



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

ESTUDIO Y DISEÑO DE UN BIODIGESTOR PARA APLICACION EN PEQUEÑOS GANADEROS Y LECHEROS

MEMORIA PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERO CIVIL
MECANICO

JAVIER ANDRES PEREZ MEDEL

PROFESOR GUIA:
SR. ROBERTO CORVALAN PAIVA

MIEMBROS DE LA COMISION:
SR. MARCO ANTONIO BEJAR VEGA
SR. LEONEL NUÑEZ LAZO

SANTIAGO DE CHILE
MARZO 2010

INDICE

1.	Introducción.....	1
1.1.	Objetivo general	3
1.2.	Objetivos específicos.....	3
2.	Antecedentes.....	4
2.1.	Antecedentes económicos.....	4
2.1.1.	Ruralidad	4
2.1.2.	Situación Energética del sector involucrado	4
2.1.3.	Distribución de cabezas en el país.....	6
2.1.4.	Distribución de pequeños ganaderos y lecheros en el país.....	7
2.1.5.	Número de animales (Bovinos) por predio	7
2.2.	Biomasa	8
2.2.1.	Estiércol líquido y co-substratos.....	8
2.2.2.	Legislación Aplicable a la ganadería y los purines derivados.....	9
2.2.3.	Tratamientos aplicables a los purines.....	11
2.3.	Biogás	11
2.3.1.	Biogás comparado con otros gases basados en metano.....	12
2.3.2.	Componentes presentes en el biogás y sus efectos.....	13
2.3.3.	Efectos del CO ₂ en el biogás	14
2.3.4.	N ₂ y O ₂ presente en el biogás.	15
2.3.5.	Amoniaco presente en el biogás.	15
2.3.6.	Acido sulfhídrico presente en el biogás.....	16
2.3.7.	Siloxenos presentes en el biogás.	18
2.4.	Biodigestores	18
2.4.1.	Biodigestor del domo flotante (India)	19
2.4.2.	Biodigestor de domo fijo (China).....	19
2.4.3.	Biodigestor con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno	20
2.4.4.	Instalaciones industriales de biodigestión	20
2.5.	Reacciones bioquímicas en la generación de biogás	21
2.6.	Reacciones biológicas (Digestión Anaeróbica).....	22
2.6.1.	Hidrólisis	23
2.6.2.	Fase Acetogénica.....	25
2.6.3.	Fase metano génica.....	26
2.6.3.1.	Bacterias presentes en la etapa metanogénicas.....	27
2.7.	Parámetros en la producción de biogás	27
2.7.1.	Temperatura.....	28
2.7.2.	pH	29
2.7.3.	Potencial Redox.....	30
2.7.4.	Nutrientes (razón C/N/P).....	30
2.7.5.	Desintegración	30
2.8.	Ventajas y desventajas de los biodigestores anaeróbicos.....	31
2.8.1.	Ventajas de un biodigestor	31
2.8.2.	Desventajas de un biodigestor	31
2.9.	Conclusiones de antecedentes	32
2.10.	Metodología de trabajo.....	33

3.	Selección de la instalación.....	34
3.1.	Criterio de selección de tamaño del proyecto.....	34
3.1.1.	Potencial energético y ahorros esperados.....	34
3.1.2.	Inversión esperada en el estanque de biodigestión.....	36
3.1.3.	Inversión esperada en instalaciones.....	37
3.1.4.	Inversión esperada en sistemas de bombeo y piping.....	39
3.1.5.	Inversión esperada en equipo de generación eléctrica.....	39
3.1.6.	Curva de tiempo de recuperación del proyecto vs tamaño de plantel	40
3.2.	Proyecto abordado	42
3.2.1.	Criterio de tiempo de recuperación	42
3.2.2.	Diagrama de flujos de la instalación.....	42
3.2.1.	Balance másico de la instalación	43
3.2.2.	Biomasa y Producción de biogás.....	44
3.2.3.	Producción de sólidos y líquidos.....	44
3.2.4.	Manejo de residuos sólidos y líquidos.....	44
3.2.4.1.	Aplicación de purines al suelo.....	45
4.	Diseño básico de la instalación.....	47
4.1.	Layout de la instalación.....	47
4.2.	Diseño del estanque de biodigestión	48
4.2.1.	Parámetros de diseño.....	49
4.2.1.1.	Volumen requerido del biodigestor	49
4.2.1.2.	Substrato:	50
4.2.1.3.	Condiciones de operación:	50
4.2.1.4.	Geometría:	51
4.2.1.5.	Espesor del estanque.....	51
	Espesor de diseño	51
	Espesor hidrostático.....	51
	Espesor seleccionado	52
4.2.2.	Soporte del estanque.....	52
4.2.2.1.	Criterio de diseño	54
	Espesor del nervio del soporte para esfuerzo equivalente.....	54
4.3.	Diseño del sistema de bombeo	56
4.3.1.1.	Parámetro de diseño.....	56
4.3.1.2.	Cálculo diámetro de tuberías	57
4.3.1.3.	Espesor mínimo de tuberías.....	57
4.3.1.4.	Cálculo potencia de operación de la bomba	58
4.3.1.5.	Selección de la bomba	58
4.4.	Equipos complementarios	60
4.4.1.	Antorcha	60
4.4.2.	Agitador	60
4.4.2.1.	Parámetro de diseño.....	60
4.4.2.2.	Calculo del agitador.....	60
4.5.	Pérdidas y aportes de calor	61
4.5.1.	Calor aportado al fluido.....	61
4.5.2.	Pérdida de calor por las paredes	62
4.6.	Balance energético.....	63
5.	Conclusiones y comentarios	64

6.	Bibliografía.....	66
	A. Anexo I, Estándar API 650, Construcción de estanques de acero soldados.....	68
	B. Anexo II, Calculo balance de masas, Balances.xls.....	71
	C. Anexo III, Bombas Calpeda.	74
	D. Anexo IV, Generador eléctrico a biogás.	76

Abreviaciones

H_U	=	Poder calorífico superior [kcal/m ³].
H_L	=	Poder calorífico inferior [kcal/m ³].
W_{Un}	=	Índice de Wobbe superior [kJ/m ³].
W_{Ln}	=	Índice de Wobbe inferior [kJ/m ³].
M_s	=	Flujo másico del sustrato [Ton/día].
ρ_s	=	Densidad del sustrato [kg/m ³].
t_T	=	Tiempo de residencia en el estanque [H].
V_{bt1}	=	Flujo másico bomba desde el estanque [ton/H].
ΔP_{T1}	=	Presión de operación bombeo estanque [bar].
P_{BT1}	=	Potencia diseño bomba estanque [kW].
D_{at}	=	Diámetro del agitador [m].
N_{at}	=	Número de Newton agitador [-].
n_{at}	=	Velocidad de giro agitador estanque [rpm].
P_{atot}	=	Potencia consumida por el agitador del estanque [kW].
t_{at}	=	Tiempo de actuación del agitador [m].
$T_{i\max}$	=	Temperatura termofílica [°C].
T_{entnor}	=	Temperatura ambiente normal [°C].
ΔT_T	=	Variación temperatura entorno - estanque [°C].
α_{ii}	=	Coef. transf. de calor pared interna del estanque [W/(m ² K)].
α_{ie}	=	Coef. transf. de calor pared externa del estanque [W/(m ² K)].
λ_{est}	=	Coeficiente de transmisión de calor del poliestireno [W/(mK)].

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: JAVIER PEREZ M.
FECHA: ABRIL 2010
PROF. GUÍA: SR. ROBERTO CORVALAN PAIVA

ESTUDIO Y DISEÑO DE UN BIODIGESTOR PARA APLICACIÓN EN PEQUEÑOS GANADEROS Y LECHEROS

Esta memoria se motiva en la necesidad energética de los pequeños ganaderos y lecheros de la zona sur de Chile y en la débil situación de diversificación de la matriz energética del país, es por esto que se propone un Biodigestor como solución viable a esta necesidad.

Un Biodigestor es un equipo que produce gas metano (CH_4), a partir de la descomposición de restos orgánicos, particularmente heces animales (vacunos, porcinos, etc.). Aquí se propone el diseño en términos de ingeniería básica, de un Biodigestor adecuado para las necesidades introducidas.

La metodología comienza con una serie de análisis elementales que caracterizan el usuario medio del equipo, la demanda esperada, la cinética de los procesos bio-químicos presentes, las consideraciones de geometría y espacio utilizado, para concluir con los parámetros de diseño del Biodigestor y el posterior diseño.

Los recursos utilizados comprendieron un apoyo bibliográfico independiente con entidades públicas relacionadas al área económicamente involucrada como el INDAP, INE o Ministerio de Economía.

Se abordó un proyecto de instalación de biodigestión anaeróbica a nivel básico, utilizando un criterio económico que permite que la inversión del proyecto sea recuperada en 3 [años] y se realizó el diseño básico del estanque de biodigestión con sus componentes principales.

El resultado de esta memoria es un equipo de biodigestión anaeróbica que procesa 59 [m^3/mes] de purines de Bovino y produce 4,1 [m^3/H] promedio de biogás. Se contempló la incorporación de un equipo generador eléctrico que es alimentado por un caudal compatible de biogás y que permite que la energía eléctrica sea aprovechable.

1. Introducción

Chile es considerado un país con alto nivel de desarrollo con el ranking N° 40 a nivel mundial del índice de desarrollo humano^[1], dado lo anterior es preponderante cubrir adecuadamente las áreas que envuelven dicho desarrollo tales como salud, educación, vivienda, seguridad o suministros básicos (Agua, Luz y calefacción).

Un factor importante para la calidad de vida y por ende un aceptable nivel de desarrollo humano, es la pertenencia o no a los centros urbanizados, debido a que los recursos y las mejoras se concentran en estos centros en medidas considerablemente mayores que en las áreas rurales. En Chile la presencia de habitantes en el sector rural es mucho menor que en la urbana (14,5% del total), sin embargo, comparativamente, la población rural en la zona sur, representa porcentajes importantes del total de la población chilena. Si el enfoque es en el nivel de electrificación se observa que en las zonas urbanas se cumple totalmente la prestación del servicio (100%). Lo anterior ha motivado la creación de programas que promuevan la electrificación rural como el PER¹.

Una vía común de solución al problema de la falta de electrificación es la autogeneración. Esto comúnmente se propone en áreas lejanas a los tendidos eléctricos (como muchas zonas rurales), en las cuales los costos y los impedimentos técnicos dificultan la pertenencia a un sistema domiciliario común con el resto del país. En la actualidad existen variadas alternativas para la autogeneración a pequeña escala, tales como:

- Molinos de aprovechamiento de energía eólica.
- Celdas fotovoltaicas para aprovechamiento de energía solar.
- Utilización de biomasa.

La realidad rural del país crea la inquietud de aprovechar una de las principales actividades económicas de este grupo demográfico, la crianza de bovinos para engorda y el aprovechamiento de la leche y la carne. El desecho más abundante generado por los animales utilizados en esta actividad son las heces (materia fecal). Estos residuos orgánicos han tenido amplio estudio a través del tiempo para su utilización como biomasa, es decir como materia prima que permite la obtención de energía y particularmente la generación de biogás.

El biogás es un producto del metabolismo de ciertas bacterias que participan en la descomposición de tejidos orgánicos en ambiente húmedo y carente de oxígeno. A su vez, durante el proceso de descomposición, algunos compuestos orgánicos son transformados a minerales, los cuales pueden ser utilizados fácilmente como fertilizantes para los cultivos.

¹ Programa de Electrificación Rural, a cargo directamente de la subsecretaría de desarrollo regional y administrativo

La producción de biogás depende, principalmente, de los materiales utilizados, de la temperatura y del tiempo de descomposición. El proceso consiste en la descomposición anaeróbica, donde se puede obtener entre otros, etanol, metanol y gas metano. Esto no ocurre en un proceso de descomposición aeróbica donde el producto final es dióxido de carbono y agua (esto ocurre cuando, por ejemplo, se esparce el desecho en los predios).

Lo anteriormente señalado, a pesar de ser datos generales, permite concluir cuales serían las soluciones al problema de electrificación que actualmente poseen los sectores rurales de Chile; la presente memoria pretende diseñar un equipo que permita la obtención de biogás de manera segura, barata y confiable.

1.1. *Objetivo general*

El objetivo general es:

- Diseñar un biodigestor que cumpla con las necesidades energéticas de los pequeños ganaderos y lecheros presentes en las zonas rurales del sur de Chile y que sea técnica y económicamente viable.

1.2. *Objetivos específicos*

Los objetivos específicos son:

- Diseñar una instalación tipo para un productor ganadero/lechero de un tamaño sustentable.
- Efectuar el cálculo y diseño básico de los componentes principales de la instalación.
- Evaluar la factibilidad económica en términos del período de recuperación de la inversión.

2. Antecedentes

2.1. Antecedentes económicos

2.1.1. Ruralidad

Según el Instituto Nacional de Estadísticas (INE)^[18] y el Ministerio de Planificación (MIDEPLAN), se define la ruralidad de la siguiente manera:

“Conjunto de viviendas concentradas o dispersas con 1.000 habitantes o menos o en su defecto entre 1.001 y 2.000 donde menos del 50% de la población económicamente activa, se dedica a actividades secundarias y/o terciarias.”

2.1.2. Situación Energética del sector involucrado

La realidad energética de Chile difiere si se habla de los centros urbanizados o de los centros rurales, es así como existe un porcentaje considerable de personas que carecen de electrificación en los entornos rurales y en particular un sector de la zona sur del país será estudiado en esta memoria, las regiones comprendida son:

- Región del Maule VII.
- Región del Bio Bio VIII.
- Región de la Araucanía IX.
- Región de los lagos X.
- Región de los ríos XIV².

Es importante destacar que muchos datos pertenecen a censos, encuestas y estudios previos a la creación de las dos nuevas regiones en Chile, es por esto que los análisis serán referidos a la designación anterior entendiéndose que se cubre el total de habitantes de interés.

Las regiones identificadas como zonas de estudio corresponden al 68% de las viviendas sin energía eléctrica del país y a su vez al 9% del total de viviendas rurales (con y sin energía) de la zona comprendida, todos estos según datos^[2] del año 2005.

Un paso importante fue la implementación gradual del Programa de Electrificación Rural (PER), el cual tenía como objetivo en sus orígenes la electrificación del 90% de la población del país, la evolución de este programa^[2] durante el periodo 1999 - 2005 se muestra en la tabla 2.1 y la evolución detallada en las regiones de interés se observa en la figura 2.1.

² A mediados del año 2007 la regionalización tuvo un hito importante donde se crearon 2 nuevas regiones XIV y XV.

Tabla 2.1: Distribución de viviendas sin electrificación

Región	Número de Viviendas sin Energía	Número de Viviendas sin energía
	1999	2005
I	689	704
II	195	11
III	610	1.008
IV	9.369	6.751
V	4.019	2.109
VI	9.860	3.448
VII	17.836	4.872
VIII	24.027	6.399
IX	25.903	9.621
X	36.417	9.080
XI	1.944	87
XII	560	263
RM	5.422	6
Total	136.851	44.359

Fuente ^[2]: Censo 2007

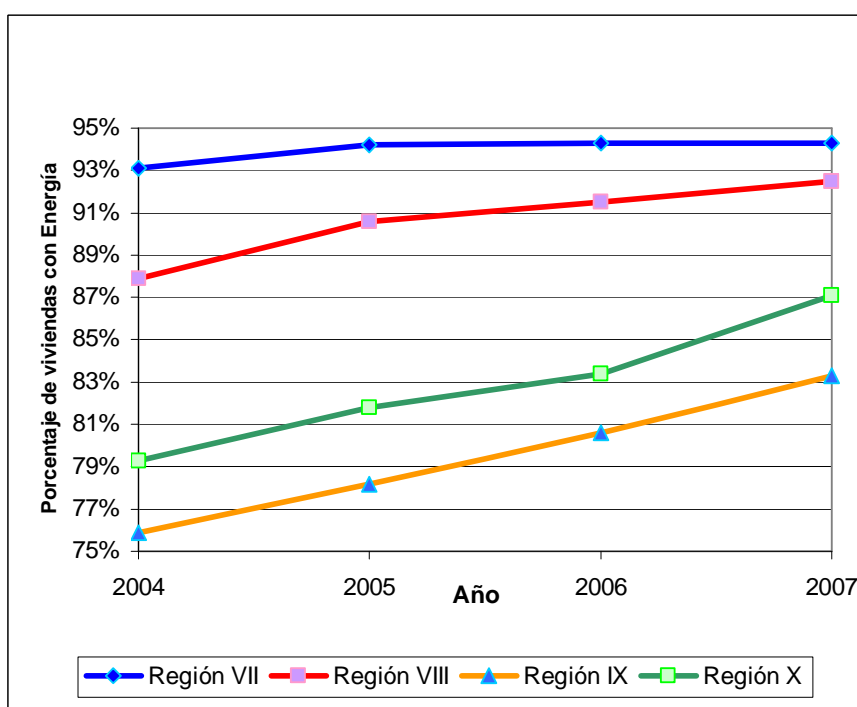


Figura 2.1: Evolución de la electrificación producto de la implementación del PER.

El interés en la autogeneración no fue objeto de la electrificación durante estos años, así se muestra en la figura 2.2 (fuente CNE)^[2]

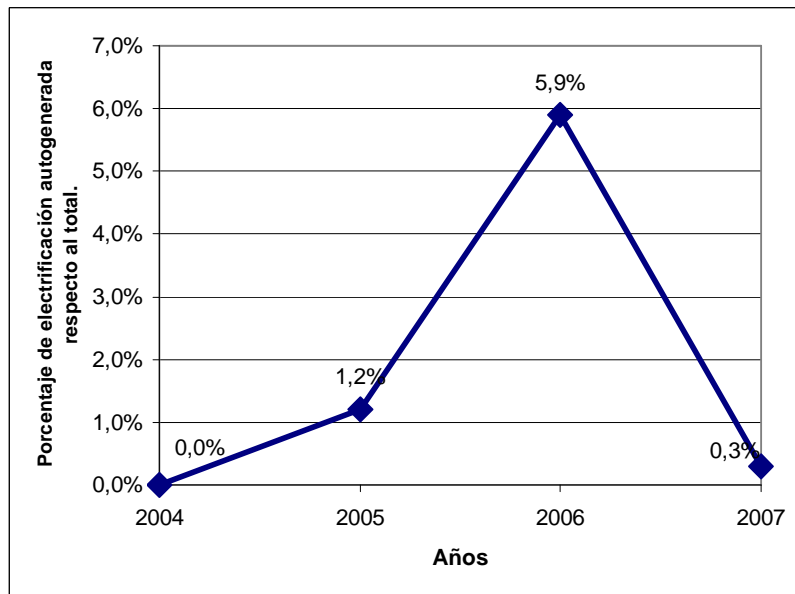


Figura 2.2: Porcentaje de electrificación en viviendas mediante autogeneración en Chile.

Como se observa en el Figura 2.2, la utilización de métodos de autogeneración cada año que se electrificó fue del orden del 1% salvo el año 2006 que superó el 5%, esto ilustra la participación histórica que han tenido las alternativas de energía renovable frente a las tradicionales.

2.1.3. Distribución de cabezas en el país

La distribución de cabezas en el país se concentra en las regiones VII, VIII, IX, X y XV; estas regiones están por sobre la media estadística, ver figura 2.3.

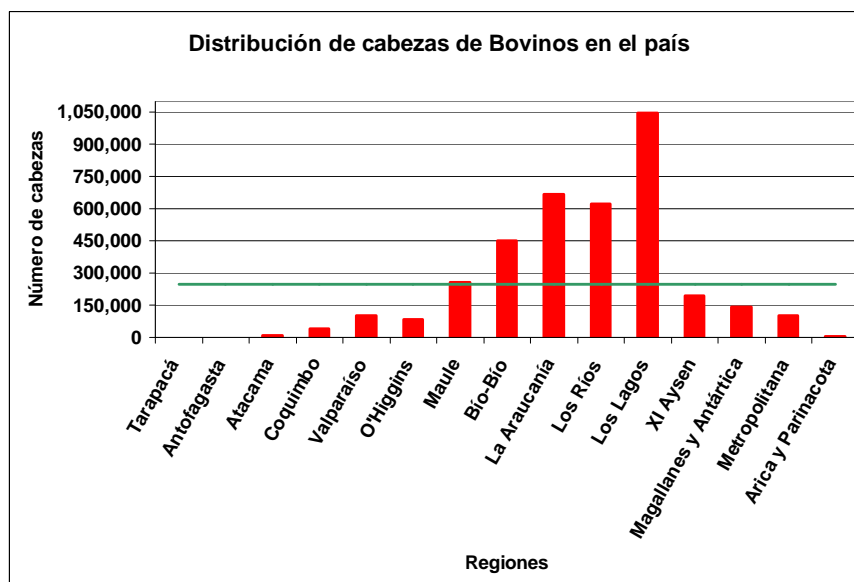


Figura 2.3: Distribución de cabezas de Bovinos en las regiones de Chile ^[3]

2.1.4. Distribución de pequeños ganaderos y lecheros en el país

La distribución de cabezas bovinas en el país y la distribución de pequeños ganaderos se correlacionan, en la figura 2.4 se muestra la distribución de AFC³ en el país.

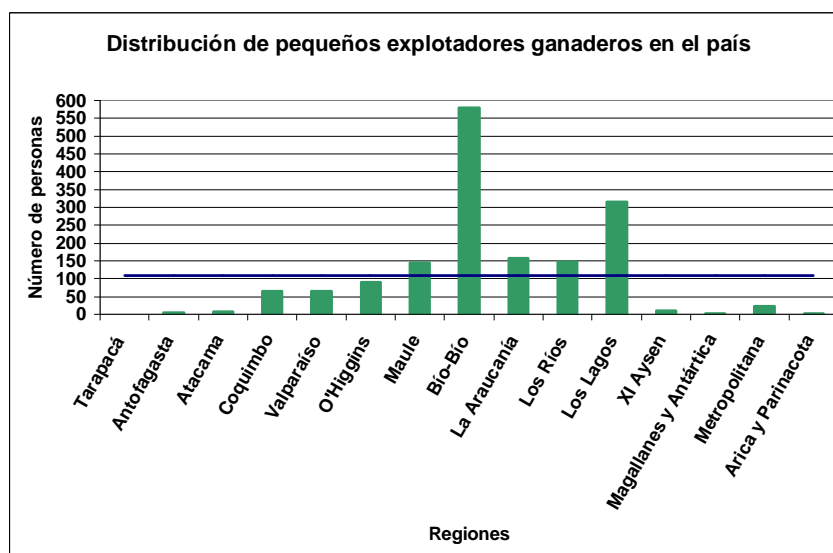


Figura 2.4: Distribución de cabezas de Bovinos en las regiones de Chile^[3]

2.1.5. Número de animales (Bovinos) por predio

A través de información del INE, se puede verificar el número de cabezas presentes en cada predio que se caracteriza como de pequeña economía agropecuaria, esto se observa en la tabla 2.2.

Tabla 2.2: Número de animales por predio en las regiones de interés

Región	Valor	Vaca	Vaquilla	Novillo	Ternero	Toro	Buey
VII	Media animales por predio	12	3	2	6	1	1
	Moda animales por predio	10	2	2	4	0	0
	desv. estándar	2,1	1,13	1,05	1,68	-	-
VIII	Media animales por predio	18	4	1	9	7	1
	Moda animales por predio	12	4	0	5	5	0
	desv. estándar	2,67	0,56	0,63	1,54	1,89	-
IX	Media animales por predio	20	5	1	9	8	2
	Moda animales por predio	16	4	1	8	6	1
	desv. estándar	3,66	1,01	0,62	2,32	2,62	-
X	Media animales por predio	23	9	2	9	8	2
	Moda animales por predio	16	7	2	7	6	0
	desv. estándar	3,79	1,78	0,84	1,66	2,13	-

Fuente^[3]: Censo agrícola 2007

³ AFC, Agricultura familiar campesina, catalogados según el INDAP, como grupo socioeconómico arraigado en los sectores rurales y que subsisten en una mezcla de actividades agropecuarias.

2.2. Biomasa

En general cualquier sustrato puede ser utilizado como biomasa en cuanto contengan carbohidratos, proteínas, grasas, celulosa y hemicelulosa como componentes principales. Para seleccionar la biomasa se deben tener en cuenta los siguientes puntos.

- El contenido de sustancias orgánicas debe ser el apropiado para el tipo de fermentación elegido.
- El valor nutricional de la sustancia orgánica se relaciona directamente con el potencial de formación de biogás, por ende se busca que sea lo más alto posible.
- El sustrato debe estar libre de agentes patógenos que puedan inhibir el proceso de fermentación.
- El contenido de sustancias perjudiciales o tóxicas debe ser controlado para permitir una tranquila evolución de la fermentación.
- Es importante que el resultado final del sustrato (después de haber aprovechado la fermentación para generar biogás) sea un desecho utilizable como por ejemplo fertilizante.

2.2.1. Estiércol líquido y co-sustratos

Como el principal sustrato disponible en el sector económico involucrado se refiere a los animales de aprovechamiento (carne, leche, engorda) se presenta una tabla con las equivalencias de excremento producido y potencial de generación de gas, ver tabla 2.3.

Tabla 2.3: Potencial de producción de biogás por animal^[4].

		UAE ⁴	Estiércol liq. [M3/animal]			Producción de gas M3/UAE/día
			Día	Mes	Año	
Bovinos	Vacas, vacunos de engorda	1	0,05	1,5	18,00	0,56 - 1,5
	Vacas de producción lechera	1,2	0,055	1,65	19,80	0,56 - 1,5
	Toro de reproducción	0,7	0,023	0,69	8,28	0,56 - 1,5
	Vacunos jóvenes < 2 años	0,6	0,025	0,75	9,00	0,56 - 1,5
	Ternero de crianza <1 año	0,2	0,008	0,24	2,88	0,56 - 1,5
	Ternero en engorda	0,3	0,004	0,12	1,44	0,56 - 1,5
Porcinos	Porcino de engorda	0,12	0,0045	0,135	1,62	0,6 - 1,25
	Porcina	0,34	0,0045	0,135	1,62	0,6 - 1,25
	Porcino jóvenes (<12 Kg.)	0,01	0,0045	0,135	1,62	0,6 - 1,25
	Porcino jóvenes (12 - 20 Kg.)	0,02	0,001	0,03	0,36	0,6 - 1,25
	Porcino jóvenes (20 - 45 Kg.)	0,06	0,003	0,09	1,08	0,6 - 1,25
	Porcino jóvenes (45 - 60 Kg.)	0,16	0,0045	0,135	1,62	0,6 - 1,25
Ovinos	Ovejas < 1 año	0,05	0,003	0,09	1,08	-
	Ovejas > 1 año	0,1	0,006	0,18	2,16	-
Equinos	Caballos < 3 años	0,7	0,023	0,69	8,28	-
	Caballos enanos	0,7	0,023	0,69	8,28	-
	Caballos > 3 años	1,1	0,033	0,99	11,88	-
Aves de criadero	Pollo de engorda < 1200 gr.	0,0023	0,0001	0,003	0,04	3,5 - 4
	Gallina < 1200 gr.	0,0023	0,0001	0,003	0,04	3,5 - 4
	Pollo < 800 gr.	0,0016	0,0001	0,003	0,04	3,5 - 4
	Gallina < 800 gr.	0,0016	0,0001	0,003	0,04	3,5 - 4

2.2.2. Legislación Aplicable a la ganadería y los purines derivados

Actualmente no existe normativa que señale explícitamente el deber de tratar los purines, sin embargo, su acumulación y disposición puede provocar daños a los suelos o los cursos superficiales y subterráneos, con lo cual se infringen algunas normas de la legislación chilena, esto incentiva indirectamente a que las empresas agropecuarias implementen algún sistema de tratamiento para tratarlos. A continuación se describen las principales normas y decretos relacionados con esta actividad.

- **Decreto Ley N° 3.557** de 1980 del Ministerio de Agricultura, que establece Disposiciones sobre Protección del Suelo, Agua y Aire. Este decreto establece los requerimientos que deben tener los envases de fertilizantes que son utilizados en la agricultura, para que no existan errores en las compras de los distintos productos, debiendo utilizarse aquello que no causen daño al medio ambiente y sean asimilados correctamente por los cultivos.

⁴ UAE: Unidad Animal Equivalente, base de conversión es una vaca o un vacuno de engorda.

- **D.F.L. N° 725** de 1967 del Ministerio de Salud, Código Sanitario. Diario Oficial, 31.01.1968. Artículos 71, 72, 73 y 75.
- **Norma Chilena Oficial NCh.1.333**, Requisitos de Calidad de Agua para Diferentes Usos.
- **Decreto Supremo N° 351** de 1992 del Ministerio de Obras Públicas. Diario Oficial, 17.02.1998. “Reglamento para la Neutralización y Depuración de los Residuos Líquidos Industriales a que se refiere la Ley N° 3.133”. Modificado por el Decreto Supremo N° 1.172/98.
- **Decreto con fuerza de ley N°294**. Establece funciones y estructuras del ministerio de agricultura. Ministerio de hacienda. Diario Oficial del 5 de abril de 1960.
- **Decreto Supremo N° 90/01**. Establece norma de emisión para la regulación de contaminantes asociados a las descargas de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales. Se debe tener especial cuidado en el destino de las descargas del agua tratada, la cual solo puede ser depositada a los cursos superficiales cercanos con concentraciones inferiores a las que establece la norma.
- **Norma NCh 1.333/Of. 87**. Requisitos de Calidad de Agua para Diferentes Usos. Esta norma es directamente aplicable a todos los predios.
- **Decreto Supremo N° 46/2002**. Norma de emisión de residuos líquidos a aguas subterráneas. Esta norma, en el artículo 2 establece que no es aplicable a las labores de riego, se debe cuidar el rebalse de los sistemas de tratamiento o almacenamiento y todo tipo de escurrimiento superficial que pueda ser potencial contaminante de los cursos superficiales.
- **Decreto Supremo N° 745/92, art. 16**. Prohibición de Descarga de Residuos en Cursos de Agua. Esta prohibición de descarga de residuos en cursos de agua, esta contenida en uno de los principales decretos que deben ser considerados y evaluados durante el desarrollo de este proyecto ya que una de los problemas que presenta el Fundo Santa Teresa es el rebalse de los purines hacia cursos de agua superficiales y por ende se encuentra infringiendo la ley
- **Ley 19.300** "Bases Generales del Medio Ambiente". Ministerio Secretaría General de la Presidencia. Diario Oficial, 09.04.94. La Ley de Bases del medio ambiente reconoce el derecho de las personas de vivir en un ambiente libre de contaminación, por lo que cualquier tipo de empresa debe respetar el derecho de las personas, incluyendo las pequeñas y medianas empresas, evitando la contaminación y degradación del medio ambiente.
- **Decreto Supremo N° 30** de 1997 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia, Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

2.2.3. Tratamientos aplicables a los purines

Los purines pueden considerarse de manera similar al agua residual domestica, con una carga orgánica de 15 a 80 veces mayor y alta generación de lodos, donde el tratamiento y eliminación de los residuos animales es más complicado por su naturaleza y por los grandes volúmenes en son generados.

Para el tratamiento de los purines es posible utilizar tanto los sistemas anaerobios como aerobios, sin embargo, según el aumento de la materia orgánica no permite mantener las condiciones aeróbicas durante las épocas de invierno^[5], lo que implica al menos seis a ocho semanas para estabilizar los sistemas aeróbicos durante la primavera, tiempo durante el cual la generación de olores es un problema significativo, que es casi imposible de eliminar.

El purín por si solo o mezclado con agua durante la limpieza de los alojamientos generalmente se encuentra con una concentración demasiado alta para ser descompuesto aeróbicamente en una estructura de tratamiento o almacenamiento de estiércol, debido a que el oxígeno no se puede disolver lo suficientemente rápido para soportar las bacterias aeróbicas. Por lo tanto, el estiércol se descompone secuencialmente en grupos de bacterias anaeróbicas^[6]

En estudios se ha logrado establecer que el tratamiento y eliminación de los residuos orgánicos animales (ganado) es complicado por su naturaleza y por el volumen a manejar.

Se ha concluido en estudios^[7] que el tratamiento anaerobio en lagunas ofrece una posibilidad para tratar grandes cantidades de purines que se originan en las locaciones donde se ubica el ganado en terrenos cerrados. En 1974 se concluyó por estudios^[7] que cuando las concentraciones de componentes orgánicos exceden de 4000 mg/L en lo que se refiere a la Demanda Química de oxígeno, los métodos anaerobios son más baratos que los métodos aerobios. En este ámbito se reafirma que para el tratamiento de residuos agrícolas ganadero el uso de sistemas anaerobios, sobre todo el de digestión son los procesos unitarios que más han contribuido a la reducción de la contaminación agrícola.

2.3. Biogás

El biogás^[8] está constituido principalmente de Metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y una serie de impurezas que dependen del origen primario del biogás, en la tabla 2.4, se muestran propiedades de un tipo estándar de biogás.

Tabla 2.4, Propiedades de una composición estándar de biogás

Composición	55-70% metano
	30-45% Dióxido de carbono
	Trazas de otros elemento
Energía contenida	6,0 – 6,5 Kwh./m ³
Equivalente en combustible	0,6 – 0,65 L _{petróleo} /m ³ _{biogás}
Limite de explosión	6 - 12 % biogás en el aire
Temperatura de ignición	650 - 750 ° C (según metano contenido indicado)
Presión crítica	75 89 bares.
Temperatura crítica	-82.5° C
Densidad normal	1,2 Kg./m ³
Olor	Huevos en mal estado
Masa molar	16,043 Kg./kmol

2.3.1. Biogás comparado con otros gases basados en metano

En general el metano posee las características que se muestran en la tabla 2.5.

Tabla 2.5, Características del metano

	Temperatura [°C]	Temperatura K	Presión [bar.]	Densidad [Kg./L]
Punto crítico	(-82,59)	190,56	45,98	0,162
Punto de ebullición a 1,013 bar.	(-161,52)	11,63	-	0,4226
Punto triple	(-182,47)	90,68	0,117	-

Fuente ^[4]

El gas más conocido que posee metano es el biogás, existen muchas variantes de gas natural dependiendo de su lugar de origen y se diferencian en su composición química, en su razón de elementos químicos y por ende en sus propiedades.

Internacionalmente Alemania lidera la utilización de Biogás, este procede en un 51% de Europa del Oeste (Dinamarca, Holanda, Noruega y Reino Unido) y un 31% se importa desde Rusia. Dependiendo del país de origen se pueden distinguir 5 diferentes calidades agrupadas según:

- H Gases
 - GUS gas
 - North sea gas
 - Compound gas
- L Gases
 - Holland gas
 - Osthannover gas

Las diferencias radican en el índice de Wobbe⁵, poder calorífico y contenido de metano

A su vez se puede establecer 4 niveles de calidad en la cadena de suministro del biogás:

- Local
- Regional
- Nacional
- Internacional

En la tabla 2.6, se muestran las características según el nivel de la cadena de distribución del biogás.

Tabla 2.6, Nivel de distribución del biogás

Nivel de presión	Presión [bar.]	Diámetro de tubería [mm]	Flujo [M/s]
Baja presión	<0,03	[50 - 60]	[0,5 - 3,5]
Baja presión	[0,03 - 0,1]	[50 - 60]	[1 - 10]
Media Presión	[0,1 - 1]	[100 - 400]	[7 -18]
Alta presión	[1 -16]	[300 - 600]	<20
Alta presión	[40 - 120]	[400 - 1600]	<20

Fuente: ^[4]

2.3.2. Componentes presentes en el biogás y sus efectos

Los componentes más comunes que se encuentran presentes en el biogás son:

- CO₂
- H₂S
- NH₃
- Vapor de agua
- Polvo
- N₂
- Siloxenos

Una tabla resumen se los efectos en el comportamiento del biogás se muestra a continuación (ver tabla 2.7).

⁵ Índice de Wobbe: Es un valor característico que describe la calidad del gas (basado en metano), se relaciona con los límites superior e inferior del valor calorífico, así se puede definir el índice de Wobbe superior

$W_{on} = \frac{H_{on}}{\sqrt{\rho}}$, el índice inferior de Wobbe se define: $W_{un} = \frac{H_{un}}{\sqrt{\rho}}$, con ρ , densidad relativa.

Tabla 2.7, Componentes del biogás y su efecto en las propiedades.

CO2	25 - 50 % vol	Baja el poder calorífico
		Incrementa el número de metano
		Causa corrosión
		Daña celdas alcalinas de combustible
H2S	0 - 0,5 % vol	Corrosión en equipos y piping
		Emisiones de SO2 después de los quemadores
		Emisión de H2S en combustión imperfecta
		Inhibición de la catálisis
NH3	0 - 0,05 % vol	Emisión de Nox
		Daño en las celdas de combustibles
Vapor de agua	1 - 5 % vol	Corrosión en equipos y piping
		Daños de instrumentación por condensado
		Riesgo de congelar y bloquear tuberías y válvulas
Polvo	> 5µm	Bloquea las boquillas y celdas de combustibles
N2	0 - 5 % vol	Baja el poder calorífico
Siloxenos	0 - 50 [mg/m3]	Actúan como abrasivos, daño en motores

Fuente [4]

2.3.3. Efectos del CO₂ en el biogás

La presencia de CO₂ en el gas se mide en la razón de CO₂/metano [% vol] y puede ser controlada parcialmente debido a que es esencial en la formación de metano en el gas por lo que no se busca hacerlo desaparecer.

Los factores que afectan la composición de CO₂ son:

- 1) La presencia de compuestos con largas cadenas de hidrocarburos por ejemplo compuestos con alto contenido en grasas ayudan a mejorar la calidad del gas cuidando de no afectar la acidez, la cantidad de átomos de Carbono presentes en el sustrato se relaciona directamente con el porcentaje en volumen de metano presente en el biogás, ver figura 2.5.
- 2) Generalmente la descomposición anaeróbica de la biomasa mejora con el tiempo de exposición, cercano el final del tiempo de residencia⁶ el contenido de metano aumenta desproporcionadamente a medida que el contenido de CO₂ va desactivando el proceso de hidrólisis.
- 3) El proceso de fermentación toma lugar de manera más rápida si el material en el reactor⁷ está distribuido homogéneamente.

⁶ Tiempo de residencia: Periodo en el cual se aprovecha la biomasa para extraer biogás, este varía según los el control de los parámetros y el sustrato o biomasa utilizada.

⁷ Reactor, lugar del biodigestor donde toma lugar la biodigestión.

- 4) Un alto contenido de líquido en el reactor influye en una alta concentración de CO₂ disuelto en el agua, lo que disminuye el nivel de CO₂ presente en la fase gaseosa.
- 5) A mayor temperatura de fermentación, disminuye la cantidad de CO₂ disuelto en el agua
- 6) Una alta presión durante el proceso lleva a una mayor concentración de CO₂ presente en el agua, esto se puede aprovechar si se purga material con alto contenido en CO₂ disuelto en el agua (claramente una vez iniciado el proceso de proliferación bacteriana).

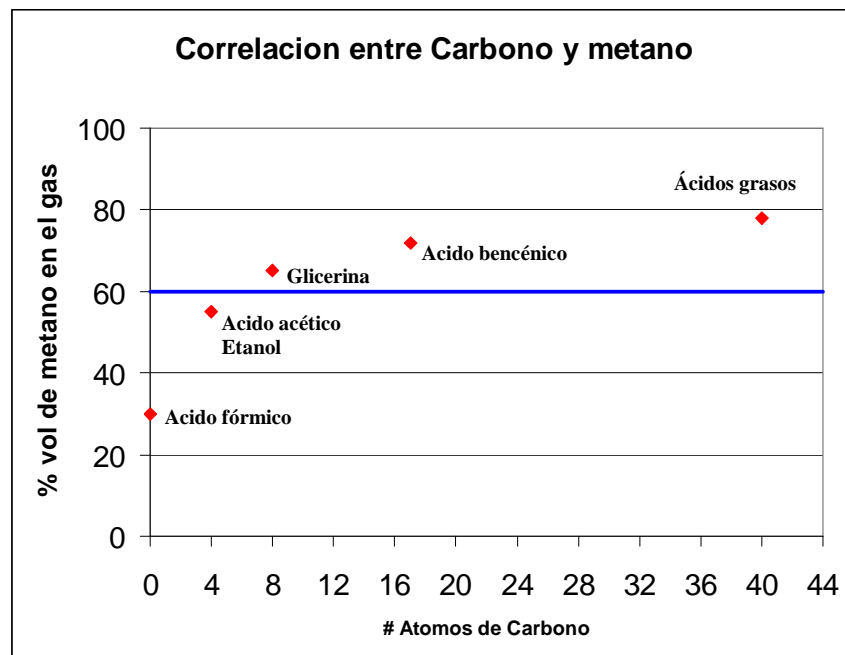


Figura 2.5, Correlación entre Átomos de carbono de la cadena y % Vol. de metano en el gas

2.3.4. N₂ y O₂ presente en el biogás.

El nitrógeno y oxígeno presente en el biogás se encuentran normalmente en proporción 4:1 y usualmente se incorporan en las etapas de ventilación que tienen como objetivo eliminar el ácido sulfhídrico presente en el reactor, estos gases pueden entrar también normalmente en pequeñas cantidades si el sistema de tuberías no está perfectamente hermético.

2.3.5. Amoníaco presente en el biogás.

Normalmente la concentración de amoníaco es baja (<0,1 mg/m³), cuando los substratos usados provienen de excremento de aves o algunos casos particulares de basura la presencia de amoníaco se puede incrementar hasta no superar los 1.5 mg/m³, por sobre este límite existe riesgo para los quemadores inclusive para la vida de los motores utilizados.

2.3.6. Acido sulfhídrico presente en el biogás.

La cantidad de H_2S presentes en los gases de escape depende principalmente del proceso utilizado para la obtención del biogás y del tipo de sustrato involucrado, si no existe un paso de desulfurización, la concentración de H_2S puede exceder el 0.2% vol.

Cuando el sustrato fermentado es viscoso el contenido de H_2S es menor que en el caso de un sustrato líquido.

Un objetivo primordial es mantener el contenido de acido sulfhídrico a los niveles más bajos posibles, porque aguas abajo la mayoría de los componentes sufren daños irreversibles debido al alto potencial de corrosión del H_2S , usualmente el biogás es desulfurizado aún mientras permanece en el reactor.

A través de un proceso de pre-desulfurización se puede ayudar a mantener un nivel inferior a 70 mg/m^3 cuando se utilizan co-sustratos o por debajo de 310 mg/m^3 en planta que utilizan excretas líquidas para la fermentación. A pesar de los esfuerzos, el H_2S siempre está presente en niveles altos.

El sulfuro de hidrógeno contenido en el biogás, junto a la humedad de éste, se convierte en ácido sulfúrico (H_2SO_4), el cual es nocivo para ciertos equipos como calentadores de agua, motores o refrigeradores^[9]. Por lo tanto, la reducción del sulfuro de hidrógeno se hace necesaria cuando el biogás presenta sobre 2% en volumen de este compuesto^[9]. Sin embargo, la desulfuración no es necesaria si el biogás contiene menos de 1% de este compuesto.

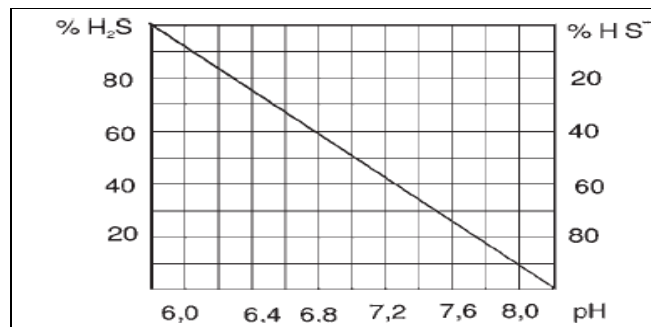


Figura 2.8. Disociación de H_2S en función del pH.

Con el fin de eliminar o disminuir el porcentaje de H_2S en el biogás se emplean sistemas de filtro con sustancias como cal viva o apagada, limadura de hierro o ciertos tipos de tierras conocidas como hematites parda o limonita, las cuales son ricas en sustancias ferrosas. Estas masas se regeneran al entrar en contacto con aire por lo que podrán ser usados nuevamente. La capacidad absorbente de esta masa depende de la cantidad de hierro que contengan. Una masa que contiene entre 5 a 10% de hidróxido de hierro puede absorber 15 [g] de sulfuro por kilo sin ser regenerada, pudiendo remover hasta 150 [g] de sulfuro al ser regenerada^[10].

Otra alternativa para la remoción de H_2S consiste en Biofiltros de lecho fijo, donde la fase móvil corresponde al gas, con soporte orgánico/sintético para la biomasa que se encuentra fija. Corresponde a uno de los sistemas de tratamiento más utilizado debido a sus bajos costos de operación, al bajo costo del material del medio filtrante y a los bajos consumos de agua, además de poseer una alta eficacia en la eliminación de distintos contaminantes, en particular el H_2S . No generan desechos como lodo y agua contaminada. Dentro de sus desventajas se encuentra el poco control frente a los fenómenos de reacción, la dificultad de control de pH ya que se trata con contaminantes que generan productos ácidos, el taponamiento generado por el exceso de biomasa y los grandes requisitos de espacio.

Los biofiltros consisten en una columna que contiene un material de empaque de elevada porosidad cuya función es dar soporte y en algunos casos servir como fuente de nutrientes a los microorganismos. Los microorganismos se encuentran formando parte de una capa que rodea al material filtrante denominada biopelícula.

A medida que el gas atraviesa el lecho poroso, los contaminantes solubles, son transferidos a los microorganismos debido a la existencia de un gradiente de concentración generado entre la fase gas y la biopelícula. Una vez en la biopelícula, los contaminantes son degradados por la biomasa activa, que los utiliza para su metabolismo como fuente de nutrientes y/o energía. Los ácidos que son generados degradarán rápidamente al medio orgánico, por lo que este debe ser reemplazado al poco tiempo de operación. Debido a lo anterior, el medio filtrante debe tener una buena capacidad buffer con lo finalidad que pueda consumir el ácido generado y no inhibir a la actividad bacteriana. Es usual el uso de carbonato de calcio en forma de conchas marinas molidas como buffer para prevenir las bajas de pH dentro del biofiltro. Con el tiempo las conchas marinas molidas se disolverán debiendo ser reemplazadas. Una relación típica de mezcla es de 25 [kg] de conchas marinas por cada metro cúbico de material filtrante^[12].

Las bacterias incoloras del azufre son las más ampliamente usadas para la oxidación del H_2S y azufre elemental a sulfatos usando oxígeno como aceptor de electrones. Son bacterias aeróbicas quimioautótrofas, cuyo proceso de oxidación da lugar a la formación de iones hidrógeno, produciendo una acidificación del medio. Algunos de los microorganismos identificados como bacterias incoloras del azufre corresponden a una serie de especies del género *Thiobacillus*, que son capaces de oxidar sulfuro de hidrogeno utilizando oxigeno como aceptor de electrones. Son bacterias autotróficas, por lo que usan el dióxido de carbono del biogás para cubrir sus necesidades de carbono bajo pH=3 los sistemas estarán dominados por *Thiobacillus thiooxidans* que oxida el sulfuro rápidamente. Esta especie no se inhibe incluso a pH=1, pero tiene la desventaja de formar acido sulfúrico en mayor cantidad a menor pH, por lo cual ocasiona problemas de corrosión dentro del biofiltro.

2.3.7. Siloxenos presentes en el biogás.

Los siloxenos son variantes de la silicona y se presentan como grupos separados en el biogás, estos componentes pueden ser hallados principalmente en cosméticos, detergentes, tintas de impresión y en materiales de construcción, es por esto que en los desechos domésticos, que son substrato principal para el biogás obtenido de plantas de tratamientos de agua o de vertederos, se encuentran muchos de los compuestos derivados de la silicona. Sin embargo el contenido de siloxenos puede ser alto en plantas que fermentan mezclas de substratos (con una parte proveniente de fangos de cloaca).

Concentraciones aceptables de estos compuestos son de 0.2 mg/m^3 , cuando se quema biogás con siloxenos presentes se forma SiO_2 lo que se deposita en la superficie de partes y maquinas, pero en motores que queman biogás puede producir abrasión de la superficie de pistones.

2.4. Biodigestores

Un digestor de desechos orgánicos o biodigestor^[11] es, en su forma más simple, un contenedor cerrado, hermético e impermeable (llamado reactor), dentro del cual se deposita el material orgánico a fermentar (excrementos de animales y humanos, desechos vegetales, etcétera) en determinada dilución de agua para que se descomponga, produciendo gas metano y fertilizantes orgánicos ricos en nitrógeno, fósforo y potasio.

Este sistema también puede incluir una cámara de carga y nivelación del agua residual antes del reactor, un dispositivo para captar y almacenar el biogás y cámaras de presión hidrostática y postratamiento (filtro y piedras, de algas, secado, entre otros) a la salida del reactor.

Hay muchos tipos de plantas de biogás^[12] pero los más comunes son el dosel flotante y el domo fijo, los cuales serán descritos a continuación. La baja aceptación de muchos de estos biodigestores ha sido principalmente debida a los costos altos, la dificultad de instalación y problemas en la consecución de las partes y repuestos.

Principales Biodigestores existentes:

- Biodigestor de domo flotante.
- Biodigestor de domo fijo.
- Biodigestor de estructura flexible.
- Biodigestor flotante.
- Biodigestor con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno.
- Biodigestores de alta velocidad o flujo inducido.
- Instalaciones industriales de biodigestión.

Por importancia y simplicidad se detallarán solo algunos modelos de biodigestores.

2.4.1. Biodigestor del domo flotante (India)

Este biodigestor consiste en un tambor, originalmente hecho de acero pero después reemplazado por fibra de vidrio reforzado en plástico (FRP) para superar el problema de corrosión. Normalmente se construye la pared del reactor y fondo de ladrillo, aunque a veces se usa refuerzo en hormigón. Se entrapa el gas producido bajo una tapa flotante que sube y se cae en una guía central. La presión del gas disponible normalmente varía entre 4 a 8 cm. de columna de agua. El reactor se alimenta semi-continuamente a través de una tubería de entrada. Este modelo se observa en la figura 2.9.

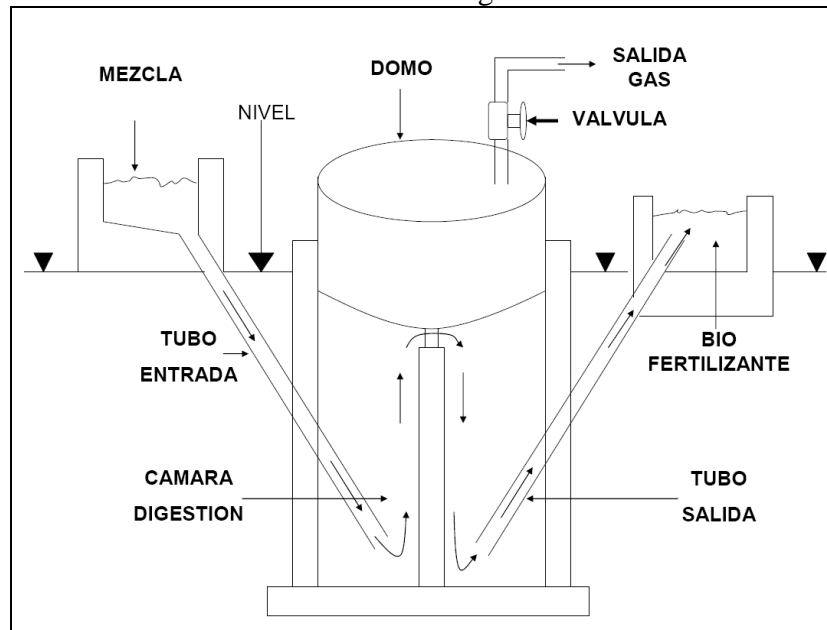


Figura 2.9: Esquema biodigestor de domo flotante.

2.4.2. Biodigestor de domo fijo (China)

Consiste en una firme cámara de gas construida de ladrillos, piedra u hormigón. La tapa y la base son semiesferas y son unidos por lados rectos. La superficie interior es sellada por muchas capas delgadas para hacerlo firme. Hay un tapón de inspección en la cima del digestor que facilita el limpiado. Se guarda el gas producido durante la digestión bajo el domo con presiones entre 1[m] y 1.5 [m] de columna de agua. Esto crea fuerzas estructurales bastante altas y es la razón para la forma semiesférica. Se necesitan materiales de alta calidad y recursos humanos costosos para construir este tipo de biodigestor. Más de cinco millones de biodigestores se han construido en China y ha estado funcionando correctamente pero, la tecnología no ha sido popular fuera de China.

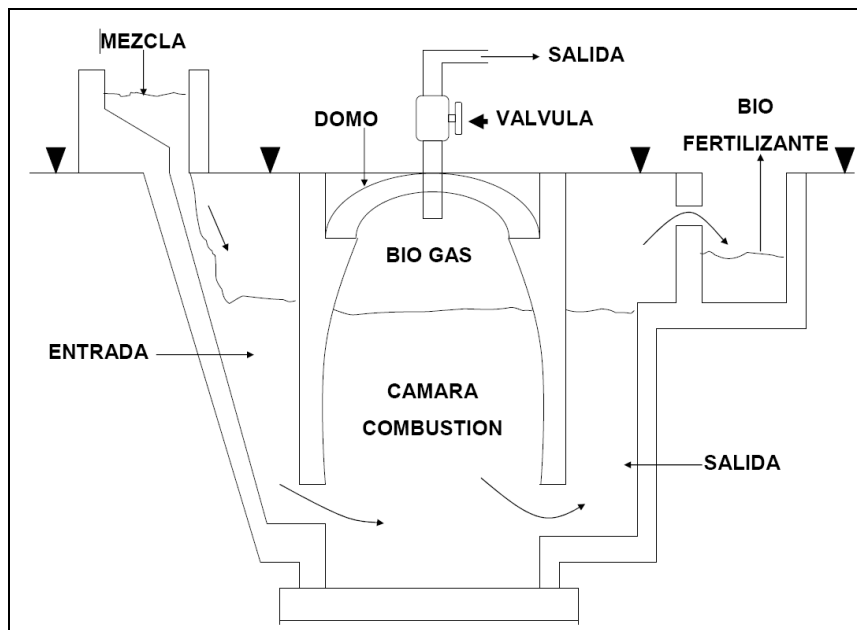


Figura 2.10: Esquema biodigestor de domo fijo.

2.4.3. Biodigestor con tanque de almacenamiento tradicional y cúpula de polietileno

Otro tipo de planta de producción de biogás que ha logrado disminuir los costos hasta 30% con respecto a los prototipos tradicionales, es la que se caracteriza por tener una estructura semiesférica de polietileno de película delgada en sustitución de la campana móvil y la cúpula fija y un tanque de almacenamiento de piedra y ladrillo como los empleados en los prototipos tradicionales.

Este tipo de instalación posee a su favor que resulta más económica que los sistemas tradicionales; por ejemplo, una instalación de 4 m³ puede costar, aproximadamente, \$550 USD y la estructura de polietileno flexible puede llegar a alcanzar hasta diez años de vida útil.

2.4.4. Instalaciones industriales de biodigestión

Las instalaciones industriales de producción de biogás emplean tanques de metal que sirven para almacenar la materia orgánica y el biogás por separado.

Este tipo de planta, debido al gran volumen de materia orgánica que necesita para garantizar la producción de biogás y la cantidad de biofertilizante que se obtiene, se diseña con grandes estanques de recolección y almacenamiento contruidos de ladrillo u hormigón.

Con el objetivo de lograr su mejor funcionamiento se usan sistemas de bombeo para mover el material orgánico de los estanques de recolección hacia los biodigestores y el

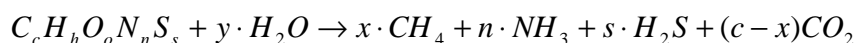
biofertilizante de los digestores hacia los tanques de almacenamiento. También se utilizan sistemas de compresión en los tanques de almacenamiento de biogás con el objetivo de lograr que éste llegue hasta el último consumidor.

Para evitar los malos olores se usan filtros que separan el gas sulfhídrico del biogás, además de utilizarse válvulas de corte y seguridad y tuberías para unir todo el sistema y hacerlo funcionar según las normas para este tipo de instalación.

La tendencia mundial en el desarrollo de los biodigestores es lograr disminuir los costos y aumentar la vida útil de estas instalaciones, con el objetivo de llegar a la mayor cantidad de usuarios de esta tecnología.

2.5. Reacciones bioquímicas en la generación de biogás

La producción de metano responde a la siguiente ecuación:



Con:

$$x = \frac{1}{8} \cdot (4c + h - 20 - 3n - 2s)$$

$$y = \frac{1}{4} \cdot (4c - h - 20 + 3n + 3s)$$

Los productos generalmente obtenidos son se observan en la tabla 2.8:

Tabla 2.8: Productos en la generación de biogás

Carbohidratos:	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3 \cdot CO_2 + 3 \cdot CH_4$
Grasas:	$C_{12}H_{24}O_6 + 3 \cdot H_2O \rightarrow 4.5 \cdot CO_2 + 7.5 \cdot CH_4$
Proteínas:	$C_{13}H_{25}O_7N_3S + 6 \cdot H_2O \rightarrow 6.5 \cdot CO_2 + 6.5 \cdot CH_4 + 3 \cdot NH_3 + H_2S$

En términos generales los sulfuros permanecen en los residuos, el CO2 se une con el NH3, por lo tanto el gas resultante es principalmente CH4 y CO2 en proporción:

$$CH_4 : CO_2 = 71\% : 29\%$$

2.6. Reacciones biológicas (Digestión Anaeróbica)

El proceso unitario de tratamiento de digestión anaerobia se emplea en todo el mundo para la depuración de aguas residuales y fangos procedentes de la industria, la agricultura y de origen urbano^[13].

Utilizando el proceso de digestión anaerobia es posible convertir gran cantidad y variedad de desechos, residuos vegetales, estiércol, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industria químicas, en subproductos útiles.

En la digestión anaeróbica más del 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aeróbico^[13]. La digestión anaeróbica es uno de los procesos más utilizados, para el tratamiento de purines, en el que la materia orgánica es transformada biológicamente, bajo condiciones anaeróbicas, en metano y Dióxido de carbono.

Además de esta corriente gaseosa, se produce también una suspensión acuosa de materiales sólidos (lodos), en los que se encuentran los componentes más difíciles de degradar, la mayor parte del nitrógeno y el fósforo y la totalidad de los elementos minerales (K, Ca, Mg, etc).

El gas producido puede ser recogido y utilizado como combustible. El fango final estabilizado, que se extrae no es putrescible y su contenido en organismos patógenos es nulo o muy bajo. Esta conversión biológica del sustrato complejo, en el que se encuentra materia orgánica en suspensión o disuelta, se realiza a través de una serie de reacciones bioquímicas que transcurren tanto consecutiva como simultáneamente. Este proceso biológico natural, es realizado por grupos o comunidades de bacterias en recipientes cerrados (reactores).

Generalmente después del digestor anaerobio se incorpora una laguna de almacenamiento, en la cual se acumula el efluente tratado en el digestor^[14]

La permanencia de las aguas en la laguna de almacenamiento proporciona un tratamiento adicional al purín, debido a que en ella disminuye el contenido de nitrógeno y otros nutrientes de la aguas. Se debe descartar que el efluente proveniente del digestor, posea una carga orgánica muy baja, lo que implica que la laguna deja de tener actividad microbiana de descomposición o es escasa, con lo que los sólidos que salen del digestor solo tienden a decantar.

La fermentación metánica es un proceso complejo que se divide en 3/4 etapas de degradación:

- Hidrólisis y acido génesis
- Acetogénesis
- Metanización

Esquemáticamente esto se observa en la figura 2.11.

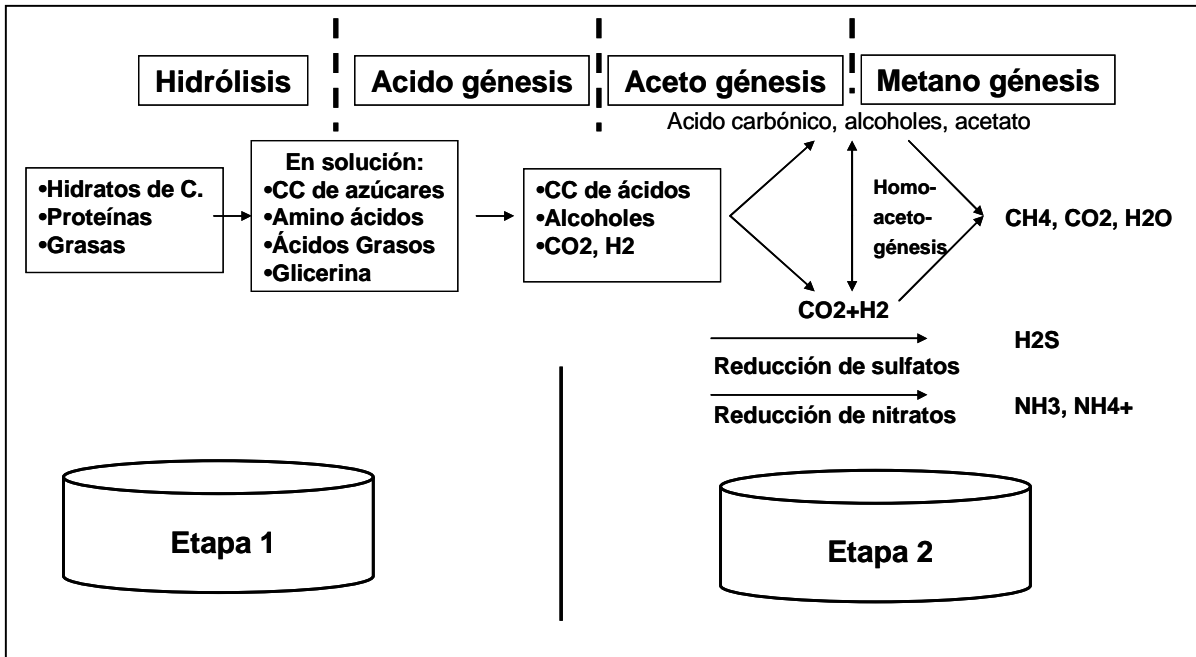


Figura 2.11: Etapas de degradación de la biomasa

2.6.1. Hidrólisis

En esta etapa (hidrolítica) un amplio grupo de microorganismos hidrolíticos como la celulosa, proteínas y grasas son fragmentados en monómeros (ver figura 2.12) por enzimas (hidrolasa), estas enzimas provienen exclusivamente de bacterias de metabolismo anaeróbico y actúan sobre los polímeros orgánicos u otros materiales complejos despolimerizándolos enzimáticamente en los correspondientes monómeros o fragmentos más sencillos.

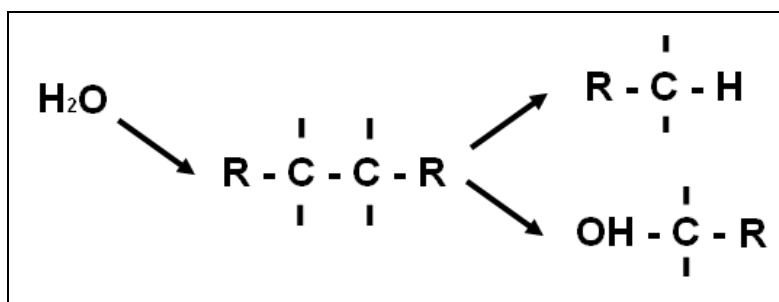


Figura 2.12: Formación de los monómeros en la hidrólisis

Posteriormente estos compuestos experimentan un proceso de fermentación que origina diferentes ácidos orgánicos. Esta etapa resulta indispensable para lograr la ruptura de los biopolímeros complejos en polímeros solubles o monómeros, puesto que los microorganismos que realizan la depuración solamente son capaces de actuar sobre materia orgánica disuelta.

La etapa hidrolítica puede ser la etapa limitante de la velocidad del proceso global, sobre todo tratando residuos con alto contenido en sólidos. Incluso en casos donde las fases acidogénicas o metanogénicas son consideradas como pasos limitantes, la hidrólisis puede afectar el conjunto del proceso^[15].

El grado de hidrólisis y la velocidad del proceso depende de muchos factores, entre otros del pH, de la temperatura, de la concentración de biomasa hidrolítica, del tipo de materia orgánica particulada^[15] y del tamaño de partícula^[15].

La hidrólisis de los carbohidratos toma lugar en algunas horas, para las proteínas el proceso toma algunos días y en el caso de la ligno celulosa el proceso es muy lento e incompleto.

La sostenibilidad de esta etapa se basa en que la presencia de microorganismos anaeróbicos consumen el oxígeno disuelto en el agua y por ende bajan el potencial redox⁸, lo que es la base para la proliferación de más microorganismos anaeróbicos.

La concentración intermedia de iones de hidrógeno afecta los productos de la fermentación, un ejemplo de degradación acidogénica (del Pirubato) se muestra en la figura 2.13.

⁸ El potencial redox es una medida de la actividad de los electrones. Está relacionado con el pH y con el contenido de oxígeno. Es análogo al pH ya que el pH mide la actividad de protones y el potencial redox mide la de los electrones.

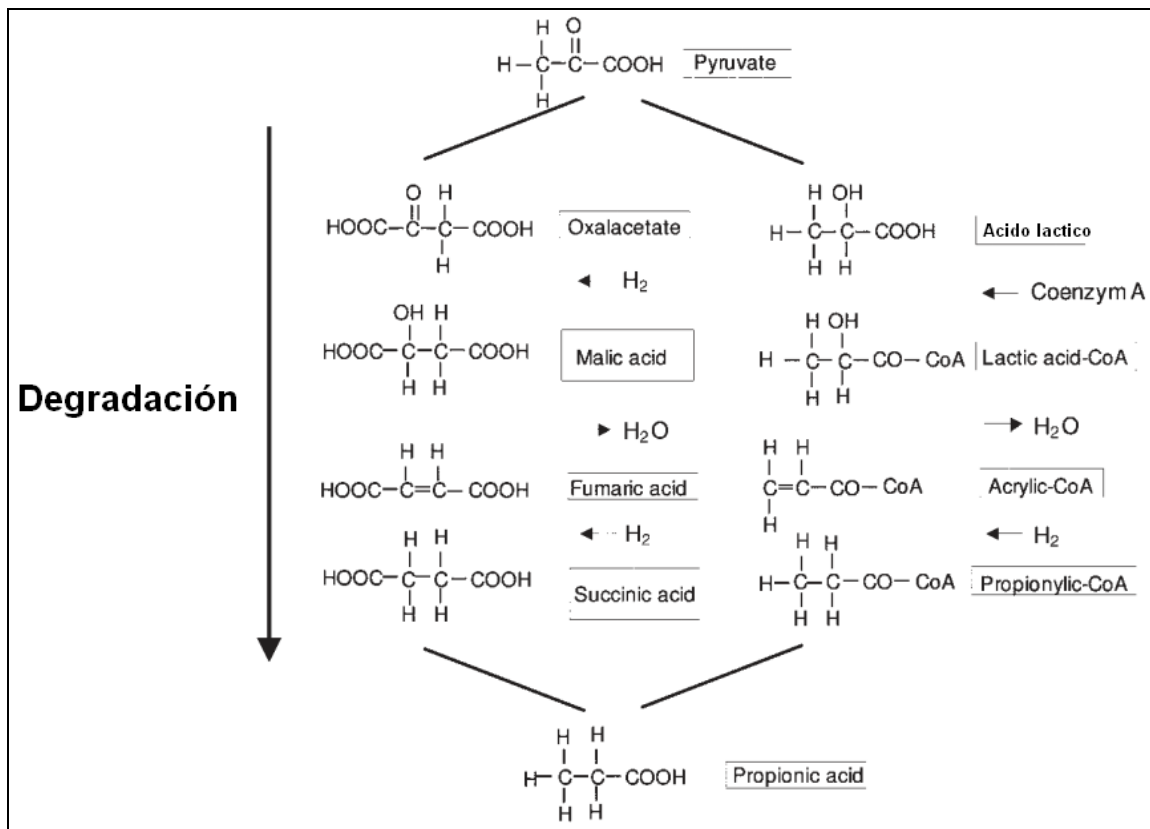


Figura 2.13: Degradación acidogénica (del Pirubato)

2.6.1.1 Bacterias presentes en la hidrólisis y ácido génesis

En esta etapa encontramos bacterias anaerobias facultativas como las enterobacterias, bacterias aerotolerantes como las bacterias del ácido láctico y bacterias anaerobias estrictas como: *Clostridium*, *Propionibacterium*, *Selenomona*.

2.6.2. Fase Acetogénica

Los productos de la fase ácido génica sirven de sustrato para la formación de otras bacterias, las reacciones de esta etapa son endogénicas (se necesita energía para la degradación de los productos de la ácido génesis), en la tabla 2.9, se muestran las típicas reacciones presentes en esta etapa.

⁹ Para degradar el etanol se necesitan 9.3 kJ/mol, para la degradación del ácido propiónico se necesitan 76.11 kJ/mol.

Cuando la metanogénesis funciona, la etapa acetogénica también funciona sin problemas, en el caso contrario comienza una sobre-acidificación.

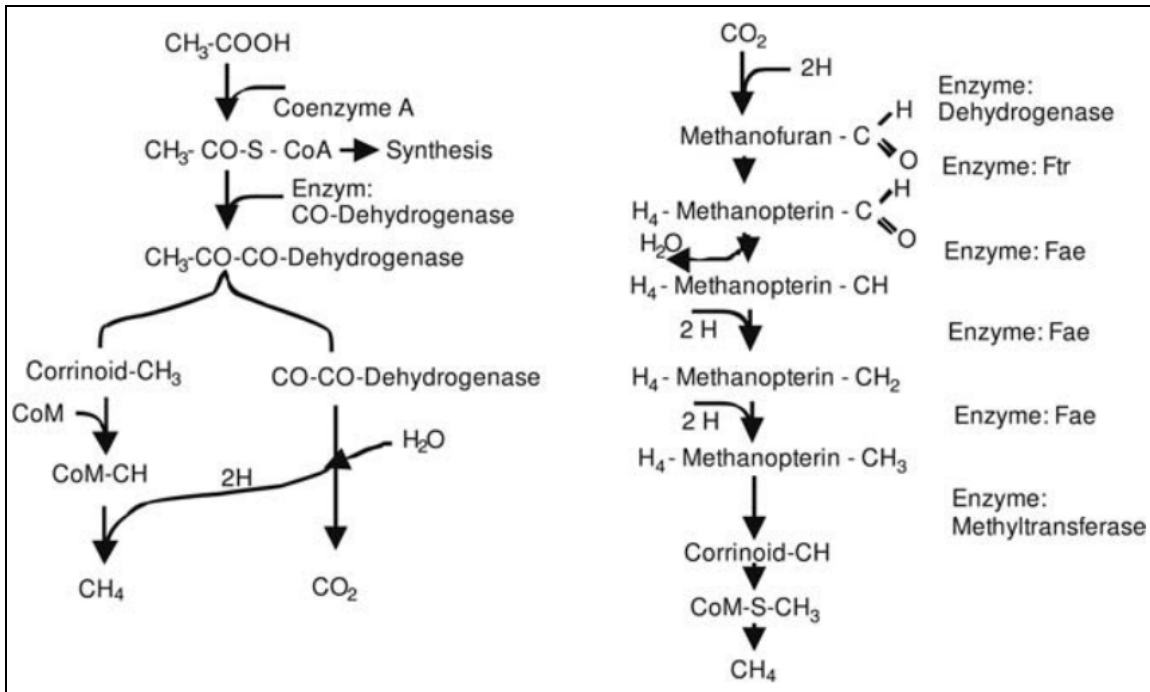


Figura 2.15: Formación de metano a partir de acetato, esto para el mecanismo generado por las coenzimas A y M

2.6.3.1. Bacterias presentes en la etapa metanogénicas

Las bacterias metanogénicas pertenecen al reino de las arqueobacterias. De acuerdo a los sustratos que pueden degradar se dividen en: Hidrogenotróficos, capaces de producir metano a partir de hidrógeno y anhídrido carbónico, Acetoclásticos, producen metano y anhídrido carbónico a partir de acetato, Metilótrofos, metabolizan compuestos como metilaminas y metilsulfuros.

Los géneros de metanobacterias hidrogenofílicas más frecuentes en reactores anaerobios son: *Methanobacterium*, *Methanospirillum* y *Methanobrevibacter*.

2.7. Parámetros en la producción de biogás

Con todos los procesos biológicos involucrados, la constancia de las condiciones de vida es importante, un cambio en la temperatura, cambios en el sustrato o en la concentración de este puede llevar a una cancelación del mecanismo de producción de biogás.

Los parámetros que regulan cada una de las etapas se resumen en la tabla 2.8.

Tabla 2.8: Parámetros presentes en las etapas principales de degradación

Parámetro	Hidrólisis / acidogénesis	Formación de metano
Temperatura	25-35 °C	Mesofílico (32 - 42 °C) Termofílico (50 - 58 °C)
Valor del pH	5,2-6,3	(6,7-7,5)
Razón C/N	(10 - 45)	(20 - 30)
Contenido MS	<40% MS	<30%MS
Potencial redox	(+400 a -300 mV)	<-250mV
Razon C:N:P:S requerida	500:15:5:3	600:15:5:3
Trazas de elementos.	N/a	Ni, Co, Mo, Se

2.7.1. Temperatura

Los rangos de temperaturas dependen de la bacteria que se dejará proliferar y tienen incidencia directa en los días de fermentación para obtener el biogás.

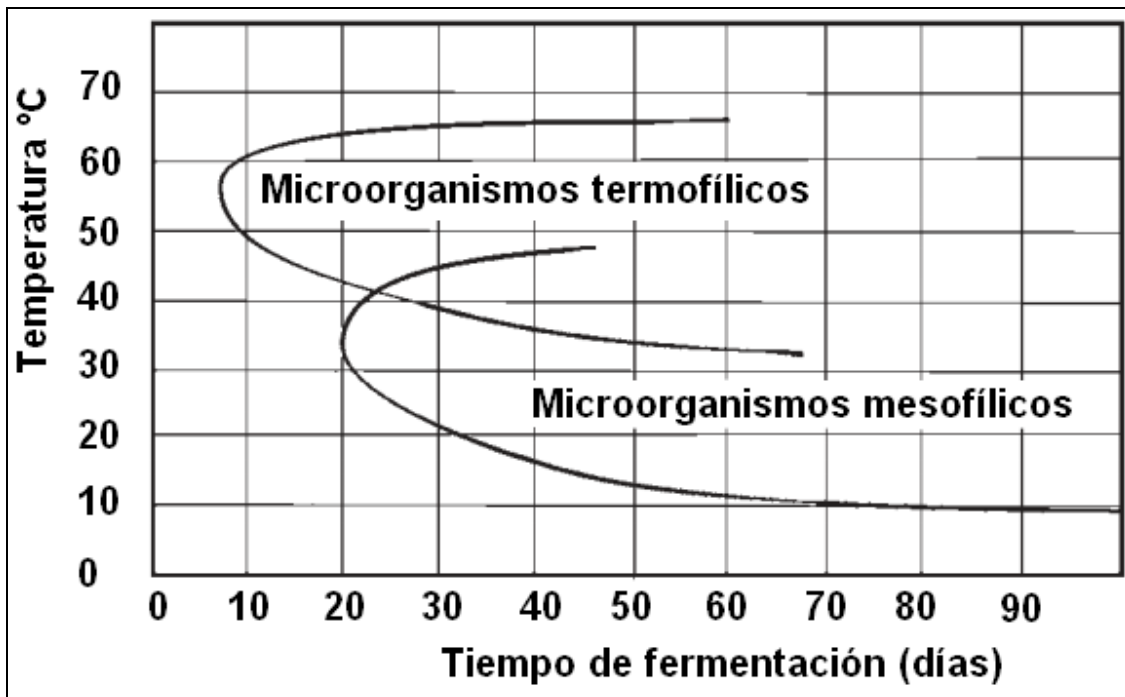


Figura 2.14: Rangos de operación para organismos mesofílicos, o termofílicos.

Otra fuente indica los tiempos recomendados de retención según la temperatura de operación para desarrollar todas las etapas de degradación.

Tabla 2.9: Tiempos de retención recomendados para el diseño de digestores de mezcla completa

Temperatura de Funcionamiento ° C	Tiempo de retención hidráulico, (días)	Tiempo de retención recomendado, (días)
18	11	28
24	8	20
30	6	14
35	4	10
40	4	10

(Fuente^[16])

2.7.2. pH

La concentración de iones de Hidrógeno y el pH sigue la siguiente ecuación:

$$H^+ = 10^{-pH}$$

Dependiendo del tipo de bacteria elegida para la metano génesis se debe cuidar el valor del pH desde 5.2 hasta 7.5.

El pH en los digestores anaerobios se relaciona con la actividad realizada por las bacterias, el pH normalmente se encuentra entre 6-8, con un valor próximo a 7 para la actividad óptima. Los ácidos grasos disminuyen la alcalinidad a menos que la alcalinidad bicarbonatada sea suficiente para neutralizar dichos ácidos.

El bicarbonato se forma a partir de CO₂, iones bicarbonato, HCO₃, es importante que haya suficiente alcalinidad todo el tiempo, para mantener una amortiguación suficiente.

Los microorganismos anaerobios necesitan un pH en torno a la neutralidad para su correcto desarrollo, aunque permiten cierta oscilación^[17]. Parece ser que el pH afecta fundamentalmente a la actividad enzimática de los microorganismos, mediante: cambios de estado de los grupos ionizables de las enzimas como el carboxil y amino; alteración de los componentes no ionizables del sistema, como por ejemplo el substrato; y desnaturalización de la estructura proteica de las enzimas. Para que el proceso se desarrolle de forma satisfactoria, el pH debe estar en torno a la neutralidad, presentando problemas graves si el pH baja por debajo de 6 o sube por encima de 8,3. Sin embargo, el proceso de inhibición parece ser completamente reversible, aunque el tiempo de recuperación depende de la duración de la alteración.

2.7.3. Potencial Redox

En el bioreactor son necesarios potenciales redox bajos, por ejemplo para un monocultivo de bacteria metano génica se necesita un potencial redox entre [-300, -330] mV como optimo. Para controlar este parámetro se pueden agregar agentes oxidantes por ejemplo sulfatos, nitritos o nitratos.

2.7.4. Nutrientes (razón C/N/P)

La razón entre los nutrientes C/n debe estar en el orden 16:1-25:1, el carbono contenido en el estiércol es lo que dará paso al metano y el nitrógeno aporta a la multiplicación bacteriana y a catalizar el proceso de producción de biogás.

2.7.5. Desintegración¹⁰

La producción de biogás depende del tiempo de residencia en el reactor debido al cambio de etapa del tipo de digestión, ver figura 2.15.

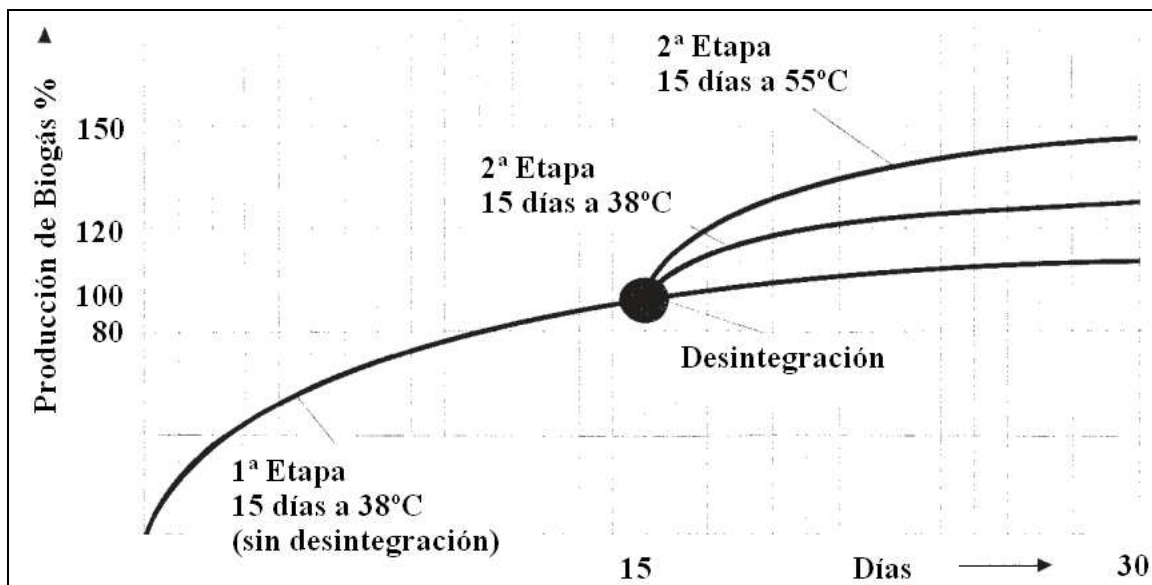


Figura 2.15: Variación de la producción de Biogás en función del proceso de fermentación y la etapa de desintegración

¹⁰ Desintegración: Destrucción de la estructura celular

2.8. Ventajas y desventajas de los biodigestores anaeróbicos

2.8.1. Ventajas de un biodigestor

a) Producción de Energía

Por la acción de las bacterias metanogénicas, gran parte del contenido orgánico de las aguas se transforma en gas metano; teóricamente 1 Kg. de la DQO eliminada produce 350 litros de metano a 35°C. Este combustible posee un elevado poder energético utilizable.

b) Producción de Fangos

Por quedar convertida la mayor parte de la materia orgánica, en el proceso anaerobio, en biogás, el sólido restante queda bien estabilizado y utilizable previa deshidratación.

c) Proceso Exterior

Como los reactores se construyen en ambientes cerrados, la producción de malos olores es baja en el proceso anaerobio, comparado con los olores desagradables que se desprenden en el sistema donde la depuración se realiza en espacios abiertos. Los digestores cerrados deben ubicarse a distancia mínima de 500 metros de las urbanizaciones.

2.8.2. Desventajas de un biodigestor

a) Puesta en Marcha

Debido a la baja velocidad de crecimiento de los microorganismos, en el proceso anaeróbico la puesta en marcha de este tratamiento es lenta.

b) Temperatura

El tratamiento anaerobio a temperatura ambiente resulta demasiado lento, lo que supone un aporte externo de energía ya que requiere temperaturas de, al menos, 35 °C, para que la actividad de las bacterias sea óptima.

c) Costos

Los costos asociados a la construcción de los digestores anaerobios son altos, comparado con sistemas no convencionales de tratamiento, principalmente por que necesita de un sistema integrado, para proporcionar un tratamiento completo y adecuado a los purines, además necesita la instalación de dispositivos que permitan, calentar los purines hasta una temperatura adecuada y la instalación de un sistema de recolección y acumulación del gas, para su posterior uso o quema.

Los costos de operación y mantención no son altos, solo requiere personal capacitado, para que realicen las labores de mantención, que por lo general no son muy frecuentes.

2.9. Conclusiones de antecedentes

De los antecedentes se ha recopilado la siguiente información:

Sobre el sector económico involucrado:

El usuario objetivo se encuentra concentrado en las regiones VII, VIII, IX, X, XIV, por lo que se deben considerar las condiciones de estas regiones como parámetros de diseño.

Los planteles estudiados tienen una variedad de cabezas bovinas siendo la de mayor preponderancia las vacas de engorda y de explotación lechera, si bien es cierto las medias y modas son cercanas a los 20 animales es posible encontrar predios pequeños con planteles cercanos a los 160 cabezas Bovinas.

Sobre la biomasa a utilizar

La biomasa a utilizar corresponde a excretas de bovinos las cuales no son las de mayor capacidad de generación de biogás más aún, por sí solas tienen eficiencias de generación cercanas al 30[%], pero es el substrato más abundante en este tipo de usuarios y existen instalaciones en las cuales los purines son almacenados por lo cual la intervención de este tipo de proyectos debe ser de acorde a las distribuciones existentes

Sobre la normativa vigente de manejo de purines

Principalmente el manejo de purines está regulado en cuanto al lugar de almacenamiento con el fin de evitar contaminación de corrientes de agua, pero carece de una legislación clara respecto al riego de praderas.

Es una práctica común la utilización de los purines como fertilizante después de una estabilización de los niveles principalmente de nitrógeno, por lo que después de ser almacenados en pozos de purines y homogeneizados, son utilizados en el riego de praderas

Sobre el biogás

El biogás generado a partir de biodigestión anaeróbica de purines de bovino tiene un porcentaje de metano CH₄ cercano al 60% y producto del su alto poder calorífico es un elemento valioso del punto de vista de la energía térmica disponible y de la energía eléctrica aprovechable.

Sobre los biodigestores utilizados

Los biodigestores comúnmente utilizados son instalaciones que buscan minimizar los costos de inversión asegurando una producción de biogás sustentable por lo que es importante considerar que el proyecto debe ser viable tanto técnica como económicamente

y para un bajo volumen de substrato existen alternativas artesanales que carecen de diseño y solo responden a necesidades pequeñas y de baja regularidad y seguridad.

2.10. Metodología de trabajo

La metodología comprende los siguientes pasos.

- 1) Definir un análisis que entregue el costo del proyecto en función del número de cabezas a utilizar como base de generación de biomasa.
- 2) Seleccionar un tamaño de plantel que justifique la elaboración del proyecto en función de un criterio económico (Importancia del periodo de recuperación de la inversión).
- 3) Definir un Layout básico de la instalación.
- 4) Definir el manejo de los purines utilizados.
- 5) Realizar los cálculos de generación de biogás del proyecto.
- 6) Realizar los cálculos de generación energética.
- 7) Realizar el dimensionamiento del estanque de biodigestión.
- 8) Realizar el diseño del estanque de biodigestión según estándar API 650
- 9) Calcular los parámetros básicos de los equipos complementarios de la instalación

3. Selección de la instalación

La instalación diseñada debe estar de acorde a los objetivos de la memoria y por ende debe ser una alternativa económicamente viable por ende se utiliza el criterio de tiempo de recuperación del proyecto basado en el costo de la inversión y en los ahorros que se presentan por la metanización y consecuente generación de energía eléctrica como térmica.

3.1. Criterio de selección de tamaño del proyecto

Los aspectos a considerar para generar el criterio de selección del tamaño del proyecto comprenden los ahorros generados por la producción de biogás y consiguiente obtención de metano.

3.1.1. Potencial energético y ahorros esperados

Los datos utilizados para la estimación del ahorro energético se presentan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1: Parámetros de costos y generación energética

Costo energía electrica	70	[\$/kwHth]
Costo energía termica	30	[\$/kwHel]
Generacion electrica	0,22	[kwe/UAE]
Generacion termica	0,32	[kwth/UAE]
Utilizacion año	8000	[H/Año]

La variable de interés para este proyecto corresponde al tamaño de plantel adecuado para el cual el proyecto es viable, como cada cabeza bovina tiene un potencial energético de generación eléctrico y térmico es importante considerar los ahorros generados por ambos conceptos, en la tabla 3.2 se presenta los ahorros para un intervalo de cabezas de interés entre 6 y 100 [UAE]

Tabla 3.2: Ahorros generados según tamaño de plantel considerado

Cabezas [UAE]	Energía térmica disponible [kwh]	Energía eléctrica disponible [kwh]	Energía total disponible [kwh]	Ahorro energético anual [€]
6	1,92	1,32	3,24	1.200.000
8	2,56	1,76	4,32	1.600.000
10	3,2	2,2	5,4	2.000.000
12	3,84	2,64	6,48	2.400.000
14	4,48	3,08	7,56	2.800.000
16	5,12	3,52	8,64	3.200.000
18	5,76	3,96	9,72	3.600.000
20	6,4	4,4	10,8	4.000.000
22	7,04	4,84	11,88	4.400.000
24	7,68	5,28	12,96	4.800.000
26	8,32	5,72	14,04	5.200.000
28	8,96	6,16	15,12	5.600.000
30	9,6	6,6	16,2	6.000.000
32	10,24	7,04	17,28	6.400.000
34	10,88	7,48	18,36	6.800.000
36	11,52	7,92	19,44	7.200.000
38	12,16	8,36	20,52	7.600.000
40	12,8	8,8	21,6	8.000.000
42	13,44	9,24	22,68	8.400.000
44	14,08	9,68	23,76	8.800.000
46	14,72	10,12	24,84	9.200.000
48	15,36	10,56	25,92	9.600.000
50	16	11	27	10.000.000
52	16,64	11,44	28,08	10.400.000
54	17,28	11,88	29,16	10.800.000
56	17,92	12,32	30,24	11.200.000
58	18,56	12,76	31,32	11.600.000
60	19,2	13,2	32,4	12.000.000
62	19,84	13,64	33,48	12.400.000
64	20,48	14,08	34,56	12.800.000
66	21,12	14,52	35,64	13.200.000
68	21,76	14,96	36,72	13.600.000
70	22,4	15,4	37,8	14.000.000
72	23,04	15,84	38,88	14.400.000
74	23,68	16,28	39,96	14.800.000
76	24,32	16,72	41,04	15.200.000
78	24,96	17,16	42,12	15.600.000
80	25,6	17,6	43,2	16.000.000
82	26,24	18,04	44,28	16.400.000
84	26,88	18,48	45,36	16.800.000
86	27,52	18,92	46,44	17.200.000
88	28,16	19,36	47,52	17.600.000
90	28,8	19,8	48,6	18.000.000
92	29,44	20,24	49,68	18.400.000
94	30,08	20,68	50,76	18.800.000
96	30,72	21,12	51,84	19.200.000
98	31,36	21,56	52,92	19.600.000
100	32	22	54	20.000.000

3.1.2. Inversión esperada en el estanque de biodigestión

La inversión en el estanque de biodigestión es un componente principal en el costo de inversión del proyecto de, la geometría recomendada es la cilíndrica por lo que el cálculo de inversión por este concepto es simple de encontrar, en la tabla 3.3 se encuentran los datos que apoyan la construcción de este costo.

Tabla 3.3: Parámetros relevantes para la configuración de estanques

Volumen estanque equivalente por cabeza bovina	1,075	[m ³ /cabeza]
Relación radio/largo	[1/4]	[-]
Densidad acero	7850	[kg/m ³]
Valor acero	2000	[\$/kg]
Espesor planchas acero	0,00635	[m]

El costo de inversión por estanque de biodigestión se presenta en la tabla 3.4.

Tabla 3.4: Costo de inversión del estanque en función del tamaño de plantel

Cabezas [UAE]	V estanque equivalente [m ³]	Radio estanque [m]	Largo estanque [m]	V acero en Manto [m ³]	V acero en cabezales [m ³]	V acero en soporte [m ³]	V acero total [m ³]	Masa total acero [kg]	Valor acero utilizado [\$]
2	2.2	0.6	2.2	0.05	0.01	0.01	0.07	530.9	1.061.781
4	4.3	0.7	2.8	0.08	0.02	0.01	0.11	842.7	1.685.472
6	6.5	0.8	3.2	0.10	0.03	0.01	0.14	1104.3	2.208.594
8	8.6	0.9	3.5	0.12	0.03	0.02	0.17	1337.8	2.675.521
10	10.8	0.9	3.8	0.14	0.04	0.02	0.20	1552.3	3.104.667
12	12.9	1.0	4.0	0.16	0.04	0.02	0.22	1753.0	3.505.924
14	15.1	1.1	4.2	0.18	0.04	0.02	0.25	1942.7	3.885.382
16	17.2	1.1	4.4	0.20	0.05	0.02	0.27	2123.6	4.247.124
18	19.4	1.2	4.6	0.21	0.05	0.03	0.29	2297.0	4.594.060
20	21.5	1.2	4.8	0.23	0.06	0.03	0.31	2464.2	4.928.351
22	23.7	1.2	4.9	0.24	0.06	0.03	0.33	2625.8	5.251.662
24	25.8	1.3	5.1	0.26	0.06	0.03	0.35	2782.7	5.565.307
26	28.0	1.3	5.2	0.27	0.07	0.03	0.37	2935.2	5.870.349
28	30.1	1.3	5.4	0.29	0.07	0.04	0.39	3083.8	6.167.659
30	32.3	1.4	5.5	0.30	0.07	0.04	0.41	3229.0	6.457.967
32	34.4	1.4	5.6	0.31	0.08	0.04	0.43	3370.9	6.741.890
34	36.6	1.4	5.7	0.33	0.08	0.04	0.45	3510.0	7.019.954
36	38.7	1.5	5.8	0.34	0.08	0.04	0.46	3646.3	7.292.616
38	40.9	1.5	5.9	0.35	0.09	0.04	0.48	3780.1	7.560.272
40	43.0	1.5	6.0	0.36	0.09	0.05	0.50	3911.6	7.823.270
42	45.2	1.5	6.1	0.37	0.09	0.05	0.51	4041.0	8.081.920
44	47.3	1.6	6.2	0.39	0.10	0.05	0.53	4168.2	8.336.494
46	49.5	1.6	6.3	0.40	0.10	0.05	0.55	4293.6	8.587.239
48	51.6	1.6	6.4	0.41	0.10	0.05	0.56	4417.2	8.834.375
50	53.8	1.6	6.5	0.42	0.11	0.05	0.58	4539.1	9.078.101
52	55.9	1.6	6.6	0.43	0.11	0.05	0.59	4659.3	9.318.598
54	58.1	1.7	6.7	0.44	0.11	0.06	0.61	4778.0	9.556.030
56	60.2	1.7	6.7	0.45	0.11	0.06	0.62	4895.3	9.790.548
58	62.4	1.7	6.8	0.46	0.12	0.06	0.64	5011.1	10.022.291
60	64.5	1.7	6.9	0.47	0.12	0.06	0.65	5125.7	10.251.384
62	66.7	1.7	7.0	0.49	0.12	0.06	0.67	5239.0	10.477.945
64	68.8	1.8	7.0	0.50	0.12	0.06	0.68	5351.0	10.702.083
66	71.0	1.8	7.1	0.51	0.13	0.06	0.70	5461.9	10.923.898
68	73.1	1.8	7.2	0.52	0.13	0.06	0.71	5571.7	11.143.483
70	75.3	1.8	7.3	0.53	0.13	0.07	0.72	5680.5	11.360.925
72	77.4	1.8	7.3	0.54	0.13	0.07	0.74	5788.2	11.576.306
74	79.6	1.8	7.4	0.55	0.14	0.07	0.75	5894.9	11.789.702
76	81.7	1.9	7.5	0.56	0.14	0.07	0.76	6000.6	12.001.183
78	83.9	1.9	7.5	0.57	0.14	0.07	0.78	6105.4	12.210.817
80	86.0	1.9	7.6	0.58	0.14	0.07	0.79	6209.3	12.418.667
82	88.2	1.9	7.7	0.58	0.15	0.07	0.80	6312.4	12.624.792
84	90.3	1.9	7.7	0.59	0.15	0.07	0.82	6414.6	12.829.248
86	92.5	1.9	7.8	0.60	0.15	0.08	0.83	6516.0	13.032.087
88	94.6	2.0	7.8	0.61	0.15	0.08	0.84	6616.7	13.233.360
90	96.8	2.0	7.9	0.62	0.16	0.08	0.86	6716.6	13.433.113
92	98.9	2.0	8.0	0.63	0.16	0.08	0.87	6815.7	13.631.392
94	101.1	2.0	8.0	0.64	0.16	0.08	0.88	6914.1	13.828.240
96	103.2	2.0	8.1	0.65	0.16	0.08	0.89	7011.8	14.023.696
98	105.4	2.0	8.1	0.66	0.16	0.08	0.91	7108.9	14.217.800
100	107.5	2.0	8.2	0.67	0.17	0.08	0.92	7205.3	14.410.587

3.1.3. Inversión esperada en instalaciones

Las instalaciones usuales para este tipo de aplicaciones son galpones definidos por el área de planta utilizada y quedan indexadas por un valor usual de proyectos, en la tabla 3.5 se encuentran los datos considerados para el costo por instalaciones.

Tabla 3.5: Datos utilizados en la confección de los costos por instalaciones

Volumen estanque equivalente por cabeza bovina	1,075	[m3/cabeza]
Factor area efectiva vs area necesaria	5	[-]
Valor area de instalaciones	6	[UF/m2]
Valor UF	21.016	[\$]

El tamaño de plantel define la cantidad de substrato a utilizar y este a su vez define el tamaño de estanque biodigestor, para que este estanque y sus elementos complementarios queden a resguardo la instalación de cobijo se considera de una sección de planta de 5 veces el espacio utilizado por el estanque.

La participación en el costo total de inversión de las instalaciones corresponden a cerca del 35[%] y por ende es importante considerar este concepto en el proyecto.

El área efectiva de utilización se calculó como el espacio que utiliza el estanque en su diámetro y largo, luego el área instalada fue calculada como 5 veces el área efectiva.

Finalmente el costo de las instalaciones fue indexado por un valor de 6 UF por metro cuadrado, la tabla 3.6 muestra el costo de instalaciones en función del tamaño de plantel.

Tabla 3.6: Costo de inversión por concepto de instalacion en función del tamaño de plantel

Cabezas [UAE]	V estanque eq. [m3]	R estanque [m]	L estanque [m]	A efectiva [m2]	A instalada [m2]	Inversión instalaciones [\$]
2	2,2	0,6	2,2	2,5	12,3	1.554.463
4	4,3	0,7	2,8	3,9	19,6	2.467.556
6	6,5	0,8	3,2	5,1	25,6	3.233.413
8	8,6	0,9	3,5	6,2	31,1	3.917.001
10	10,8	0,9	3,8	7,2	36,0	4.545.277
12	12,9	1,0	4,0	8,1	40,7	5.132.723
14	15,1	1,1	4,2	9,0	45,1	5.688.255
16	17,2	1,1	4,4	9,9	49,3	6.217.852
18	19,4	1,2	4,6	10,7	53,3	6.725.770
20	21,5	1,2	4,8	11,4	57,2	7.215.178
22	23,7	1,2	4,9	12,2	61,0	7.688.510
24	25,8	1,3	5,1	12,9	64,6	8.147.691
26	28,0	1,3	5,2	13,6	68,2	8.594.275
28	30,1	1,3	5,4	14,3	71,6	9.029.542
30	32,3	1,4	5,5	15,0	75,0	9.454.557
32	34,4	1,4	5,6	15,7	78,3	9.870.224
34	36,6	1,4	5,7	16,3	81,5	10.277.314
36	38,7	1,5	5,8	16,9	84,7	10.676.495
38	40,9	1,5	5,9	17,6	87,8	11.068.347
40	43,0	1,5	6,0	18,2	90,8	11.453.381
42	45,2	1,5	6,1	18,8	93,8	11.832.047
44	47,3	1,6	6,2	19,4	96,8	12.204.748
46	49,5	1,6	6,3	19,9	99,7	12.571.842
48	51,6	1,6	6,4	20,5	102,6	12.933.653
50	53,8	1,6	6,5	21,1	105,4	13.290.471
52	55,9	1,6	6,6	21,6	108,2	13.642.562
54	58,1	1,7	6,7	22,2	110,9	13.990.166
56	60,2	1,7	6,7	22,7	113,7	14.333.504
58	62,4	1,7	6,8	23,3	116,4	14.672.779
60	64,5	1,7	6,9	23,8	119,0	15.008.174
62	66,7	1,7	7,0	24,3	121,7	15.339.863
64	68,8	1,8	7,0	24,9	124,3	15.668.004
66	71,0	1,8	7,1	25,4	126,8	15.992.744
68	73,1	1,8	7,2	25,9	129,4	16.314.220
70	75,3	1,8	7,3	26,4	131,9	16.632.559
72	77,4	1,8	7,3	26,9	134,4	16.947.879
74	79,6	1,8	7,4	27,4	136,9	17.260.294
76	81,7	1,9	7,5	27,9	139,3	17.569.906
78	83,9	1,9	7,5	28,4	141,8	17.876.813
80	86,0	1,9	7,6	28,8	144,2	18.181.109
82	88,2	1,9	7,7	29,3	146,6	18.482.878
84	90,3	1,9	7,7	29,8	149,0	18.782.204
86	92,5	1,9	7,8	30,3	151,3	19.079.164
88	94,6	2,0	7,8	30,7	153,6	19.373.830
90	96,8	2,0	7,9	31,2	156,0	19.666.272
92	98,9	2,0	8,0	31,7	158,3	19.956.556
94	101,1	2,0	8,0	32,1	160,6	20.244.743
96	103,2	2,0	8,1	32,6	162,8	20.530.894
98	105,4	2,0	8,1	33,0	165,1	20.815.064
100	107,5	2,0	8,2	33,5	167,3	21.097.308

3.1.4. Inversión esperada en sistemas de bombeo y piping

El sistema de Piping y bombeo utilizado para el criterio de selección del proyecto fue definido por intervalos en función de proyectos similares y tiene un máximo de \$3.500.000 para el plantel de mayor tamaño considerado, en la tabla 3.7 se muestra el costo de este concepto por intervalos de tamaño de plantel.

Tabla 3.7: Costo de inversión en piping y bombeo en función del tamaño de plantel

Cabezas [UAE]		Costo[\$]
Intervalo		
1	10	1250000
11	20	1500000
21	30	1750000
31	40	2000000
41	50	2250000
51	60	2500000
61	70	2750000
71	80	3000000
81	90	3250000
91	100	3500000

3.1.5. Inversión esperada en equipo de generación eléctrica

Es de vital importancia considerar un equipo de generación eléctrica que utilice biogás para aprovechar el ahorro por concepto de energía eléctrica, se utilizó como base un equipo generador encontrado en el mercado que entrega una potencia nominal de 5,4[kW] y tiene un valor de \$2.340.648, los datos de este equipo se encuentran en el Anexo C.

Para hacer la interpolación a todos los tamaños de planteles se consideró que cada uno de estos equipos tiene un consumo de 2,5 [m³/H] de biogás, luego cada 25 cabezas se logra este flujo de biogás y por ende se considera un equipo por cada intervalo, esto se observa en la tabla 3.8.

En la práctica esto es factible de optimizar en el caso de considerar un equipo de mayor consumo y potencia nominal a generar mayor.

Tabla 3.8: Costo de inversión en equipo generador a biogás en función del tamaño de plantel

Cabezas [UAE]		Costo equipo generador [\$]
Intervalo		
6	25	2.340.648
26	51	4.681.296
52	75	7.021.944
76	100	9.362.592

3.1.6. Curva de tiempo de recuperación del proyecto vs tamaño de plantel

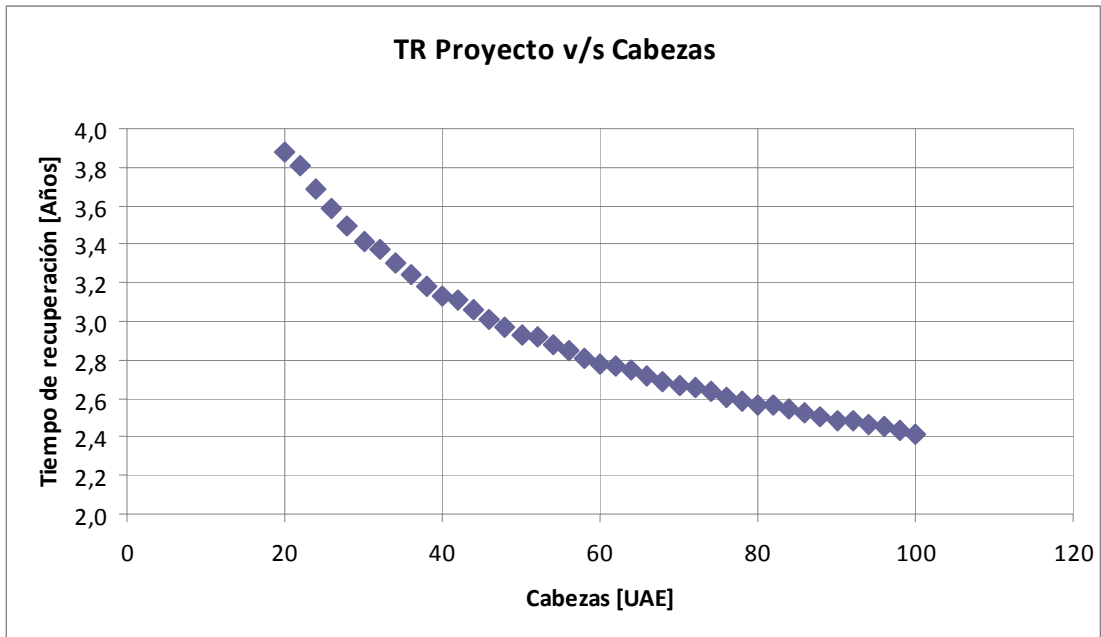
La conjugación de los ahorros encontrados con los costos de inversión considerados se resume en la tabla 3.9.

Tabla 3.9: Periodo de recuperación de la inversión en función del tamaño de plantel

Cabezas [u]	Ahorro energético anual [\$/año]	Costo estanque [\$]	Costo bombeo y piping [\$]	Costo instalaciones [\$]	Costo equipo generador [\$]	Inversión proyecto [\$]	Años de recuperación
6	1.200.000	2.208.594	1.250.000	3.233.413	NA	NA	-
8	1.600.000	2.675.521	1.250.000	3.917.001	NA	NA	-
10	2.000.000	3.104.667	1.250.000	4.545.277	NA	NA	-
12	2.400.000	3.505.924	1.500.000	5.132.723	NA	NA	-
14	2.800.000	3.885.382	1.500.000	5.688.255	NA	NA	-
16	3.200.000	4.247.124	1.500.000	6.217.852	NA	NA	-
18	3.600.000	4.594.060	1.500.000	6.725.770	NA	NA	-
20	4.000.000	4.928.351	1.500.000	7.215.178	2.340.648	15.984.177	4,0
22	4.400.000	5.251.662	1.750.000	7.688.510	2.340.648	17.030.820	3,9
24	4.800.000	5.565.307	1.750.000	8.147.691	2.340.648	17.803.646	3,7
26	5.200.000	5.870.349	1.750.000	8.594.275	4.681.296	20.895.920	4,0
28	5.600.000	6.167.659	1.750.000	9.029.542	4.681.296	21.628.497	3,9
30	6.000.000	6.457.967	1.750.000	9.454.557	4.681.296	22.343.821	3,7
32	6.400.000	6.741.890	2.000.000	9.870.224	4.681.296	23.293.410	3,6
34	6.800.000	7.019.954	2.000.000	10.277.314	4.681.296	23.978.565	3,5
36	7.200.000	7.292.616	2.000.000	10.676.495	4.681.296	24.650.407	3,4
38	7.600.000	7.560.272	2.000.000	11.068.347	4.681.296	25.309.915	3,3
40	8.000.000	7.823.270	2.000.000	11.453.381	4.681.296	25.957.947	3,2
42	8.400.000	8.081.920	2.250.000	11.832.047	4.681.296	26.845.263	3,2
44	8.800.000	8.336.494	2.250.000	12.204.748	4.681.296	27.472.538	3,1
46	9.200.000	8.587.239	2.250.000	12.571.842	4.681.296	28.090.377	3,1
48	9.600.000	8.834.375	2.250.000	12.933.653	4.681.296	28.699.324	3,0
50	10.000.000	9.078.101	2.250.000	13.290.471	4.681.296	29.299.868	2,9
52	10.400.000	9.318.598	2.500.000	13.642.562	7.021.944	32.483.104	3,1
54	10.800.000	9.556.030	2.500.000	13.990.166	7.021.944	33.068.140	3,1
56	11.200.000	9.790.548	2.500.000	14.333.504	7.021.944	33.645.997	3,0
58	11.600.000	10.022.291	2.500.000	14.672.779	7.021.944	34.217.013	2,9
60	12.000.000	10.251.384	2.500.000	15.008.174	7.021.944	34.781.502	2,9
62	12.400.000	10.477.945	2.750.000	15.339.863	7.021.944	35.589.753	2,9
64	12.800.000	10.702.083	2.750.000	15.668.004	7.021.944	36.142.031	2,8
66	13.200.000	10.923.898	2.750.000	15.992.744	7.021.944	36.688.586	2,8
68	13.600.000	11.143.483	2.750.000	16.314.220	7.021.944	37.229.647	2,7
70	14.000.000	11.360.925	2.750.000	16.632.559	7.021.944	37.765.428	2,7
72	14.400.000	11.576.306	3.000.000	16.947.879	7.021.944	38.546.129	2,7
74	14.800.000	11.789.702	3.000.000	17.260.294	7.021.944	39.071.939	2,6
76	15.200.000	12.001.183	3.000.000	17.569.906	9.362.592	41.933.681	2,8
78	15.600.000	12.210.817	3.000.000	17.876.813	9.362.592	42.450.223	2,7
80	16.000.000	12.418.667	3.000.000	18.181.109	9.362.592	42.962.368	2,7
82	16.400.000	12.624.792	3.250.000	18.482.878	9.362.592	43.720.262	2,7
84	16.800.000	12.829.248	3.250.000	18.782.204	9.362.592	44.224.044	2,6
86	17.200.000	13.032.087	3.250.000	19.079.164	9.362.592	44.723.843	2,6
88	17.600.000	13.233.360	3.250.000	19.373.830	9.362.592	45.219.782	2,6
90	18.000.000	13.433.113	3.250.000	19.666.272	9.362.592	45.711.977	2,5
92	18.400.000	13.631.392	3.500.000	19.956.556	9.362.592	46.450.540	2,5
94	18.800.000	13.828.240	3.500.000	20.244.743	9.362.592	46.935.575	2,5
96	19.200.000	14.023.696	3.500.000	20.530.894	9.362.592	47.417.182	2,5
98	19.600.000	14.217.800	3.500.000	20.815.064	9.362.592	47.895.456	2,4
100	20.000.000	14.410.587	3.500.000	21.097.308	9.362.592	48.370.487	2,4

La tabla 3.9 parte su evaluación en un plantel mayor a 18 [UAE] debido a que por debajo de este valor no se alcanza a generar el caudal de biogás mínimo para el correcto funcionamiento del equipo.

En la figura 3.1 se observa un gráfico que muestra el periodo de recuperación de la inversión en función del tamaño de plantel.



Fi

Figura 3.1: Curva de periodo de recuperación de inversión vs Tamaño de plantel

3.2. Proyecto abordado

El proyecto abordado se basa en la utilización del modelo mostrado en el subcapítulo anterior y en la conjugación con los datos recopilados de los antecedentes.

3.2.1. Criterio de tiempo de recuperación

Se selecciona el primer proyecto que en su tiempo de recuperación (ver tabla 3.10) baja la barrera de los 3 años, para este periodo el proyecto a desarrollar considera un plantel de 46 animales y una inversión general de 28 [MM\$].

Tabla 3.10: Extracto tabla 3.9, remarcando la barrera de 3 años de tiempo de recuperación

Cabezas [u]	Ahorro energético	Costo estanque [\$]	Costo bombeo y	Costo instalaciones	Costo equipo generador [\$]	Inversión proyecto [\$]	Años de recuperación
44	8.800.000	8.336.494	2.250.000	12.204.748	4.119.540	26.910.783	3,1
46	9.200.000	8.587.239	2.250.000	12.571.842	4.306.792	27.715.874	3,0
48	9.600.000	8.834.375	2.250.000	12.933.653	4.494.044	28.512.072	3,0
50	10.000.000	9.078.101	2.250.000	13.290.471	4.681.296	29.299.868	2,9

3.2.2. Diagrama de flujos de la instalación

El sistema a diseñar consta de un estanque digestor anaeróbicos de mezcla completa, en el cuales se realizan las etapas mesofílica, vale decir donde proliferan las primeras bacterias que tendrán una baja producción de biogás para luego dar paso a la etapa de alta generación de biogás, etapa termofílica.

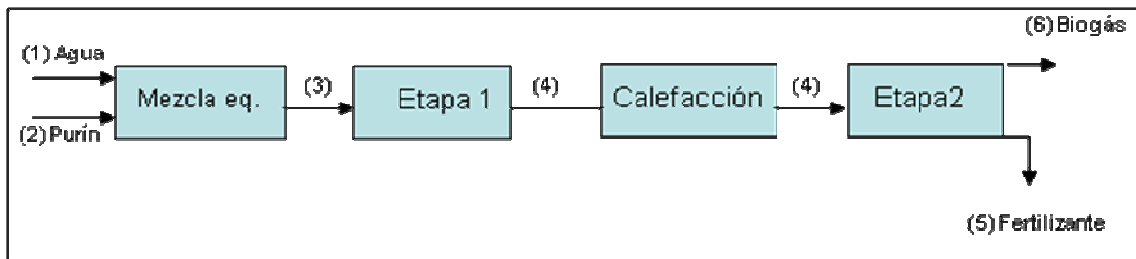


Figura 3.2, Corrientes del diagrama de flujos del equipo

Las magnitudes de cada corriente de flujo son presentadas en el subcapítulo 3.4 (Balance de masas del equipo).

Las corrientes se describen de la siguiente manera:

- (1) Corresponde al agua equivalente que se incorpora en el estanque de biodigestión.
- (2) Corresponde a los purines bovinos que serán utilizados como biomasa única.

- (3) Corresponde a la mezcla homogénea que se utiliza como sustrato a biodigerir anaeróticamente en el estanque biodigestor en etapa mesofílica (15 días)
- (4) Corresponde a la mezcla una vez alcanzada la etapa termofílica (10 días)
- (5) Desde el reactor estanque después del tiempo de residencia total de 25 días, se extrae a través de una bomba la biomasa digerida la cual se ha estudiado y documentado que es de alto valor en nitrógeno lo cual es de óptima utilización como fertilizante de praderas.
- (6) Finalmente el producto de interés es biogás con alto contenido en Metano y alto poder calorífico.

3.2.1. Balance másico de la instalación

Dados los datos de la composición biológica y química presentes en la biomasa la dinámica del proceso de digestión anaeróbica puede ser identificada con las líneas de corriente de la tabla 3.11.

Tabla 3.11: Balances másicos mensuales

Etapas de Fermentación	Corriente											
	(1)		(2)		(3)		(4)		(5)		(6)	
Temperatura (°C)	25		25		25		30		60		50	
Presión (atm)	1		1		1		1,07		1,1		1,1	
	kg/ mes	kmol/ mes	kg/ mes	kmol/ mes	kg/ mes	kmol/ mes	kg/ mes	kmol/ mes	kg/ mes	kmol/ mes	kg/ mes	kmol/ mes
Compuesto												
Sólidos volátiles	---		1200	14	1200	14	4859	56	4859	56		---
Sólidos no volátiles	---		30	0	30	0	26	0	26	0		---
Nitrógeno (N ₂)	---		105	4	105	4	105	4	105	4		---
Potasio (K)	---		75	2	75	2	75	2	75	2		---
Fósforo (P)	---		68	2	68	2	68	2	68	2		---
Biomasa total	---		22,5		22,5		249		106	---		---
HCO ₃	---		---		---		4243	70	4243	70		---
Acetato	---		---		---		8237	140	7186	122		---
Hidrógeno total	---		---		---		420	210	18	9		---
Sólidos Totales			1500	22	1500	22	18283	484	16685	265		
H ₂ O	5359	298	13500	750	28500	1583	27239	1513	27370	1521		---
Metano	---		---		---		---		---		315	20
H ₂ S	---		---		---		---		---		18	1
CO ₂	---		---		---		---		---		702	16
Biogás	---		---		---		---		---		1036	36

Fuente: Anexo B, Balances másicos.xls

3.2.2. Biomasa y Producción de biogás

La biomasa que da origen a la producción de biogás es un porcentaje muy bajo del total de sustrato utilizado y en particular la producción queda determinada por la cantidad de materia orgánica seca presente a continuación se muestra la tabla 3.12 con los datos para el proyecto seleccionado, además se muestra la generación de biogás al año, estos datos son de vital importancia para conocer la energía disponible en la instalación.

Tabla 3.12: Generación de biogás

UAE	dm [t/a]	odm [t/a]	Generación mínima de biogás [m3/a]	Generación máxima de biogás [m3/a]	Generación promedio de biogás [m3/a]
46	93,15	70,794	21238,2	49555,8	35397

3.2.3. Producción de sólidos y líquidos

Los sólidos y líquidos son calculados a partir de los datos de la tabla 3.13, donde se caracteriza el estiércol generado por cada animal, además muestran los porcentajes contenidos de biomasa útil y la capacidad para generar metano.

Tabla 3.13: Caracterización del estiércol utilizado.

	min	max	Priomedio	unidad
Estiercol por cabeza	22,5	22,5	22,5	[m3/a]
Materia seca	0,085	0,095	0,09	[%]
Materia seca orgánica	0,71	0,81	0,76	[%]
Rendimiento biogas	300	700	500	[m3/T_odm]
Metano contenido	0,5	0,7	0,6	[%]
Tiempo de retención	25	25	25	[d]
% mat seca ajustado			0,13	[%]

3.2.4. Manejo de residuos sólidos y líquidos

Sobre el manejo de los purines en los establos se deben seguir las recomendaciones ^[19] de FEDELECHE¹¹ que se resumen en lo siguiente:

- 1) Realizar un primer barrido en seco, manual o mecánico, de corrales y salas de ordeña, y posteriormente usar un sistema de lavado con agua a alta presión y bajo caudal. Con esta medida se busca minimizar el ingreso de aguas limpias al sistema.
- 2) Cuando se trate de corrales con piso de concreto, se recomienda realizar dos limpiezas por día.

¹¹ Federación Nacional de productores de Leche

- 3) En el caso de corrales con piso de tierra, se recomienda retirar el estiércol periódicamente. Si existiese riesgo de escurrimientos hacia cursos de agua superficial, el retiro debe ser previo a la época de lluvias.
- 4) Reutilizar el agua proveniente del lavado del sistema de enfriamiento de leche.
- 5) Se debe mantener un control estricto en el uso de detergentes y desinfectantes en el lavado de la sala de ordeña, usando las dosis recomendadas por los fabricantes.
- 6) Desviar las aguas lluvia a través de canaletas, práctica que cobra gran relevancia en las explotaciones del sur del país.
- 7) Mantener en óptimas condiciones las cañerías e instalaciones del sistema de lavado a fin de evitar pérdidas de agua.
- 8) Evitar mantener mangueras con agua corriendo.
- 9) Para reducir la generación de excretas de los animales en la sala de ordeña y/o patio de alimentación, se recomienda evitar situaciones que generen stress al rebaño.

3.2.4.1. Aplicación de purines al suelo.

Es necesario contar con sistema de homogenización del purín, previo a su distribución en el suelo. Para estos efectos se utilizan, entre otros sistemas, los pozos purineros, que son estructuras en las que se almacena en forma transitoria el purín, a través de un sistema de agitación. Estos pozos se usan además, para separar la fase sólida y líquida. Al respecto, se recomienda considerar en su construcción y manejo, lo siguiente:

- 1) El terreno donde se ubiquen pozos purineros debería presentar una pendiente que impida el escurrimiento superficial fuera de éste.
- 2) Evaluar la conveniencia de contar con más de un pozo en base a la cantidad de purines que genere la explotación, con el objeto de facilitar su manejo posterior.
- 3) Considerar la construcción de pozos circulares ya que facilitan la homogenización de su contenido. La construcción de taludes (paredes inclinadas) dependerá del tipo de suelo, así, suelos más livianos deberán tener una inclinación de 1:1 ó 1:2, es decir, por cada un metro de profundidad uno o dos metros horizontales. En suelos más firmes, esta proporción podrá ser de 1:0,5.
- 4) Implementar un sistema de impermeabilización del pozo purinero para evitar infiltraciones, considerando el tipo de suelo y características del sector en que éstos se ubiquen.

- 5) Desviar precipitaciones, a través de canales o zanjas, para evitar su ingreso al pozo purinero.
- 6) Utilizar rejillas en los fosos o canales que conducen los purines al pozo, de forma de evitar el ingreso de materiales no deseados como trozos de madera, alambres, piedras, arena, etc.
- 7) Disponer de infraestructura necesaria, como lagunas o piscinas impermeabilizadas, para la acumulación de purines en la época en que no es posible aplicarlos al suelo.
- 8) Realizar un análisis químico del contenido de nitrógeno de los purines y del suelo en que será aplicado, y de acuerdo a las necesidades del cultivo, calcular la dosis de aplicación.
- 9) Realizar la aplicación cuando las condiciones del suelo y climáticas lo permitan, no aplicar en épocas de lluvia intensa o cuando existan riesgos de saturación del suelo.
- 10) Utilizar un sistema y tasa de aplicación de purines que permita su distribución en el suelo en forma homogénea.
- 11) Evitar la aplicación de purines al atardecer o durante la noche ya que si existiese alguna falla en el sistema de aplicación sería difícil detectarla.
- 12) No aplicar purines en suelos con una pendiente mayor al 15%.
- 13) En las aplicaciones de purines dejar una franja de protección no menor de 3 [m] de quebradas y de cuerpos y cursos de aguas naturales y artificiales.
- 14) No aplicar purines en suelos con inundación frecuente y en suelos donde se puedan producir lagunas.
- 15) No aplicar purines en cultivos de frutas y hortalizas que se desarrollan a ras de suelo y que habitualmente se consumen en estado crudo.

4. Diseño básico de la instalación

La instalación busca no interferir con las prácticas habituales de aprovechamiento lechero y de manejo de purines y por ende se debe acoplar a la configuración clásica de manejo a través de pozo de purines y tomar una fracción de los purines en el caso de ser un plantel de tamaño mayor a 46[UAE] y la totalidad de los purines en el caso de ser un plantel de tamaño igual a 46[UAE].

4.1. Layout de la instalación

En la figura 3.3, se muestra un Layout básico de la instalación y el flujo utilizado corresponde a la corriente (3) del esquema, los resultados de esta utilización son biogás y biofertilizante.

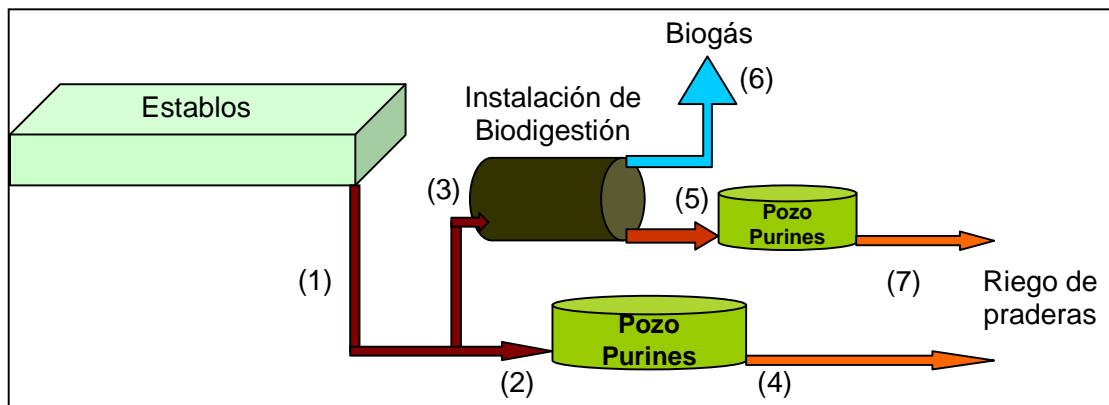


Figura 3.3, Layout básico de la configuración tradicional y la adhesión del proyecto

Donde:

- (1) Purines de la estabilización
- (2) Fracción de purines a no biodigerir
- (3) Fracción de purines a biodigerir
- (4) Purines homogeneizados (proceso tradicional) para riego de praderas
- (5) Purines biodigeridos
- (6) Biogás producto del proceso de biodigestión
- (7) Biofertilizante para riego de praderas

4.2. Diseño del estanque de biodigestión

La norma API 650 considera el diseño del manto del estanque, de cabezales, soportes, flanches y boquillas para la operación de este componente, en la figura 4.1 se observan las dimensiones básicas del estanque y un diagrama simplificado que muestra la localización de los momentos máximos identificables en el eje del estanque.

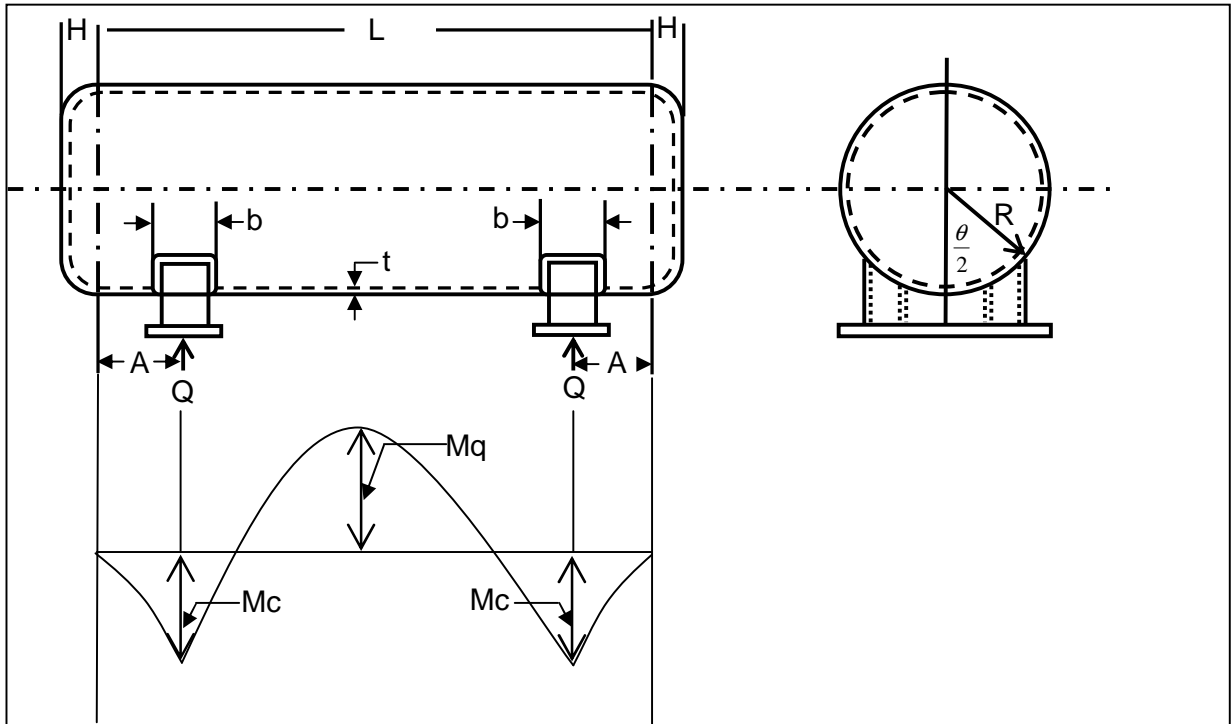


Figura 4.1, Esquema de un estanque de almacenamiento

Donde:

- H = Profundidad del cabezal [m]
- L = Largo tangencial del estanque [m]
- A = Distancia entre el centro del soporte y la línea tangente [m]
- b = Ancho de la plancha de refuerzo [m]
- R = Radio interno del estanque [m]
- θ = Arco donde actúa el soporte [°]
- Q = Carga a soportar por cada soporte [kgf]
- Mc = Momento máximo en los soportes [kgfm]
- Mq = Momento máximo en el centro del estanque [kgfm]

4.2.1. Parámetros de diseño

4.2.1.1. Volumen requerido del biodigestor

El volumen requerido por el biodigestor debe ser considerado utilizando la carga volumétrica (Volume Load, VL) a soportar o por el tiempo de retención hidráulico (Hydraulic retention time, HRT), ambos métodos se muestran a continuación:

Carga volumétrica:

La carga volumétrica representa el volumen necesario para biodigerir 1[kg] de materia orgánica seca y se estima que del orden de 3,5 [kg] de odm utilizan 1 [m^3] del biodigestor, este método es muy dependiente de la correcta estimación de la carga volumétrica.

$$V = \frac{\phi odm}{VL}$$

Donde:

$V =$ Volumen requerido del biodigestor

$\phi odm =$ Flujo de materia orgánica seca diaria [kg/d]

$VL =$ Carga volumétrica considerada [$\frac{kg_{odm}}{m^3 \cdot d}$]

Estos datos y su resultado se resumen en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Resumen del cálculo de volumen según método de carga volumétrica

Parámetro	Valor	Unidad
Flujo odm anual	70,74	[t/a]
Flujo odm diario	193,9	[kg/d]
Carga volumétrica	3,5	$[\frac{kg_{odm}}{m^3 \cdot d}]$
Volumen del biodigestor	55,4	$[m^3]$

Tiempo hidráulico de retención:

El estanque opera admitiendo 1,76 [m³] durante 25[días] la mezcla que contiene posee densidad similar al agua 1000[kg/m³], dado esto el estanque debe cumplir con un volumen de diseño según alguno de los dos criterios presentados a continuación:

$$V = \phi_s \cdot HRT$$

Donde:

ϕ_s = Carga diaria ajustada a un contenido de materia seca del 13[%]

HRT =Tiempo hidráulico de retención.

Estos datos y su resultado se resumen en la tabla 4.2.

Tabla 4.2: Resumen del cálculo de volumen según método HRT

Parámetro	Valor	Unidad
Carga diaria de substrato	2,83	[t/d]
Porcentaje de materia seca	13,7	[%]
Contenido deseado de materia seca	13	[%]
Suministro diario	1,96	[m ³ / d]
Tiempo de retención	25	[d]
Volumen del biodigestor	49,1	[m ³]

4.2.1.2. Substrato:

El estanque está en contacto directo con los purines que tienen un potencial corrosivo bajo pero aún así se debe cuidar esta interacción, hay ausencia de oxígeno y existe proliferación de bacterias mesofílicas en la primera etapa de biodigestión y bacterias termofílicas en la segunda etapa de biodigestión lo que disminuyen el ph de la mezcla y por ende implica asegurar una tolerancia a la corrosión y verificarla en el cálculo de espesor del manto del estanque.

4.2.1.3. Condiciones de operación:

El estanque opera a temperatura ambiente que oscila entre (-5 y 30 [°C]), la humedad relativa del ambiente es frecuentemente alta y al estar aislado opera a presión de 1[bar] ambiente en el que se favorece la digestión anaeróbica.

4.2.1.4. Geometría:

Como se estudió en los antecedentes la geometría de este tipo de aplicaciones es esencialmente cilíndrica y debe buscar una relación

$$D/H = 1/4$$

Donde:

D = Diámetro del cilindro

L = Largo del estanque

4.2.1.5. Espesor del estanque

El criterio utilizado corresponde a modelamiento por elementos finitos apoyado en la utilización del estándar API 650 (Anexo II) para la determinación del espesor del estanque, este estándar utiliza nomenclatura y fórmulas que operan con unidades del sistema inglés pero los resultados obtenidos serán mostrados en unidades del sistema inglés y sistema internacional para facilitar la comprensión.

Espesor de diseño

$$e_d = \frac{\rho(H-1) \cdot d}{144 \cdot 2 \cdot S_d \cdot E} + c$$

$$e_d = 0,11[in]$$

$$e_d = 2,9[mm]$$

Espesor hidrostático

$$e_t = \frac{\rho(H-1) \cdot d}{144 \cdot 2 \cdot S_t \cdot E}$$

$$e_t = 0,05[in]$$

$$e_t = 1,31[mm]$$

Donde:

e_d = Espesor de diseño [in]

e_t = Espesor hidrostático [in]

d = Diámetro nominal del tanque [in], $d = 98$ [in]

c = Corrosión permitida [in], $c = 1/16$ [in]

S_d := Esfuerzo de diseño permisible [psi], $S_d := 15000$ [psi]

S_t := Esfuerzo hidrostático permisible [psi], $S_t := 17500$ [psi]

E = Eficiencia de la junta ^[20], $E=0,8$

Espesor seleccionado

La norma API 650 recomienda utilizar como espesor mínimo en planchas de aceros al carbono un valor de $1/4$ [in], esto equivale a 6,35[mm], como el valor calculado para el espesor de diseño es inferior a este mínimo se fija el espesor del manto del estanque en el valor mínimo.

Tabla 4.3, Espesor seleccionado para el diseño del manto del estanque

Parámetro	Valor
Espesor	$1/4$ [in]
Espesor	6,35[mm]

4.2.2. Soporte del estanque

a) Cargas a soportar:

El componente debe soportar la mitad de la carga de purines más el peso del tambor esto equivale a:

$$C_T := C_1 + C_2 + C_3 + C_4$$

$$C_T := 3300[\text{Kg}]$$

Donde:

C_T = Carga Total [kg]

C_1 = Carga generada por los purines contenidos en el manto cilíndrico [kg]

C_2 = Carga generada por los purines contenidos en los cabezales [kg]

C_3 = Carga generada por el manto [kg]

C_4 = Carga generada por los cabezales [kg]

$$C_1 = \pi \cdot r^2 \cdot L \cdot \rho_s$$

$$C_1 = 50,5[t]$$

Donde:

$$\begin{aligned} r &= \text{Radio del estanque [m]} &= & 1,25[m] \\ L &= \text{Largo del estanque [m]} &= & 10[m] \\ \rho_s &= \text{Densidad del substrato [kg/m}^3] &= & 1000[\text{kg/m}^3] \end{aligned}$$

$$C_2 = 0,4536 \cdot 0,000076 \cdot d^3 \cdot \rho_s$$

$$C_2 = 2,37[t]$$

Donde:

$$\begin{aligned} d &= \text{diámetro del estanque [in]} &= & 98,4[\text{in}] \\ \rho_s &= \text{Densidad del substrato [kg/m}^3] &= & 1000[\text{kg/m}^3] \end{aligned}$$

$$C_3 = \frac{\pi \cdot d \cdot L \cdot e \cdot \rho_{\text{acero}}}{4 \cdot 1728} \cdot 0,4536$$

$$C_3 = 4[t]$$

Donde:

$$\begin{aligned} d &= \text{diámetro del estanque [ft]} &= & 8,2[\text{ft}] \\ L &= \text{Largo del estanque [ft]} &= & 33,8[\text{ft}] \\ \rho_{\text{acero}} &= \text{Densidad del acero [lb/ft}^3] &= & 490[\text{lb/ft}^3] \\ e &= \text{Espesor del manto [in]} &= & 0,25[\text{in}] \end{aligned}$$

$$C_4 = \frac{\pi \cdot d_{eq}^2 \cdot e \cdot \rho_{\text{acero}}}{4 \cdot 1728} \cdot 0,4536$$

$$C_4 = 0,39[t]$$

Donde:

$$\begin{aligned} d_{eq} &= \text{diámetro equivalente cabezal [in]} &= & 120[\text{in}] \\ \rho_{\text{acero}} &= \text{Densidad del acero [lb/ft}^3] &= & 490[\text{lb/ft}^3] \\ e &= \text{Espesor del manto [in]} &= & 0,25[\text{in}] \end{aligned}$$

Luego la carga total a soportar se observa en la tabla 4.4.

Tabla 4.4: Cargas soportadas

Parámetro	Valor [t]
C_1	50,5
C_2	2,37
C_3	4
C_4	0,39
C_t	57,2

b) Geometría:

El componente debe conjugar con el manto del tambor y a su vez con el nivel donde se instalará el equipo

c) Condiciones de operación:

El componente opera a temperatura ambiente que oscila entre (-5 y 30 [°C]), la humedad relativa del ambiente es frecuentemente alta.

4.2.2.1. Criterio de diseño

El criterio utilizado corresponde al estándar API 650 apoyado en un criterio de diseño que considera esfuerzo normal y de corte sobre el nervio del apoyo (principal sostén de las cargas consideradas)

Espesor del nervio del soporte para esfuerzo equivalente

Se calculará el espesor del nervio para el caso que este está sometido a esfuerzo normal y esfuerzo de corte con un factor de seguridad $n=4$.

El arco donde ocurre el apoyo de la carga sobre el nervio corresponde a $\frac{1}{16}$ del manto del estanque soportado por ende el área de apoyo a considerar es:

$$A = L \cdot e$$

Donde:

A := Área de apoyo [m^2]

L := Arco de poyo [m], $L = 0.49[m]$

e := espesor del nervio [m]

El esfuerzo normal soportado por el nervio corresponde a.

$$\sigma_n = \frac{F}{A} [pa]$$

La fuerza de corte V , presente en la sección corresponde a $\frac{1}{3} \cdot F$, vale decir a un tercio de la fuerza normal

Donde:

F := Fuerza normal al apoyo, $F = 28642[Kgf] = 281[kN]$

V := Fuerza de corte, $F = 9548[Kgf] = 93[kN]$

$$\sigma_{eq} = \sqrt{(\sigma_n)^2 + 3 \cdot (\tau)^2} [Pa]$$

$$\sigma_n = \frac{F}{A} [Pa]$$

$$\tau = \frac{3}{2} \cdot \frac{V}{A}$$

σ_n := Esfuerzo normal [Pa]

τ := Esfuerzo de corte [Pa]

σ_{eq} := Esfuerzo equivalente para este caso.

Se impone un factor de seguridad $n=4$ y se considera un esfuerzo de fluencia $\sigma_y = 240[MPa]$, se puede calcular el espesor de la siguiente forma:

$$e := \frac{n \cdot F \cdot \sqrt{\frac{7}{4}}}{L \cdot \sigma_y} = 0.0107[m]$$

$e = 10[mm]$

Ubicación del soporte y arco que sostiene

Los soportes

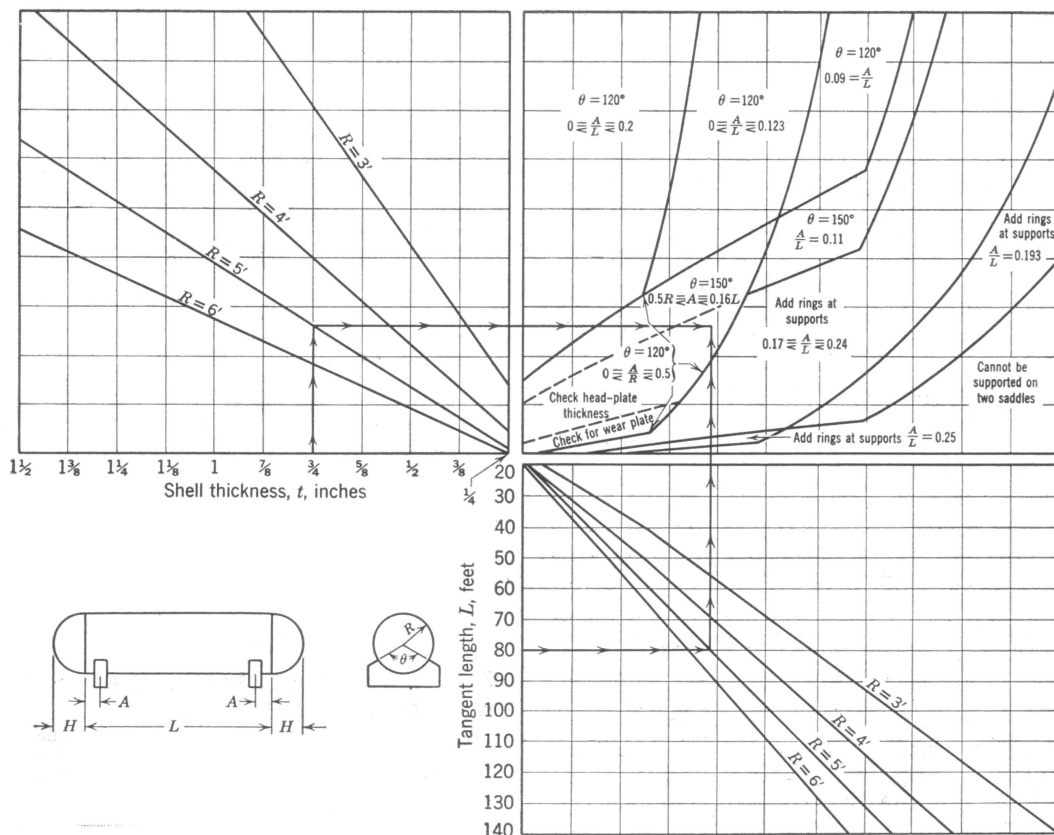


Figura 4.2: Posición y tipo de soporte para estanques horizontales^[20]

La forma de utilizar la figura 4.2, es conjugando el espesor del manto con el radio de este y por otra entrada el largo tangente del estanque con radio de este, la intersección de las líneas cae en una zona que recomienda el arco donde debe actuar el soporte y la distancia entre la línea tangente y el centro del soporte, en la figura se observa un ejemplo para un espesor del manto de $\frac{3}{4}$ [in], con un radio de 5[ft] y un largo del manto cilíndrico de 80[ft].

Para el proyecto seleccionado los datos a utilizar son:

Tabla 4.5: Datos generales del estanque

Parámetro	Valor	Unidad
Espesor	1/4	[in]
Radio	4,1	[ft]
Largo tangente	34	[ft]

De la figura 4.2 y los datos de la tabla 4.5 se obtiene el arco que subtiende el soporte es $\theta = 120[^\circ]$ y se recomienda que la distancia entre el centro del soporte y la línea tangencial cumpla la desigualdad siguiente:

$$0 \leq \frac{A}{R} \leq 0,5$$

Dado esto la distancia A se fija en 0,64[m]

4.3. Diseño del sistema de bombeo

4.3.1.1. Parámetro de diseño

a) Flujo másico:

Las bombas y sus tuberías operan entregando los purines bovinos líquidos al reactor secundario, esto implica que cada 10 [días] debe bombear 6[m³] de purines líquidos.

b) Substrato:

Las tuberías están en contacto directo con los purines que tienen un potencial corrosivo bajo pero aún así se debe cuidar esta interacción.

La bomba está operando con un fluido de densidad $\rho = 1160[\text{kg}/\text{m}^3]$ y que se debe considerar como agua sucia de industria con bajo contenido en sólidos.

c) **Condiciones de operación:**

Las bombas y sus tuberías operan a temperatura ambiente que oscila entre (-5 y 30 [°C]), la humedad relativa del ambiente es frecuentemente alta y la presión d trabajo es la del fluido 1 [bar]

4.3.1.2. Cálculo diámetro de tuberías

Asumiendo que la mezcla se debe descargar en 0,5[H] y la velocidad del flujo másico debe ser de 10 [m/s]

Se tiene que el diámetro de la tubería de descarga D_{dbr} es:

$$D_{tubdesc} = \sqrt{\frac{V_{T2}}{t_{dt2}}} \cdot \frac{4}{\pi \cdot v_{dt2}} = 8,3[cm]$$

Donde:

$D_{tubdesc}$ = Diámetro de tuberías [cm]

V_T = Flujo volumétrico considerado 49[m³]

t_{dt} := Tiempo de descarga del estanque 0,5[hr]

v_{dt} := Velocidad del flujo másico 10 [m/s]

4.3.1.3. Espesor mínimo de tuberías

El espesor mínimo de la tubería corresponde al espesor que soporta la presión de operación, los estándares de tuberías exigen materiales ASTM A-53, por lo que el espesor mínimo de la tubería queda determinado por:

$$e_{min} = \frac{PN \cdot D}{2\sigma_s + PN} = 0.03[mm]$$

Donde:

e_{min} := Espesor mínimo de la tubería [mm]

PN := Presión nominal de operación [MPa], $PN := 0,1[MPa]$

D := Diámetro externo de la tubería [mm], $D := 150[mm]$

σ_s := Tensión de diseño [MPa], $\sigma_s := 294[MPa]$

4.3.1.4. Cálculo potencia de operación de la bomba

Las bombas operan evacuando un caudal máximo nominal de 6 [m³/h] y la presión del fluido transportado es de 1[bar]

Luego la potencia necesaria de las bombas a utilizar equivale a:

$$P_{BT1}^* = \frac{V_{bt1}^* \cdot \Delta P_{T1}}{\eta_{BT1}}$$

$$P_{BT1}^* = 0.67[kW]$$

Donde:

P_{BT1}^* := Potencia de diseño de la bomba [kW]

V_{bt1}^* := Flujo volumétrico a bombear, $V_{bt1}^* = 100[m^3/h]$

ΔP_{T1} := Diferencia de presiones entre carga y descarga $\Delta P_{T1} = 0,29[bar]$

η_{BT1} := Factor de corrección de la bomba $\eta_{BT1} = 1.2$

4.3.1.5. Selección de la bomba

La bomba según los parámetros de diseño debe tolerar un fluido parecido al agua de drenajes con un bajo nivel de corrosión además debe ser compatible con la geometría del equipo y el espacio entre estanques.

En el gráfico siguiente (figura 4.3) se observa la curva del sistema, el punto de diseño y la curva de una bomba Calpeda C22-1E.

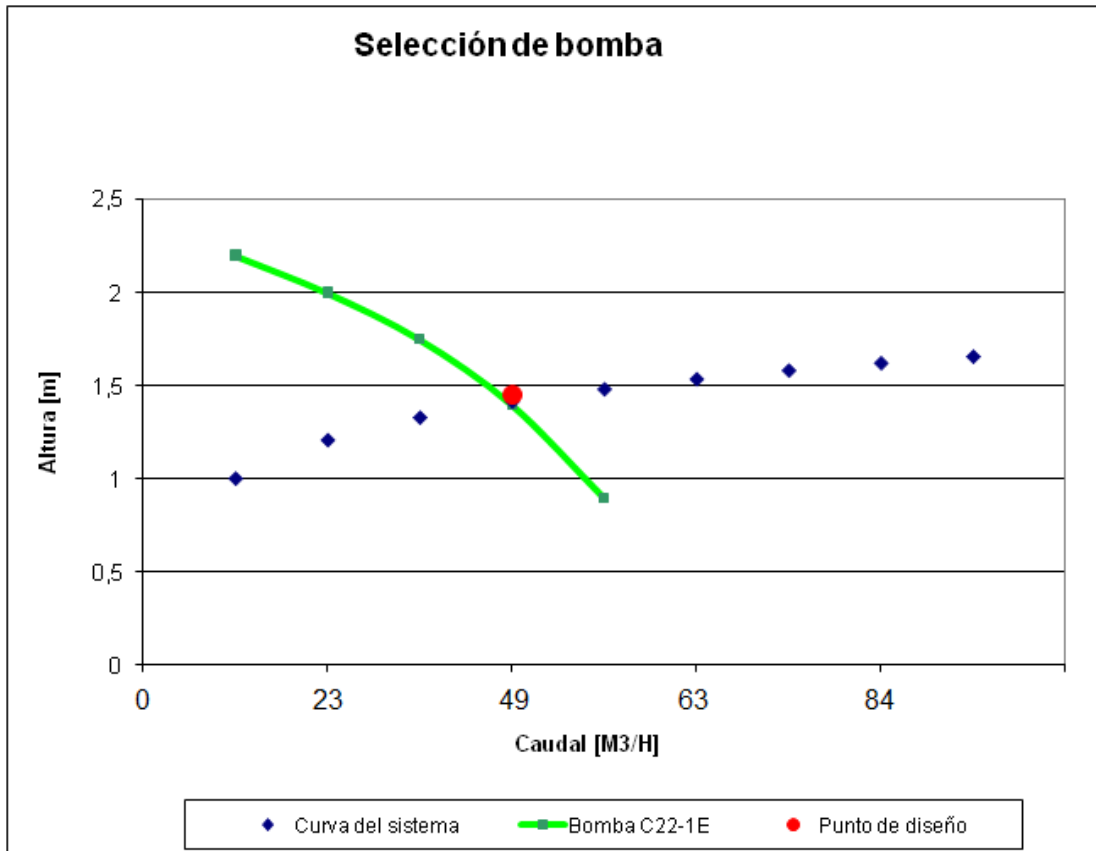


Figura 4.3. Parámetros de selección de la bomba centrífuga.

La bomba es seleccionada según los parámetros de diseño y cálculo de potencia, luego del catálogo Calpeda de bombas, ver Anexo C se selecciona la bomba descrita en la tabla 4.6.

Tabla 4.6 Bomba seleccionada

Parámetro	
Marca	Calpeda
Modelo	C22-1E
Sección de la bomba	100[mm]
Caudal máximo	56[m ³ /h]
Elevación máxima	15[m]
Presión máxima	2[bar]
Temperatura máxima de operación	180[°C]

4.4. Equipos complementarios

4.4.1. Antorcha

La antorcha se encarga de eliminar el exceso de biogás (no utilizado) por medio de la combustión de este, debe ser capaz de operar a la condición de máxima generación de biogás que corresponde a los datos de la tabla 4.7.

Tabla 4.7: Capacidades de generación de biogás.

UAE	dm [t/a]	odm [t/a]	Generación mínima de biogás [m3/a]	Generación máxima de biogás [m3/a]	Generación promedio de biogás [m3/a]
46	93,15	70,794	21238,2	49555,8	35397

Y por ende la capacidad nominal de la antorcha corresponde al máximo de la tabla 4.8

Tabla 4.8: Capacidades de generación de biogás.

UAE	Capacidad mínima de la antorcha [m3/h]	Capacidad máxima de la antorcha [m3/h]
46	2,4	5,7

4.4.2. Agitador

Se considera la alternativa de implementar un agitador con el cual se logra una mayor homogeneidad de los purines en fermentación y con ello la mejora de la producción de biogás

4.4.2.1. Parámetro de diseño

a) Substrato:

El agitador está sumergido en purines de bovino.

b) Condiciones de operación:

El agitador opera a temperatura entre (30 y 60 [°C]), hay alta humedad relativa del ambiente y la presión de trabajo es 1 [bar], el agitador debe ser sumergible.

4.4.2.2. Calculo del agitador

El agitador debe permitir que el substrato esté lo más homogéneo posible para permitir el óptimo funcionamiento de la etapa de metanogénesis, se considera que para aplicaciones domésticas un funcionamiento de 5 [min/h] es suficiente para lograr la homogeneidad, por esto el dimensionamiento del agitador es el siguiente:

Fijando el diámetro del agitador en $D_{at2} = 0.20[m]$

A este valor le corresponde un coeficiente de newton

- $N_{at1} = 0.33$

La velocidad de funcionamiento del agitador se fija en 250 [rpm]

Por tal motivo la potencia del agitador P_{at2}^* es:

$$P_{at2}^* = 1.3 \cdot N_{at2} \cdot \rho_s \cdot n_{at2}^3 \cdot D_{at2}^5$$
$$P_{at2}^* = 2.46[kW]$$

Donde:

P_{at2}^* = Potencia del agitador [kW]

N_{at2} := Coeficiente de newton del agitador [-]

ρ_s := Densidad del fluido a agitar [kg/m³]

n_{at2} := Velocidad de giro del agitador [rpm]

D_{at2} := Diámetro de la paleta del agitador [m]

4.5. Pérdidas y aportes de calor

Para conocer un balance de energías es necesario ver los aportes y pérdidas de calor presentes en el equipo.

4.5.1. Calor aportado al fluido

Es importante controlar la temperatura en el biodigestor para facilitar la generación de biogás, se debe aportar calor necesario para el sustrato ingresado cada día, diariamente se agregan 1964[kg] de sustrato.

El calor necesario para calentar el sustrato es:

$$Q_s = M_s^* \cdot c_{es} \cdot \Delta T_{t2} = 1964[kg/d] \cdot 4200\left[\frac{J}{kg^\circ C}\right] \cdot 50[C]$$
$$Q_s = 4,7[kW]$$

4.5.2. Pérdida de calor por las paredes

La temperatura al rango termofílico corresponde a $T_{t2\max} = 60[^\circ\text{C}]$ y al exterior la mínima temperatura del entorno es de $T_{ent\min} = -5[^\circ\text{C}]$, a su vez la temperatura ambiente normal de operación corresponde a $T_{entnor} = 10[^\circ\text{C}]$, luego la variación de temperatura a lograr corresponde a:

$$\Delta T_{T2} = T_{t2\max} - T_{entnor} = 50[^\circ\text{C}]$$

Si se recubre la totalidad del estanque con poliestireno de 0.05 [m] de espesor cuyo

$$\text{coeficiente de transmisión de calor } \lambda_{est} = 0,05 \left[\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} \right]$$

Los coeficientes de transferencia de calor se pueden asumir como:

$$\alpha_{t2i} := 4000 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right], \text{ esto para un liquido agitado}$$

$$\alpha_{t2e} := 10 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}} \right], \text{ esto para el ambiente que rodea el tanque 2}$$

La conducción equivalente se puede calcular como:

$$k_{t2} = \frac{1}{\left(\left(\alpha_{t2i} + \frac{0,05}{\lambda_{est}} + \alpha_{t2e} \right) \right)} = 0,1 \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}} \right]$$

El área de intercambio térmico corresponde a:

$$A_{t2} = \left(\pi \frac{D_{t2}^2}{4} + \pi \cdot D_{t2} \cdot L_{t2} \right)$$

$$A_{t2} = 176[\text{m}^2]$$

Luego el calor perdido a través de las paredes corresponde a:

$$Q_{ps} = k_{t2} \cdot A_{t2} \cdot (T_{T2\max} - T_{ent\min})$$

$$Q_{ps} = 2,28[\text{kW}]$$

4.6. Balance energético

En la tabla 4.9, se observan los consumos energéticos presentes y la energía disponible en el equipo considerando que están siendo utilizados todos los consumos internos

Tabla 4.9, Energías utilizadas y disponibles en el biodigestor

			Total	Balance
Consumo de energía	Abreviación	Valor		
Agitador	Pat2	2,46[Kw]	10,04[Kw]	(+0,16[Kw])
1 Bombas	Pb	0,6[Kw]		
Consumo calor substrato	Qs	4,7[Kw]		
Perdidas calor T2	Qps	2,28[Kw]		
Energía disponible en el biogás	-	10,12 [KwH]	10,2 [Kw]	

En condiciones normales de trabajo las bombas y el agitador no están operando y por ende la energía disponible se resume en la tabla 4.10.

Tabla 4.10: Energía disponible en condiciones de trabajo

			Total	Balance
Consumo de energía	Abreviación	Valor		
Consumo calor substrato	Qs	4,7[Kw]	6,35[Kw]	(+4,05[Kw])
Perdidas calor T2	Qps	2,28[Kw]		
Energía disponible en el biogás	-	10,12 [KwH]	10,2 [Kw]	

5. Conclusiones y comentarios

Se puede generar un equipo técnica y económicamente viable para solventar las necesidades energéticas de los pequeños ganaderos y lecheros.

Existe un criterio de fácil verificación que permite decidir la viabilidad del proyecto y con la ayuda de índices generales entrega el tiempo de recuperación de la inversión.

Con un mínimo de 20 animales es posible generar energía eléctrica del orden de 4,4 [kWH] y ser aprovechada a través de un generador eléctrico alimentado con biogás.

Con un mínimo de 44 animales es posible generar un proyecto de generación que tiene un período de recuperación de la inversión de 3 años, tiempo prudente para el sector económico involucrado.

La construcción de los estanques y las instalaciones adjuntas tienen una gran participación en los costos y se pueden estudiar maneras de disminuir costos a través de instalaciones outdoor donde el estanque biodigestor está expuesto al ambiente.

La utilización de acero en el diseño de estanques de baja presión de trabajo sobrecarga el costo de inversión del proyecto y se deben estudiar formas de utilizar materiales más económicos.

La construcción de un estanque cilíndrico horizontal no es la única alternativa o configuración útil para el diseño del estanque biodigestor y se debe estudiar la configuración vertical mostrada en los antecedentes correspondiente a biodigestores tipo instalación industrial.

La biomasa para el proyecto abordado produce del orden de 5 [m³/H] de biogás por lo que la no utilización de este flujo volumétrico de biogás exige la incorporación de un antorcha que sea capaz de eliminar vía combustión el biogás excedente.

La generación de biofertilizante va acompañada del manejo de purines del sustrato utilizado, para este proyecto los sólidos generados son del orden de 129 [t/a] y deben estar en concordancia con las recomendaciones de manejos de purines estudiadas.

Los líquidos generados al año son del orden de 864 [m³/a] y a nivel detallado se debe estudiar la composición con el fin de seleccionar un filtro que permita la reutilización del agua presente en el proceso.

El aporte de calor al sustrato y las pérdidas de calor presentes son una componente que representa el 60% de la energía disponible en el proceso por lo que se debe cuidar y estudiar la forma de disminuir este consumo.

La curva de período de recuperación del proyecto es decreciente en función del tamaño de plantel por lo que a mayor número de animales considerados el proyecto será recuperable

antes, este estudio no muestra el comportamiento respecto al límite superior de la rentabilidad debido a que no es posible escalar el proyecto con los componentes acá descritos, basta considerar el problema de manejo de grandes volúmenes de líquidos y sólidos el cuál es un problema en sí mismo y ya no solo una parte del proyecto.

6. Bibliografía

- [1] Human Development Index. Programa de las naciones unidas para el desarrollo (PNUD)(2008)(Pág. 25).
- [2] Comisión Nacional de Energía, Subsecretaría de desarrollo regional y administrativo, Informe Final programa de electrificación rural, Chile (Junio de 2005)
- [3] Instituto Nacional de Estadísticas, Censo Agropecuario 2007.
- [4] Biogas from waste and renewable, Dieter Deublein y Angélica Steinhauser, 2008 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim
- [5] Samani, Zohrab. “Generación de energía y fertilizantes orgánicos a partir de residuos agrícolas”. Universidad del Estado de Nuevo México, Estados Unidos. 2004.
- [6] Zorg. “Biogas plants for pig and cattle-breeding farms”. [En línea]. <<http://zorg-biogas.com/biogas-plants/industrial-solutions/biogas-plants-for-pig-and-cattlebreeding-farms>> [consulta: 13 agosto 2009].
- [7] Raymond C. Loehr & Diann T. Schwegler, Filtration Method for Bacteriophage Detection, USA (Noviembre de 1965)
- [8] Ward A. et al. “Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources”. Bioresource Technology, volumen 99, 2008, pág. 7928-7940.
- [9] Martínez R., Chávez E., López I, Utilización del biogás como combustible para motores de combustión interna. En: V Conferencia Internacional de Ingeniería Mecánica (COMEC), 4-6 de noviembre de 2008, UCLV, Santa Clara, Cuba. Centro de Estudios de Termoenergética Azucarera (CETA), 2008. 8 p.
- [10] Ward A. et al. “Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources”. Bioresource Technology, volumen 99, 2008, pág. 7928-7940.
- [11] Biodigestores, una alternativa a la autosuficiencia energética y de bio-fertilizantes. Fundación Hábitat, Colombia(Abril de 2005).
- [12] Biodigestor de bajo costo para la producción de combustible y fertilizante a partir de excretas Raúl Botero B y Thomas R. Preston (1987).
- [13] Kiely G., Ingeniería Ambiental Fundamentos, entornos, tecnologías y sistemas de gestión. Vol. 3; 1999 Ed.McGraw-Hill
- [14]KTBL - Taschenbuch Landwirtschaft; VDI - Richtlinie 3472, 1998/1999

[15] Universidad de Vic. “Evaluación funcional de sistemas de tratamiento de deyecciones ganaderas”. [En línea]. <<http://www.arc.cat.net/es/altres/purins/guia/docs/rendiments.pdf>> [consulta: 14 septiembre 2009]

[16] Metcalf & Eddy. “Ingeniería de Aguas Residuales. Tratamiento, vertido y reutilización”. Volumen I. McGraw- Hill. 1996.

[17] Clark, R.H., Speece, R.E. The pH tolerance of anaerobic digestion. Advanced water pollution research. Int. Conf. 5th, 1989.

[18] INE, Censo de Población y Vivienda Resultados Generales, Chile 1992.

[19] Superintendencia de servicios sanitarios, Guía de recomendaciones manejo de purines de lechería, Chile, 2006.

[20] LLOYD E. BOROWNELL & EDWIN H. YOUNG, Process Equipment Design, 1959, USA.

A. Anexo I, Estándar API 650, Construcción de estanques de acero soldados.

APPENDIX A—OPTIONAL DESIGN BASIS FOR SMALL TANKS

A.1 Scope

- **A.1.1** This appendix provides requirements for field-erected tanks of relatively small capacity in which the stressed components have a maximum nominal thickness of 12.5 mm ($1/2$ in.), including any corrosion allowance specified by the purchaser. The stressed components include the shell and reinforcing plates, bottom and shell reinforcing plates for flush-type cleanout fittings and flush-type connections, and bottom plates that are welded to the shell, but the stressed components do not include other bottom plates, covers, and nozzle and manhole necks and their flanges.

- **A.1.2** This appendix is applicable only when specified by the purchaser and is limited to design metal temperatures above -30°C (-20°F) [above -40°C (-40°F) when killed, fine-grain material is used].

A.1.3 This appendix is applicable to any of the Section 2 materials, although the single allowable stress does not provide any advantage to higher strength steels.

A.1.4 This appendix states only the requirements that differ from the basic rules in this standard. When differing requirements are not stated, the basic rules must be followed; however, the overturning effect of a wind load should be considered.

A.1.5 Typical sizes, capacities, and shell-plate thicknesses are listed in Tables A-1 through A-4 for a design in accordance with A.4 (joint efficiency = 0.85; specific gravity = 1.0; and corrosion allowance = 0).

A.2 Materials

A.2.1 Shell-plate materials shall not be more than 12.5 mm ($1/2$ in.) thick, as stated in A.1.1.

A.2.2 For stressed components, the Group-I and Group-II materials listed in Table 2-3 may be used above a design metal temperature of -30°C (-20°F) but need not conform to the toughness requirements of 2.2.9, Figure 2-1, and 7.2.2. Group-III and Group-IIIA materials may be used above a design metal temperature of -40°C (-40°F) and shall conform to impact requirements of 7.2.2.

A.2.3 Material used for shell nozzle and manhole necks and flanges shall conform to 2.5, 2.6, and Table 2-3 but need not conform to the toughness requirements of 2.2.9, 2.5.5, and Figure 2-1.

A.3 Design

A.3.1 The maximum tensile stress before the joint efficiency factor is applied shall be 145 MPa (21,000 lbf/in.²).

A.3.2 Stresses shall be computed on the assumption that the tank is filled with water (specific gravity = 1.0) or with the liquid to be stored if it is heavier than water.

A.3.3 The tension in each ring shall be computed 300 mm (12 in.) above the centerline of the lower horizontal joint of the course in question. When these stresses are computed, the tank diameter shall be taken as the nominal diameter of the bottom course.

- **A.3.4** The joint efficiency factor shall be 0.85 with the spot radiography required by A.5.3. By agreement between the purchaser and the manufacturer, the spot radiography may be omitted, and a joint efficiency factor of 0.70 shall be used.

A.4 Thickness of Shell Plates

A.4.1 The minimum thicknesses of shell plates shall be computed from the stress on the vertical joints, using the following formula:

In SI units:

$$t = \frac{4.9D(H-0.3)G}{(E)(145)} + CA$$

where

t = minimum thickness, in mm (see 3.6.1.1),

D = nominal diameter of the tank, in m (see 3.6.1.1, Note 1),

H = design liquid level, in m (see 3.6.3.2),

G = specific gravity of the liquid to be stored, as specified by the purchaser. The specific gravity shall not be less than 1.0,

E = joint efficiency, which is either 0.85 or 0.70 (see A.3.4),

- CA = corrosion allowance, in mm, as specified by the purchaser (see 3.3.2).

In US Customary units:

$$t = \frac{2.6D(H-1)G}{(E)(21,000)} + CA$$

where

t = minimum thickness (in.) (see 3.6.1.1),

D = nominal diameter of the tank (ft) (see 3.6.1.1, Note 1),

H = design liquid level (ft) (see 3.6.3.2),

G = specific gravity of the liquid to be stored, as specified by the purchaser. The specific gravity shall not be less than 1.0,

E = joint efficiency, which is either 0.85 or 0.70 (see A.3.4),

- CA = corrosion allowance (in.), as specified by the purchaser (see 3.3.2).

A.4.2 The nominal thickness of shell plates (including shell extensions for floating roofs) shall not be less than that listed in 3.6.1.1. The nominal thickness of shell plates refers to the tank shell as constructed. The nominal thicknesses given in 3.6.1.1 are based on erection requirements.

A.5 Tank Joints

A.5.1 Vertical and horizontal joints in the shell, bottom joints, shell-to-bottom joints, wind-girder joints, and roof and top-angle joints shall conform to 3.1.5.

A.5.2 The requirements of 3.7.3 for the spacing of welds do not apply except for the requirement that the spacing between the toes of welds around a connection shall not be less than 2¹/₂ times the shell thickness at the connection.

A.5.3 When radiographic inspection is required (joint efficiency = 0.85), the spot radiographs of vertical joints shall conform to 6.1.2.2, Item a, excluding the 10 mm (3/8-in.) shell-thickness limitation in Item a and excluding the additional random spot radiograph required by Item a. The spot radiographs of horizontal joints shall conform to 6.1.2.3.

● **A.6 Intermediate Wind Girders**

Calculations for and installation of intermediate wind girders are not required unless specified by the purchaser.

A.7 Shell Manholes and Nozzles

A.7.1 Except for other designs and shapes permitted by 3.7.1.2, shell manholes shall conform to 3.7.5, Figures 3-4A and 3-4B, and Tables 3-3 through 3-7.

A.7.2 Shell nozzles and flanges shall conform to 3.7.6; Figures 3-4B, 3-5, and 3-7; and Tables 3-8 through 3-10.

A.7.3 The radiographic requirements of 3.7.3.4 do not apply.

A.8 Flush-Type Cleanout Fittings

A.8.1 The details and dimensions of flush-type cleanout fittings shall conform to 3.7.7, Figures 3-9 and 3-10, and Tables 3-11 through 3-13; however, the increased shell-plate thickness given in 3.7.7.5 is not required unless needed to satisfy the minimum requirements of 3.7.7.4.

● **A.8.2** The provisions for stress relief specified in 3.7.4 and 3.7.7.3 are not required unless they are specified by the purchaser or unless any plate in the unit has a thickness greater than 16 mm (5/8 in.).

A.9 Flush-Type Shell Connections

The details and dimensions of flush-type shell connections shall conform to 3.7.8, Figure 3-11, and Table 3-14.

A.10 Flush-Type Bolted Door Sheets

A.10.1 Flush-type bolted door sheets shall conform to Figure A-1 and Table A-5.

A.10.2 Bolted door sheets shall be based on the specific design requirements in A.10.2.1 through A.10.2.7.

A.10.2.1 The minimum net cross-sectional area of the door plate, excluding the tapered ends, shall not be less than the product of the shell-plate thickness and the vertical height of the cutout in the shell plus twice the diameter of the bolt hole:

$$t_D (h_D - N_1 d) = t_s (h_c + 2d)$$

where

t_D = thickness of the door plate, in mm (in.),

h_D = height of the door plate, mm (in.),

N_1 = number of bolts in the first row of bolts next to the shell cutout,

d = diameter of bolts and bolt holes, in mm (in.),

t_s = thickness of the shell plate, in mm (in.),

h_c = height of the shell cutout, in mm (in.).

A.10.2.2 The shear stress in the cross-section of the bolts shall not exceed 110 MPa (16,000 lbf/in.²).

A.10.2.3 The bearing stress on the bolts and bolt holes shall not exceed 220 MPa (32,000 lbf/in.²), and the fit of the turned bolt in the reamed hole shall conform to the standards of AISC.

A.10.2.4 The shear strength of the bolted door sheet connection shall be at least 90% of the design tensile strength of the undisturbed shell plate as illustrated in the equations below. For shear loading on a flush-type door sheet:

In SI units:

$$(N)(a)(110) = t_s(h_c + 2.5d + f)(145)(0.9)$$

For shear loading on a raised-type door sheet:

$$(N)(a)(110) = t_s(h_c + 4d)(145)(0.9)$$

where

N = number of bolts required in each end section of door plate,

a = cross-sectional area of the bolts, in mm²,

f = distance from the bottom of the shell cutout to the centerline of the bottom row of bolts, in mm.

B. Anexo II, Calculo balance de masas, Balances.xls.

Biodigestión acetogénica					
Cinética de la Acetogénesis			Concentración de biomasa Acetogénicas		
	Sólidos no volátiles	Sólidos volátiles		inicial (g/L)	final (g/L)
Vmax (1/días)	0,02	0,099	<i>Syntrophomonas wolfei</i>	0,4	1,8
Yxs (g/g)	0,16	0,036	<i>Syntrophobacter wolini</i>	0,4	0,54
Xo (g/L)	0,4	0,4			
Tiempo operación(días)	15	15			
So (g/L)	1	42			
Conversion	0,87	0,90			

Biodigestión metanogénica							
Cinética de la Acetogénesis			Concentración de biomasa Acetogénicas		Densidad Gases		
	Acetato	CO2		inicial (g/L)	final (g/L)	Compuesto	kg/m3
Vmax (1/días)	0,37	0,425	<i>Cultivo Mixto</i>	0,1	7,0	metano	0,49
Yxs (g/g)	0,04	0,13	<i>MethanobacterThermoautoi</i>	0,1	4,04	CO2	1,8
Xo (g/L)	0,1	0,1				H2S	1,4
Tiempo operación(días)	10	10				Composición (p/p) H2S en biogás	
So (g/L)	111,687	57,208				0,015	
Conversion	0,88	0,93					

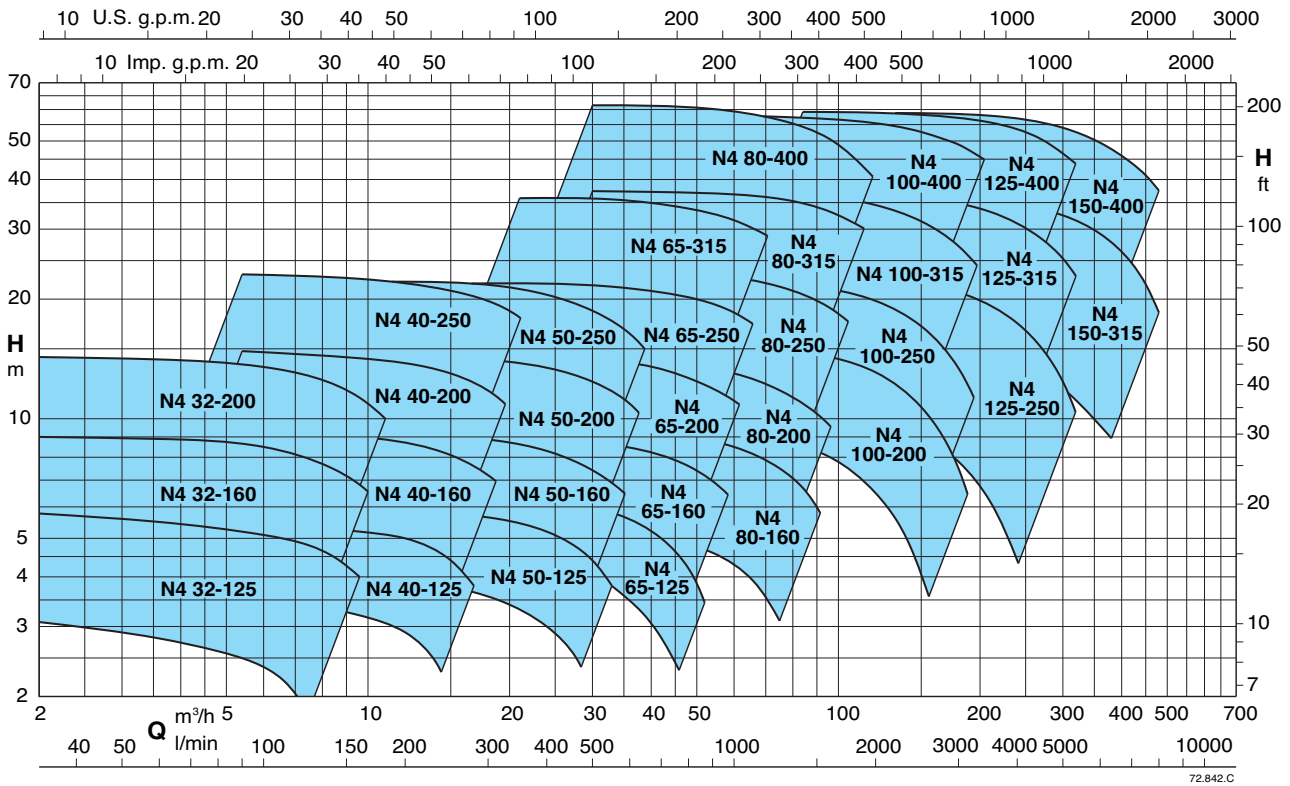
Purificación biogás	Corrientes			
	(14)		(15)	
	Entrada Filtro H2S		Salida filtro H2S	
Temperatura (°C)	30		Ambiente	
Presión (atm)	1,1		1	
	kg/mes	kmol/mes	kg/mes	kmol/mes
Compuestos				
Metano	129	8	129	8
H2S	6	0	1	0
CO2	158	4	158	4

Resumen Productos	kg/mes	kmol/mes
Biofertilizantes	1257	26
Biogás	288	12

Etapas de Fermentación		Corriente										
	(1)		(2)		(3)		(4)		(6)		Biogás	
Temperatura (°C)	25		25		25		30		60		50	
Presión (atm)	1		1		1		1,07		1,1		1,1	
	kg/mes	kmol/mes	kg/mes	kmol/mes	kg/mes	kmol/mes	kg/mes	kmol/mes	kg/mes	kmol/mes	kg/mes	kmol/mes
Compuesto												
Sólidos volátiles	---		600	7	600	7	58	1	58	1		---
Sólidos no volátiles	---		15	0	15	0	2	0	2	0		---
Nitrógeno (N2)	---		53	2	53	2	53	2	53	2		---
Potasio (K)	---		38	1	38	1	38	1	38	1		---
Fósforo (P)	---		34	1	34	1	34	1	34	1		---
Biomasa total	---		11,25		11,25		16		75	---		---
HCO3	---			---		---	380	6	380	6		---
Acetato	---			---		---	741	13	87	1		---
Hidrógeno total	---			---		---	38	19	11	6		---
Sólidos Totales			750	11	750	11	1358	43	736	18		
H2O	4895	272	6750	375	6750	375	6636	369	6740	374		---
Metano	---			---		---		---		---	342	21
H2S	---			---		---		---		---	11	0
CO2	---			---		---		---		---	35	1
Biogás				---		---		---		---	388	23

C. Anexo III, Bombas Calpeda.

Campo de aplicaciones n = 1450 1/min



72.842.C

Tolerancias según ISO 9906, anexo A.

Prestaciones n = 1450 1/min

BOMBA	MOTOR	P ₂ kW	Q m³/h															
			2,4	3	3,6	4,2	4,8	5,4	6	6,6	7,5	8,4	9,6	10,8	12	13,2		
			Q l/min															
			40	50	60	70	80	90	100	110	125	140	160	180	200	220		
N4 32-125F	71 A4	0,25	3 0,04	2,9 0,047	2,8 0,051	2,7 0,055	2,6 0,059	2,5 0,063	2,4 0,067	2,2 0,07	1,8 0,075	1,5 0,08						
N4 32-125D	71 A4	0,25	4,6 0,07	4,5 0,075	4,4 0,08	4,3 0,085	4,2 0,09	4,1 0,095	4 0,1	3,8 0,105	3,5 0,115	3,2 0,12	2,6 0,13	2 0,13				
N4 32-125A	71 A4	0,25	5,7 0,09	5,6 0,1	5,5 0,11	5,4 0,115	5,3 0,12	5,2 0,125	5,1 0,13	5 0,135	4,8 0,145	4,5 0,15	4 0,16	3,3 0,17				
N4 32-160B	71 B4	0,37	7,6 0,13	7,5 0,14	7,4 0,15	7,3 0,16	7,2 0,17	7,1 0,18	6,9 0,19	6,7 0,2	6,3 0,21	5,9 0,215	5,2 0,23	4,2 0,235				
N4 32-160A	71 B4	0,37	9 0,17	8,95 0,18	8,9 0,19	8,8 0,2	8,7 0,21	8,6 0,22	8,5 0,23	8,3 0,24	7,9 0,26	7,5 0,275	6,8 0,29	6 0,305	5,1* 0,315			
N4 32-200B	80 A4	0,55	12,5 0,28	12,4 0,3	12,3 0,315	12,2 0,33	12 0,345	11,8 0,36	11,6 0,375	11,2 0,39	10,6 0,41	10 0,43	8,9 0,455	7,6 0,48	6,2* 0,5	4,7* 0,515		
N4 32-200A	80 B4	0,75	14,3 0,35	14,2 0,375	14,1 0,4	14 0,42	13,9 0,44	13,7 0,46	13,5 0,48	13,3 0,5	12,9 0,525	12,3 0,55	11,3 0,585	10,2 0,61	8,9* 0,635	7,5* 0,655		

BOMBA	MOTOR	P ₂ kW	Q m³/h															
			5,4	6	6,6	7,5	8,4	9,6	10,8	12	13,2	15	16,8	18,9	21	24	27	30
			Q l/min															
			90	100	110	125	140	160	180	200	220	250	280	315	350	400	450	500
N4 40-125F	71 A4	0,25	3,8 0,108	3,8 0,113	3, 0,117	3,7 0,124	3,6 0,129	3,5 0,136	3,3 0,142	3,0 0,146	2,8 0,150	2,3 0,152	1,8 0,152					
N4 40-125C	71 B4	0,37	4,6 0,132	4,6 0,138	4,5 0,146	4,5 0,154	4,4 0,162	4,3 0,171	4,2 0,179	4,0 0,187	3,8 0,193	3,4 0,200	3,0 0,205	2,4 0,207				
N4 40-125A	71 B4	0,37	5,7 0,163	5,7 0,171	5,6 0,179	5,6 0,188	5,5 0,199	5,4 0,211	5,3 0,224	5,1 0,235	4,8 0,245	4,4 0,259	4,4 0,270	3,9 0,279	3,2 0,285			
N4 40-160C	71 B4	0,37	6,1 0,17	6 0,18	5,9 0,19	5,9 0,2	5,8 0,21	5,6 0,23	5,4 0,24	5,2 0,25	5 0,26	4,5 0,27	3,9 0,28	3,1 0,29	2,3 0,3			
N4 40-160B	80 A4	0,55	7,6 0,22	7,6 0,23	7,6 0,24	7,6 0,26	7,6 0,27	7,3 0,29	7,1 0,31	6,9 0,32	6,6 0,34	6,3 0,36	5,7 0,38	5 0,39	4 0,4	2,7 0,41		
N4 40-160A	80 B4	0,75	9,6 0,28	9,6 0,3	9,6 0,31	9,6 0,33	9,4 0,35	9,3 0,37	9,1 0,4	9 0,42	8,8 0,44	8,4 0,47	7,9 0,49	7,2 0,51	6,4 0,53	5,1 0,55	3,5* 0,56	
N4 40-200B	90 S4	1,1	13 0,51	12,9 0,53	12,8 0,55	12,7 0,54	12,6 0,57	12,4 0,60	12,2 0,63	12 0,66	11,5 0,68	10,8 0,71	10 0,75	8,6 0,78	7 0,81	0,83		
N4 40-200A	90 S4	1,1	14,8 0,59	14,7 0,6	14,6 0,6	14,5 0,61	14,4 0,64	14,2 0,67	14,2 0,71	14 0,74	13,8 0,77	13,6 0,8	13 0,85	12,2 0,9	11,3 0,94	10 0,97		
N4 40-250C	90 L4	1,5	17,4 0,689	17,3 0,715	17,2 0,74	17,2 0,779	17,1 0,817	16,8 0,865	16,6 0,912	16,3 0,967	16 1,018	15,1 1,092	13,8 1,134	12,1 1,178	10,4 1,248	7,2 1,301	2,8 1,348	
N4 40-250B	100 LA4	2,2	21,4 0,908	21,5 0,942	21,4 0,99	21,3 1,025	21,2 1,075	21 1,140	20,9 1,203	20,8 1,266	20,5 1,327	20 1,405	19,5 1,482	18,3 1,567	16,4 1,645	13,3 1,752	10 1,815	5* 1,887
N4 40-250A	100 LB4	3	22,9 1,068	22,8 1,104	22,9 1,15	22,9 1,193	22,8 1,246	22,5 1,316	22,5 1,385	22,2 1,454	22 1,521	21,8 1,638	21,4 1,733	20,4 1,817	18,9 1,933	16 2,068	12,6 2,168	8* 2,267

N Ejecución normal.

P₂ Potencia nominal del motor.

B-N Ejecución en bronce.

P₃ Potencia absorbida por la bomba.

H Altura total en m.

* Altura máxima de aspiración 1-2 m.

D. Anexo IV, Generador eléctrico a biogás.



Parámetros del generador/grupo electrógeno a gas natural:				
Modelos: CC2000-LPG-B, CC2000-NG-B, CC2000-LPG/NG-B				
Tipo	CC2000-LPG-B		CC2000-NG-B	
Ítem	CC2000-LPG-B		CC2000-LPG/NG-B	
Frecuencia nominal (Hz)	50	60	50	60
Potencia nominal (kW)	1.8	1.9	1.7	1.8
Voltaje nominal (V)	230	240/120	230	240/120
Corriente nominal (A)	7.8	7.9/15.8	7.4	7.5/15
Velocidad nominal (r/min)	3000	3600	3000	3600
Peso(kg)	43.5			
Dimensión m)	612x455x470			
Certificados: CE; EPA 2008; CARB 2008; AGA;GOST; ROSTECHNADZOR SANCKTION				
Presión de salida de NG recomendada: 2-6KPa, Caudal recomendado: >2,5 m3/hora				
Presión de salida de LPG recomendada: 2.8±0.5KPa; Caudal recomendado: >1,1Kg/hora				
Dimensión del tubo de combustible recomendado: 3/8 Pulgada				
Garantía: 1 año o 300 horas				

Fuente: <http://www.gasenginesltd.es/1a-LPG-generator.html>