0,58 asociado a los residuos orgánicos, se obtiene la generación anual de residuos orgánicos municipales per cápita.

Tabla 5.1: Datos relacionados a la generación de residuos municipales en la Región de La Araucanía.

Generación de residuos municipales	313288945,4 kg/año
Población (2017)	957224 hab
Generación de residuos municipales per cápita	327,3 kg/hab año
Generación de residuos orgánicos municipales per cápita	189,8 kg/hab año

En base a la capacidad de procesamiento de la planta en toneladas de materia orgánica por año, se obtiene el porcentaje que esta podría cubrir en cada comuna. Se realiza este cálculo para todas las comunas para tres capacidades, 1000, 2000 y 4000 toneladas de residuos orgánicos municipales al año. La Tabla 5.2 muestra la distribución de las comunas teniendo como rangos el 30 %, 60 % y 100 %. Para las tres capacidades, se observa que con 2000 toneladas anuales de residuos orgánicos municipales, se ubican la mayoría de los municipios entre el 30 % y el 100 %. Si se disminuye la capacidad a 1000 toneladas anuales, la mayoría de las comunas no alcanza a superar el 30 % de cobertura, mientras que si se aumenta la capacidad a 4000 toneladas, la mitad de las comunas contarían con sobrecobertura.

Tabla 5.2: Distribución de coberturas de residuos orgánicos municipales para las comunas en la provincia de Cautín.

Rango (%)	Capacidad (ton/año)		
	1000	2000	4000
0-30	11	4	2
30-60	7	7	2
60-100	3	6	7
100+	0	4	10

Se selecciona por lo tanto una capacidad de 2000 toneladas de residuos orgánicos municipales, con la cual se entregaría una cobertura entre el 30 % y el 100 % para la mayoría de las comunas. A continuación se muestra en la Tabla 5.3 los distintos porcentajes de residuos orgánicos potencialmente revalorizables dada la capacidad de la planta.

Tabla 5.3: Porcentaje de residuos orgánicos municipales revalorizables por comuna con una capacidad de planta de 2000 toneladas anuales de residuos orgánicos municipales.

Comuna	Población (2017)	Residuos orgánicos anuales (ton/año)	Cobertura (%)
Melipeuco	6138	1165,2	171,6
Perquenco	6905	1310,8	152,6
Curarrehue	7489	1421,7	140,7
Toltén	9722	1845,6	108,4
Cholchol	11611	2204,2	90,7
Galvarino	11996	2277,2	87,8
Saavedra	12450	2363,4	84,6
Gorbea	14414	2736,3	73,1
Teodoro Schmidt	15045	2856,1	70,0
Cunco	17526	3327	60,1
Loncoche	23612	4482,4	44,6
Carahue	24533	4657,2	42,9
Freire	24606	4671,1	42,8
Pitrufoquén	24837	4714,9	42,4
Vilcún	28151	5344	37,4
Pucón	28523	5414,6	36,9
Nueva Imperial	32510	6171,5	32,4
Lautaro	38013	7216,2	27,7
Villarrica	55478	10531,6	19,0
Padre Las Casas	76126	14451,3	13,8
Temuco	282415	53612	3,7

5.2. Selección de comunas

Se seleccionan las comunas en donde la planta tenga una cobertura entre el 30 % y el 100 %, y en donde circule la Ruta 5 a través de esta. Se muestra esta selección en la Tabla 5.4.

Tabla 5.4: Selección de comunas ideales para la ejecución de un piloto.

Comuna	Cobertura (%)
Pitrufoquén	42,4
Freire	42,8
Loncoche	44,6
Gorbea	73,1

5.3. Dimensionamiento zona de fermentación

Con una densidad de la pila de $700 \text{ kg}/\text{m}^3$, se dimensiona la pila cumpliendo la restricción de altura, la cual no puede superar 1,8 metros. Se ajustaron los valores de largo y ancho y se dejó el alto en función del ancho tal que este sea un tercio del ancho de la pila.

Tabla 5.5: Dimensiones seleccionadas para la pila a formarse en un lote dentro de la zona de fermentación.

Dimensión	Valor
Largo	12 m
Ancho	5 m
Alto	1,66 m
Volumen	$66,66 \text{ m}^3$
Peso	46666 kg

5.4. Layout general de la planta

Se desarrolla un layout para la planta el cual incluye todos los espacios necesarios para llevar a cabo la totalidad del proceso. Estos espacios estarían dedicados al pretratamiento de los residuos, la fermentación y el post-tratamiento de estos, junto a los espacios adicionales requeridos para la correcta ejecución del proceso.

A continuación se muestra en la Figura 5.1 la disposición o layout de la planta de compostaje.

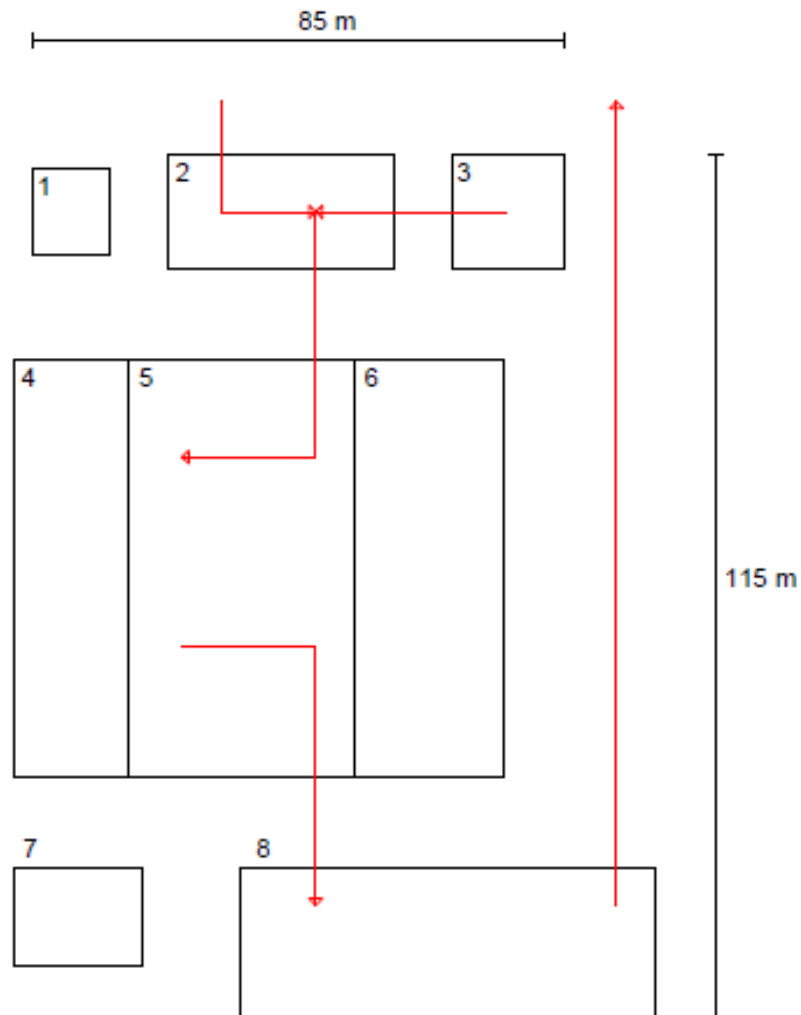


Figura 5.1: Layout general de la planta.

Se describe en la Tabla 5.6 los espacios contemplados dentro del layout junto con sus dimensiones correspondientes.

Tabla 5.6: Detalle de la disposición general de la planta.

N°	Espacio	Dimensión (m x m)	Superficie (m^2)
1	Sala de control	10 x 10	100
2	Zona de pre-tratamiento	30 x 15	450
3	Galpón de almacenamiento biomasa lignocelulósica	15 x 15	225
4	Sistema de ventilación y recuperación de calor	15 x 56	840
5	Zona proceso de compostaje	30 x 56	1680
6	Zona de maquinarias	20 x 56	1120
7	Biofiltro	17 x 13	221
8	Galpón post-tratamiento	55 x 20	1110

En total, el terreno necesario para la instalación de la planta es de 115 x 85 metros, teniendo en consideración una separación de 12 metros entre cada zona. Esto entrega una superficie total de 9775 metros cuadrados

Las flechas rojas en la Figura 5.1 indican el flujo del proceso, el cual comienza en la zona de pretratamiento, donde los residuos orgánicos municipales son depositados y mezclados con biomasa lignocelulósica. Luego se transporta la mezcla a la zona de fermentación, situándola en uno de los lotes respectivos. Una vez finalizada esta etapa se traslada la materia orgánica al galpón de post-tratamiento, en donde se lleva a cabo el proceso de maduración del compost. Finalmente, se pasa el compost por un tamiz de tambor rotatorio y se envía el producto final al distribuidor.

Tantolos galpones de almacenamiento y post-tratamiento, como la zona de fermentación deben ser techados, con el fin de proteger la materia orgánica de las precipitaciones frecuentes en la región.

5.5. Sistema de ventilación

5.5.1. Flujo de aire

Para diseñar el sistema de ventilación se define en primer lugar el tipo de control y el caudal máximo de operación. Se opta por un control de encendido/apagado en base a el requerimiento de aireación del compost. Se escoge un flujo de aire máximo de 0,6 L/min por kilo de compost, valor ideal para la degradación de residuos orgánicos municipales según M. Rasapoor[7]. Luego, se establece un control de aireación de 7,5 minutos y 22,5 minutos apagado, lo que se traduce que dentro de una hora, el flujo de aire permanece activo el 25 % de esta. Esto significa que el flujo de aire se debe multiplicar por 4 para alcanzar el requerimiento de aireación necesario.

Considerando que, en régimen máximo, se ventilarán 2 pilas de compost simultáneamente, equivalentes a un total de 93333 kg, y una densidad del aire a 60° de 0,981 kg/m³, se obtiene el flujo de aire máximo en kg/s (Tabla 5.7.

Tabla 5.7: Valores de los flujos de aire requeridos.

Flujo de aire máximo requerido por kilo de compost		Flujo de aire máximo requerido	
$L/min kg_c$	$m^3/h kg_c$	m^3/h	kg/s
2,4	0,144	13440	3,66

Se ajusta finalmente el flujo de aire máximo a 4 kg/s, con tal de darle un margen al sistema (Tabla 5.8)

Tabla 5.8: Valores para el flujo de aire máximo ajustado.

Flujo de aire máximo	
m^3/h	kg/s
14679	4

Teniendo contemplado una duración de 6 semanas para el proceso de fermentación, se separa el proceso en 10 etapas por las que pasará cada lote. Cada etapa tiene una duración de 4 días, entregando un total de 40 días para todo el proceso.

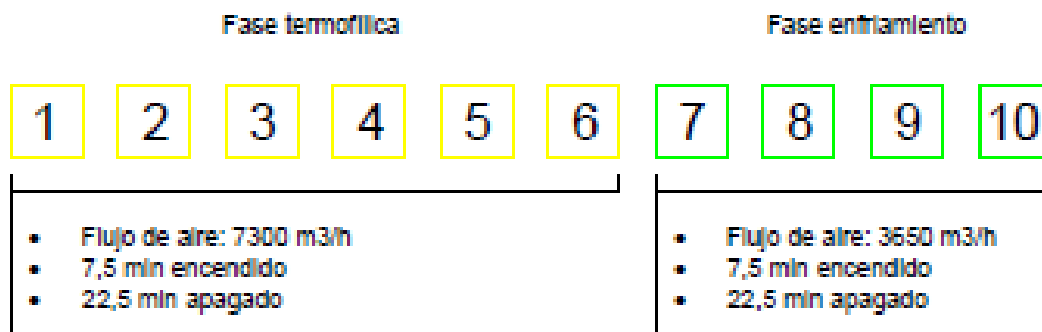


Figura 5.2: Esquema de las etapas para un lote en el proceso de fermentación.

Dentro de 30 minutos, el esquema de aireación sería el siguiente:

- 0 a minuto 7,5: Se activa la ventilación para los lotes que se encuentran en las etapas 1 y 2.
- Minuto 7,5 a minuto 15: Se activa la ventilación para los lotes que se encuentran en las etapas 3 y 4.
- Minuto 15 a minuto 22,5: Se activa la ventilación para los lotes que se encuentran en las etapas 5 y 6.
- Minuto 22,5 a minuto 30: Se activa la ventilación para los lotes que se encuentran en las etapas 7, 8, 9 y 10.

Para dimensionar el sistema de ventilación se divide este en 5 secciones, descritas en la Tabla 5.9.

Tabla 5.9: Descripción de las secciones del sistema de ventilación junto con sus largos respectivos.

Sección	Nombre	Largo total (m)
1	Canaletas del lote de compostaje	37
2	Conector de la canaletas al manifold	3,9
3	Manifold principal	78
4	Tubería de extracción	14
5	Canaletas del biofiltro	37

El flujo de aire dentro de una canaleta corresponde a la sexta parte del flujo máximo total, ya que, asumiendo una distribución equitativa del flujo, se ventilarán 2 lotes simultáneamente cada uno con tres canaletas.

Se optó por canaletas rectangulares de concreto con una cubierta de madera contrachapada con orificios circulares para permitir la circulación de aire a través de esta. Se calcula el diámetro hidráulica de la canaleta a través de la ecuación 4.3.

Tabla 5.10: Dimensiones de las canaletas del lote de compostaje y del biofiltro.

Dimensión	Valor	Unidad
Flujo	2433,33	m^3/h
Ancho	0,3	m
Alto	0,4	m
D_h	0,343	m
Área	0,092	m^2
Velocidad	7,32	m/s

Los orificios se separan cada un pie de distancia o 0,3 metros. Con dos orificios alineados, esto entrega un total de 76 orificios. Para que la suma del área de todos los orificios sea igual al área de la sección de la canaleta, estos deben tener un diámetro de 0,039 m.

Tabla 5.11: Dimensión de los orificios de una canaleta.

Dimensión	Valor	Unidad
Flujo	2433,33	m^3/s
Diámetro	0,039	m
N orificios	76	
Área	0,092	m^2
Velocidad	7,32	m/s

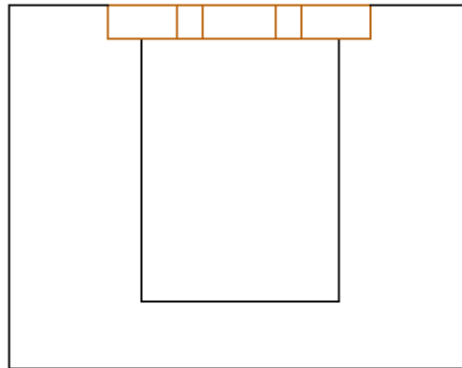


Figura 5.3: Sección transversal de la canaleta.

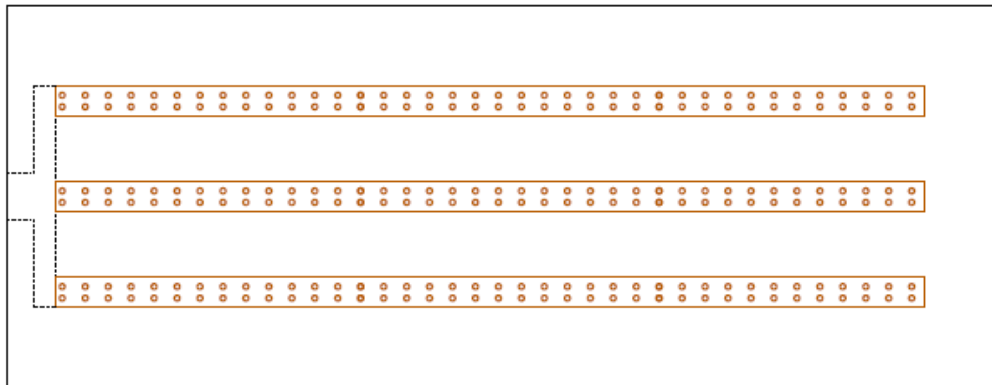


Figura 5.4: Vista superior de la canaleta.

Para el conector al manifold se opta por una tubería circular con un diámetro de 0,6 m, la cual se conecta con el manifold principal ubicado a 3 metros sobre el suelo. En el punto de conexión inferior se conecta además una tubería que dirige el condensado y lixiviados al estanque de almacenamiento de estos.

Tabla 5.12: Dimensiones del conector de las canaletas al manifold.

Dimensión	Valor	Unidad
Flujo	7300	m^3/h
Diámetro	0,6	m
Área	0,283	m^2
Velocidad	7,17	m/s

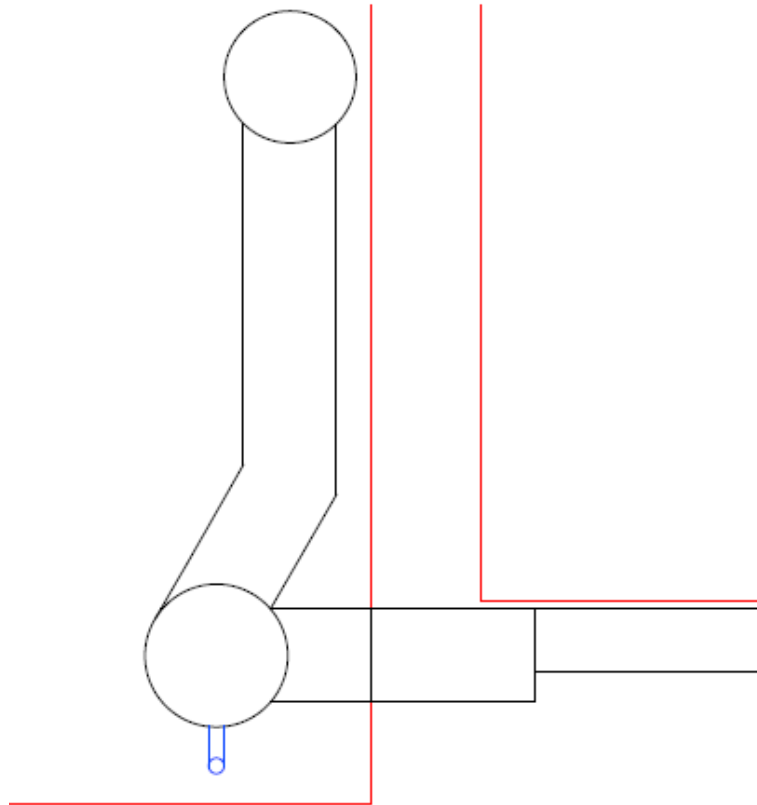


Figura 5.5: Vista lateral de la conexión entre las canaletas y el manifold principal.

El manifold principal es una tubería con un diámetro de 0,85 m, en la cual se conectan los 10 lotes, circulando el aire hacia el exterior.

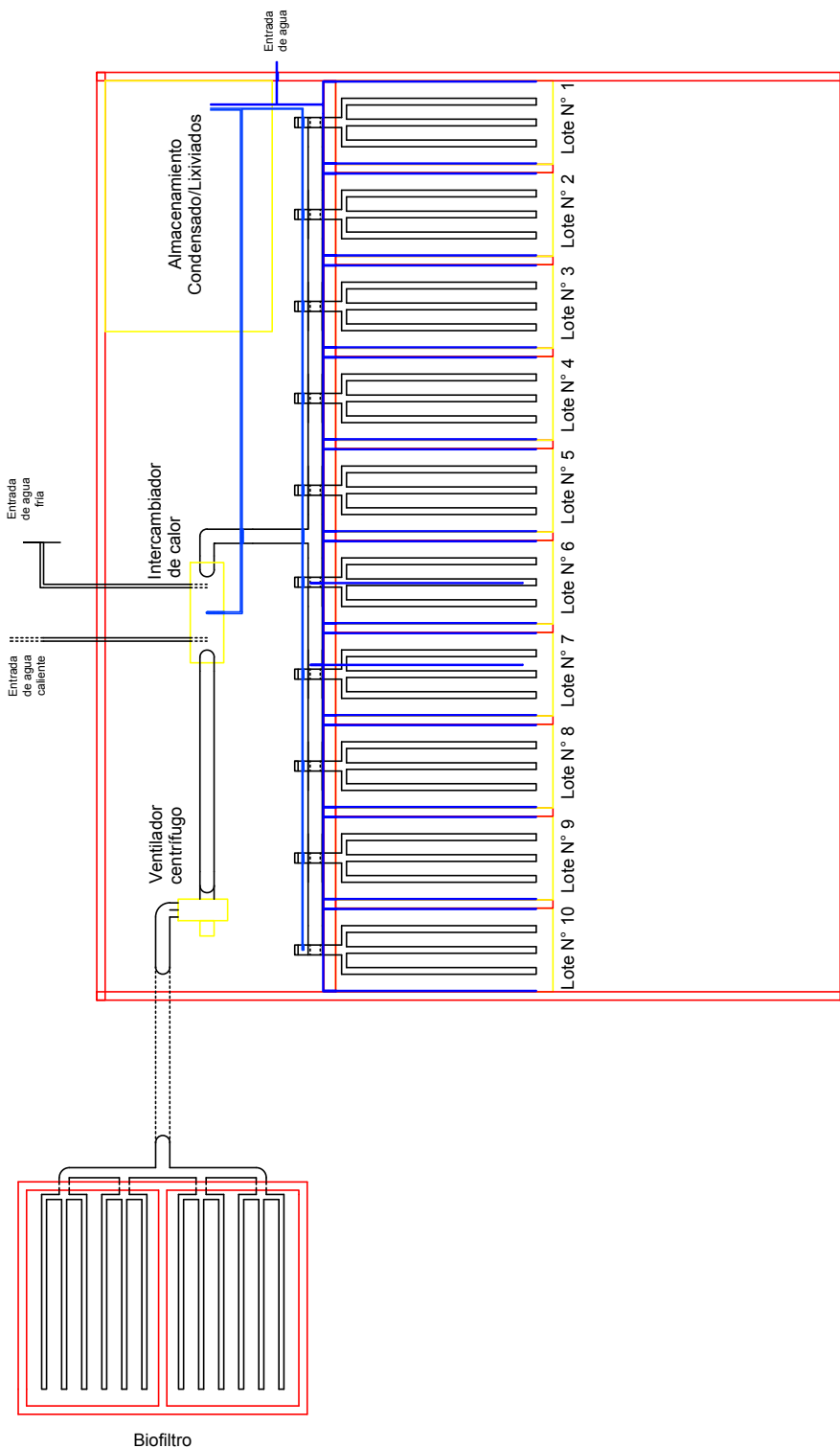
Tabla 5.13: Dimensiones del manifold principal y la tubería de extracción.

Dimensión	Valor	Unidad
Flujo	14600	m^3/h
Diámetro	0,85	m
Área	0,567	m
Velocidad	7,15	m/s

Se optó como material plástico PVC con cubierta de aislación térmica para las secciones 2, 3 y 4.

A continuación se muestra el plano para el sistema de ventilación para la zona de fermentación de la planta.

Figura 5.6: Zona de fermentación de la planta de compostaje.



5.5.2. Pérdidas de carga

Se calculan las pérdidas de carga asociadas a las canaletas y tuberías del sistema de ventilación y a las pilas de compost y el biofiltro utilizado.

Se ha despreciado la pérdida de carga debido a singularidades tales como las válvulas y codos dentro del sistema de ventilación.

Se definen las siguientes pérdidas de carga ocurridas a lo largo del sistema de ventilación.

- ΔP_1 : Pérdida de carga asociada a las canaletas (sección 1).
- ΔP_2 : Pérdida de carga asociada al conector de la canaleta al manifold (sección 2).
- ΔP_3 : Pérdida de carga asociada al manifold principal y la tubería de extracción (sección 3 y 4).
- ΔP_4 : Pérdida de carga dentro de la pila de compost.
- ΔP_5 : Pérdida de carga dentro del biofiltro.

Se obtienen las pérdidas de carga asociadas al sistema de ventilación, utilizando la ecuación 4.4. Los resultados de estas se presentan a continuación en la Tabla 5.14.

Tabla 5.14: Pérdidas de carga asociadas al sistema de ventilación.

ΔP	e (mm)	D (m)	e/D	f	L (m)	Re	ΔP (Pa)
ΔP_1	0,04	0,34	0,000117647	0,019	148	135662	217
ΔP_2	0,0015	0,6	0,0000025	0,016	7,8	234518	5
ΔP_3	0,0015	0,85	1,76471E-06	0,016	50,75	331084	25

El valor para el número de Reynolds se calcula a partir de la ecuación 4.5, teniendo como valores para la densidad y viscosidad dinámica del aire de $\rho = 0,981kg/m^3$ y $\mu = 0,000018kg/ms$ respectivamente.

Para la rugosidad se tomaron los valores de concreto suave igual a $e = 0,04mm$ para las canaletas y para el resto del sistema se tomó el valor del plástico igual a $e = 0,0015mm$. Esto junto al diámetro respectivo de cada sección entrega el valor para la rugosidad relativa.

Teniendo los valores para el número de Reynolds y la rugosidad relativa, se encuentran los valores para el factor de fricción a través del diagrama de Moody. Finalmente se obtiene el valor para la pérdida de carga usando la ecuación 4.4.

Luego se calculan las pérdidas de carga asociadas al las pilas de compost y el biofiltro. Para el biofiltro, se escogen los valores de los coeficientes k, j y n determinados para una mezcla de astillas de madera nuevas. Al no contar con los coeficientes para el compost, se utilizan los coeficientes determinados para astillas de madera usadas, por lo que la pérdida de carga de este puede verse sobrestimada.

Se calcula la velocidad promedio dentro de las pilas a través de la ecuación 4.7 y luego se calcula la pérdida de carga utilizando la ecuación 4.6.

Tabla 5.15: Velocidad promedio del aire dentro de la pila.

Dimensión	Valor	Unidad
Q_c	23,9	cfs
S_c	12	in
W_{pila}	16,4	ft
V_{pila}	1,46	fps

Tabla 5.16: Pérdida de carga asociada al compost y biofiltro.

ΔP	k	j	n	V (fps)	L (ft)	ΔP (in wc)	ΔP (Pa)
ΔP_4	0,539	1,08	1,74	1,54	3	3,40	847
ΔP_5	3,504	1,54	1,39	1,54	5,2	85,52	21293

Se observa que la pérdida de carga dentro del sistema se atribuye principalmente al flujo de aire dentro de las pilas de compost, al tratarse de un flujo dentro de un medio poroso.

5.5.3. Potencia del ventilador

Se calcula la potencia requerida por el ventilador para cumplir con el requerimiento de aire, a partir de las ecuaciones 4.8 y 4.9, entregando una potencia de 94,1 kW.

Tabla 5.17: Potencia ideal y requerida para el ventilador en el sistema de ventilación.

Dimensión	Valor	Unidad
Flujo de aire máximo	4,06	m^3/s
Pérdida de carga total	22275	Pa
Potencia ideal	90,3	kW
Potencia requerida	94,1	kW

5.6. Recuperación de calor

Se obtiene en primer lugar los valores para las entalpías utilizando las ecuaciones 4.10 y 4.11.

Tabla 5.18: Valores para la entalpía de entrada y salida para el fluido caliente, aire húmedo saturado.

Resultado	Valor para gas de entrada	Valor para gas de salida	Dimensión
H	91485,9	58760,7	kJ/kg
T_g	65	50	$^{\circ}C$
T_0	0	0	$^{\circ}C$
C_a	1926	1900	J/kg K
C_b	1007	1007	J/kg K
h_0	2501	2501	kJ/kg
Y_s	0,204	0,0863	
P_a	0,2503	0,1235	bar
P_t	1,014	1,014	bar

Se lleva a cabo luego el balance de energía entre el fluido caliente y el fluido frío por medio de las ecuaciones 4.10 y 4.13 y con una temperatura de entrada de $15^{\circ}C$ y una temperatura de salida de $40^{\circ}C$ para el fluido frío, se obtiene el flujo másico para el fluido frío de 1,25 kg/s.

En base a lo flujo de aire húmedo y a las entalpías correspondientes a las temperaturas de entrada y salida del aire, se obtiene finalmente un flujo de calor de 130,6 kW.

Tabla 5.19: Resultados para el balance de energía de los fluidos caliente y frío.

Fluido caliente Aire húmedo saturado			Fluido frío Agua		
Resultado	Valor	Dimensión	Resultado	Valor	Dimensión
\dot{m}	4	kg/s	\dot{m}	1,25	kg/s
H_{in}	91485,9	kJ/kg	c_p	4178	J/kg K
H_{out}	58760,7	kJ/s	$T_{c,in}$	15	$^{\circ}C$
$T_{h,in}$	60	$^{\circ}C$	$T_{c,out}$	40	$^{\circ}C$
$T_{h,out}$	50	$^{\circ}C$			
\dot{Q}	130,9	kW	\dot{Q}	130,6	kW

Para estimar luego la superficie preliminar del intercambiador de calor se calcula en primer lugar el coeficiente total de transferencia de calor y la diferencia de temperatura media logarítmica utilizando las ecuaciones 4.15 y 4.16.

Para el calcular el valor de U , se considera el coeficiente de convección de $100 \text{ W/m}^2\text{K}$ para el fluido caliente (h_1) y $6000 \text{ W/m}^2\text{K}$ para el fluido frío (h_2).

Tabla 5.20: Resultados para la superficie preliminar del intercambiador de calor.

Resultado	Valor	Dimensión
\dot{Q}	130,9	kW
U	98,3	$\text{W/m}^2\text{K}$
ΔT_{ln}	24,85	K
A	53,58	m^2

Tanto el calor recuperable como la superficie preliminar representan el valor máximo al no contemplarse las pérdidas de calor dentro del compost, su superficie de contacto y el sistema de ventilación.

5.7. Evaluación económica

La evaluación económica consiste en realizar una estimación del costo total de inversión y los ingresos anuales para entregar así una magnitud general para un proyecto de esta escala.

La estimación de la inversión se lleva a cabo en base a la construcción de las estructuras necesarias, el sistema de ventilación de la zona de fermentación y la maquinaria a utilizarse para la operación de la planta.

Tabla 5.21: Estimación de costos para la ejecución de la planta en pesos chilenos (CLP).

Ítem	Costo unitario	Unidad	Total	Costo Total
Estructuras				
Sala de control	600000	\$/m2	100	60000000
Zona pretratamiento	143000	\$/m3	135	19305000
Galpón almacenamiento espesante	125000	\$/m2	225	28125000
Galpón zona fermentación	125000	\$/m2	2500	312500000
Galpón postratamiento	125000	\$/m2	1100	137500000
Biofiltro	135000	\$/m3	19,5	2632500
Subtotal				560062500
Sistema de ventilación				
Tuberías	800	\$/m	220	1760000
Estanque 42000 L	20000000	\$/un	1-	20000000
Ventilador	98000000	\$/un	1	98000000
Intercambiador de calor	6000000	\$/un	1	6000000
Bomba sumergible	1000000	\$/un	1	1000000
Subtotal	-	-	-	126760000
Maquinaria				
Pala cargadora	125000000	un	2	250000000
Camión	50000000	un	1	50000000
Esparcidor de estiércol	5000000	un	1	5000000
Compost screener	5000000	un	1	5000000
Subtotal				310000000
Terreno				
	3102	\$/m2	15000	46530000
Total				
				1043352500

Para la ingresos de la planta se estima una producción de compost equivalente al 40 % de la capacidad total, es decir, 1600 toneladas.

Tabla 5.22: Estimación de ingresos anuales de la planta en pesos chilenos

Precio venta	Unidad	Cantidad (ton)	Total (millones de pesos)
0,150	\$/ton	1600	240

Capítulo 6

Trabajo siguiente

Queda pendiente revisar el cumplimiento de la Norma Chilena NCh 3382: 2016 “Gestión de residuos – Plantas de compostaje – Consideraciones para el diseño y operación”, con tal de determinar que el diseño se encuentre dentro de las consideraciones descritas en la norma.

Por otro lado, queda comparar en cuanto a costos el diseño en cuestión con otras soluciones constructivas como el compostaje en túnel y el compostaje abierto con piscina de lixiviados y así encontrar eventualmente una alternativa más costo eficiente.

Capítulo 7

Conclusiones

Se hizo un diseño de una planta de compostaje con una capacidad total de 4000 toneladas, de las cuales 2000 toneladas corresponden a residuos orgánicos municipales. A través de un catastro de la generación de residuos orgánicos municipales de las comunas de la Región y en base a un criterio de selección de cobertura y ubicación se seleccionaron las comunas de Freire, Pitrufquén, Gorbea y Loncoche como comunas ideales para la implementación de un proyecto piloto. La planta sería capaz de procesar los residuos orgánicos de alrededor de 10000 personas.

Para manejar tal capacidad, la planta debe contar con una superficie total de $9775 m^2$. EL gapón para la zona de fermentación cuenta con la mayor superficie necesaria del total, siendo esta $1680 m^2$.

El costo de inversión para la ejecución de un proyecto tal fluctúa entre los mil millones de pesos. Este costo viene principalmente de la construcción de las estructuras techadas necesarias para proteger el compost. Además, la incorporación del sistema de recuperación de calor aumentaría aún más el costo de inversión, al tener que aislar térmicamente el sistema de ventilación y el suelo de concreto en donde yacen las pilas.

Finalmente, la planta sería capaz de producir 1600 toneladas anuales de compost, lo cual equivaldría a 240 millones de pesos. .

Bibliografía

- [1] Ministerio de Medio Ambiente. (2020). Estrategia Nacional de Residuos Orgánicos.
- [2] Bernal, M., Sommer, S., Chadwick, D., Qing, C., Guoxue, L. and Michel, F., (2022). Current Approaches and Future Trends in Compost Quality Criteria for Agronomic, Environmental, and Human Health Benefits.
- [3] Haug, R., (1993), *The practical handbook of compost engineering*
- [4] Smith, M. M., Aber, J. D., Rynk, R. (2016). Heat Recovery from Composting: A Comprehensive Review of System Design, Recovery Rate, and Utilization. *Compost Science Utilization*, 25(sup1), S11–S22. <https://doi.org/10.1080/1065657x.2016.1233082>
- [5] Smith, M. M., Aber, J. D. (2018). Energy recovery from commercial-scale composting as a novel waste management strategy. *Applied Energy*, 211, 194–199. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.006>
- [6] Irvine, G., Lamont, E. R., Antizar-Ladislao, B. (2010). Energy from Waste: Reuse of Compost Heat as a Source of Renewable Energy. *International Journal of Chemical Engineering*, 2010, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2010/627930>
- [7] Rasapoor, M., Nasrabadi, T., Kamali, M., Hoveidi, H. (2009). The effects of aeration rate on generated compost quality, using aerated static pile method. *Waste Management*, 29(2), 570–573. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.04.012>