

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAÍSO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“ESTUDIO Y DISEÑO DE UN BIODIGESTOR PARA LA GENERACIÓN
DE BIOGÁS PARA LA COGENERACIÓN, MEDIANTE EL USO DE
PURINES DE GANADO BOVINO DE LECHERÍA DE LA REGIÓN
METROPOLITANA”**

**Memoria para optar al Título de:
INGENIERO CIVIL MECÁNICO**

**ALUMNO: ARTURO IGNACIO ROJAS HERMOSILLA
PROFESOR GUÍA: FELICIANO TOMARELLI ZAPICO**

2015

Resumen

El propósito del presente trabajo de título, es aportar al desarrollo de fuentes de generación de energías limpias y sustentables a partir del uso de biomasa en pequeños y medianos productores de lechería.

El objetivo, es establecer un estudio del potencial teórico de energía contenido en purines de bovinos lecheros de la Región Metropolitana, para luego dar paso a un estudio técnico-económico de un biodigestor, utilizando como biomasa los desechos generados por un plantel de 100 bovinos lecheros bajo las características típicas de un plantel de la zona central.

Con este tipo de biodigestor y basado en datos oficiales y literatura especializada, se logró obtener una cantidad diaria de 171,48 (m³) de biogás con una potencia nominal de 39,14 (kW) lográndose procesar cerca de 6,45 (m³) de biomasa lo que permite, bajo un modelo de negocio del tipo auto-productor, generar un ahorro monetario considerable en los procesos de extracción de leche y pasteurización de la misma.

En el **Capítulo 1**, se describirá el planteamiento del problema, así como también, se definirá el objetivo general y los objetivos específicos, alcances y limitaciones del proyecto de título. En el **Capítulo 2**, se establece un marco teórico para el sustento del trabajo. En el **Capítulo 3**, se obtiene un potencial teórico de energía contenida a partir del total de la existencia bovina de lechería de la Región Metropolitana, así como también, se caracterizará un biodigestor según los desechos de 100 bovinos lecheros. En el **Capítulo 4**, se describe la tecnología de la instalación y la ingeniería de construcción del biodigestor, basado en la normativa existente. En el **Capítulo 5**, se describe la tecnología de cogeneración y diseño de planta. En el **Capítulo 6**, se realiza un análisis económico para la evaluación económica y viabilidad del proyecto, cuadros de costos tanto de inversión como de operación, tasas y tiempo de retorno del capital. Finalmente en el **Capítulo 7**, se establecerán los comentarios y conclusiones correspondientes al trabajo en cuestión.

ÍNDICE

CAPÍTULO I: Introducción	Página
1.1 Planteamiento del problema.....	1
1.2 Objetivos	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
1.2.2 Objetivos específicos	2
1.3 Alcances y limitaciones.....	3
1.3.1 Alcances	3
1.3.2 Limitaciones	4
CAPÍTULO II: Antecedentes	
2.1 Escenario energético nacional y su proyección al 2020	5
2.2 Matriz energética nacional	8
2.2.1 Diversificación en la matriz energética y usos de ERNC.....	11
2.3 Biomasa y biogás. Antecedentes.....	12
2.3.1 Biomasa	12
2.3.1.1 Purines de bovinos de lechería como sustrato	15
2.3.2 Biogás.....	18
2.3.2.1 Presencia de Metano y Dióxido de Carbono en el biogás.....	20
2.3.2.2 Presencia de nitrógeno y oxígeno en el biogás	22
2.3.2.3 Presencia de monóxido de carbono en el biogás	22
2.3.2.4 Presencia de amoniaco en el biogás	22
2.3.2.5 Presencia de ácido sulfhídrico en el biogás.....	22
2.4 Proceso de conversión de la biomasa a biogás	23
2.4.1 Hidrólisis	25
2.4.2 Acidogénesis	25
2.4.3 Acetogénesis	26
2.4.4 Metanogénesis.....	27

2.5 Parámetros del proceso de producción de biogás.....	28
2.5.1 Temperatura	28
2.5.2 pH	29
2.5.3 Potencial Redox.....	29
2.5.4 Nutrientes, relación C: N: P.....	29
2.5.5 Sólidos volátiles y materia seca.....	30

CAPITULO III: Estudio del potencial de generación de biomasa y biogás

3.1 Realidad ganadera nacional.....	31
3.1.1 Realidad ganadera de la Región Metropolitana	33
3.2 Ganado bovino de lechería en la Región Metropolitana	33
3.3 Volumen teórico de purín generado por existencia de ganado bovino	36
3.4 Volumen teórico de biogás generado por existencia de ganado bovino	37
3.5 Cálculo del potencial teórico contenido por existencia de ganado bovino	39
3.6 Caracterización de un biodigestor a partir de un plantel de 100 bovinos.....	40
3.6.1 Cálculo del volumen de purín generado.....	40
3.6.2 Niveles de sólidos totales (ST).....	40
3.6.3 Cálculo de carga diaria del biodigestor	42
3.6.4 Cálculo de la temperatura en el interior del biodigestor	43
3.6.5 Cálculo del tiempo de retención.....	43
3.6.6 Cálculo del volumen del biodigestor	44
3.7 Balance másico de la instalación.....	45
3.8 Cálculo del potencial energético contenido en la instalación.....	49

Capítulo IV: Selección y diseño del biodigestor

4.1 Biodigestores.....	50
4.1.1 Tipos de biodigestores.....	50
4.1.1.1 Biodigestor de mezcla completa sin recirculación	50
4.1.1.2 Biodigestor de mezcla completa con recirculación	51

4.1.1.3 Biodigestor de flujo pistón	53
4.1.1.4 Biodigestor tipo Batch	53
4.1.1.5 Biodigestor de tipo continuo	54
4.2 Elección del tipo de biodigestor para el diseño.....	54
4.3 Diseño del biodigestor.....	55
4.3.1 Cálculo del espesor de placa del manto del estanque	57
4.3.1.1 Método de un pie o 1-foot method.....	58
4.3.2 Cálculo del espesor de placa del fondo del estanque	61
4.3.3 Cálculo del espesor de placa del techo del estanque	62
4.3.4 Cálculo del anillo de coronamiento	67
4.4 Soldadura	70
4.4.1 Tipo de electrodo para la soldadura	70
4.4.2 Soldadura para el manto.....	70
4.4.2.1 Soldadura vertical.....	70
4.4.2.2 Soldadura horizontal.....	72
4.4.3 Soldadura para el fondo del biodigestor	73
4.4.4 Soldadura unión manto-fondo.....	74
4.4.5 Soldadura de techo y perfil de coronamiento	75
4.5 Análisis de viento.....	75
4.6 Análisis sísmico	80
4.6.1 Análisis sísmico mediante la normativa API-650	81
4.6.1.1 Factor zona sísmica (Z)	81
4.6.1.2 Factor de importancia (I)	82
4.6.1.3 Coeficientes laterales sísmicos (C_1) y (C_2)	82
4.6.1.4 Peso del manto del estanque (W_M)	84
4.6.1.5 Altura desde el fondo al centro gravedad del estanque (X_S)	85
4.6.1.6 Peso del techo.....	85
4.6.1.7 Peso de la masa efectiva contenida en el estanque (W_1) y (W_2)	85
4.6.1.8 Distancias (X_1) y (X_2)	86
4.6.2 Análisis de deslizamiento.....	88
4.6.3 Análisis de volcamiento	90

4.7 Selección de accesorios.....	92
4.7.1 Boquillas y conexiones	93
4.7.2 Manhole o entrada de hombre	94
4.7.3 Conexiones en el techo del estanque	96
4.7.4 Venteo	96

CAPÍTULO V: Diseño de la planta y selección de tecnología de cogeneración

5.1 Etapa de ingreso del afluente al biodigestor.....	98
5.2 Etapa de egreso del efluente desde el biodigestor.....	106
5.3 Etapa de conducción del biogás	111
5.4 Etapa de cogeneración.....	114
5.5 Sistemas de agitación	118
5.5.1 Tipos de agitadores	118
5.5.1.1 Agitador de hélice sumergible, características.....	118
5.5.1.2 Agitador axial de rotación lenta, características	119
5.5.1.3 Agitador excéntrico, características	120
5.5.2 Selección del agitador para el proceso	120
5.5.3 Potencia del agitador.....	121
5.6 Determinación de los requerimientos de potencia calorífica	122
5.6.1 Calor aportado a los purines	122
5.6.2 Pérdida de potencia calorífica del biodigestor aislado.....	123
5.6.3 Flujo másico de agua para el proceso	132
5.6.4 Sistema reactor, serpentín y agitación mecánica	133
5.7 Selección de equipamiento	140
5.7.1 Selección de la bomba centrífuga	140
5.7.2 Selección del agitador.....	145
5.7.3 Selección del equipo de cogeneración	146
5.8 Balance energético	148
5.9 Aplicaciones	150
5.9.1 Aplicaciones eléctricas	150

5.9.1.1 Aplicación para iluminación del predio lechero	150
5.9.1.2 Aplicación para el enjuague del equipo de ordeña.....	150
5.9.1.3 Aplicación para el uso de equipo de ordeña	151
5.9.1.4 Aplicaciones domésticas.....	152
5.9.2 Aplicaciones térmicas	153
5.9.2.1 Aplicación para la pasteurización de la leche	153
5.9.2.2 Aplicación para la climatización de un edificio de concreto	154
5.9.2.3 Aplicación para la deshidratación de forraje	156

CAPÍTULO VI: Análisis económico

6.1 Modelo de negocio.....	157
6.2 Costos.....	158
6.2.1 Costo asociado a la construcción del biodigestor	158
6.2.2 Costo asociado a la adquisición del motor de cogeneración.....	159
6.2.3 Costo asociado a la adquisición del equipamiento auxiliar	159
6.2.4 Costos de mantenimiento y operación.....	160
6.3 Ahorro asociado a la producción de energía.....	160
6.4 Flujo de caja.....	161

Capítulo VII: Conclusiones y comentarios

7.1 Conclusiones	163
7.2 Comentarios.....	165

Bibliografía.....	167
--------------------------	------------

Anexos

Anexo 1: Características técnicas motor de cogeneración	170
Anexo 2: Cotización planchas de acero.....	171

Capítulo I: Introducción

1.1 Planteamiento del problema

La industria lechera nacional posee un gran potencial energético en biomasa, el que puede ser aprovechado, explotado y utilizado mediante la autogeneración de energía eléctrica y térmica. Esto ayudaría a aumentar la productividad y eficiencia de los procesos productivos, gracias a la reducción de costos fijos operacionales tales como: el suministro de gas y la electricidad. La aplicación de esta tecnología, por parte de los pequeños productores de la industria lechera, es relativamente baja debido principalmente a los costos de inversión asociados, así como también, a la falta de conocimiento, maduración tecnológica entre otros factores.

La problemática se inicia a partir de los grandes volúmenes de purines generados en la industria lechera, los que implican inversiones en infraestructura para su almacenaje, tratamiento y que por ley deben ser cumplidos para salvaguardar la integridad medioambiental. Estos volúmenes de desechos son una gran fuente de biomasa y pueden ser aprovechados para la generación de biogás utilizable para la cogeneración de energía eléctrica y térmica, mediante la tecnología adecuada y en función de los requerimientos técnicos que la instalación demande, así como también, de la disponibilidad y calidad del sustrato a ser procesado.

Es necesario, por lo tanto, fomentar la aplicación de tecnologías de generación de energías limpias en pequeños productores, estableciendo guías para el desarrollo de proyectos de biogás a partir de biomasa proveniente de los desechos del ganado bovino de lechería a pequeña escala, para el beneficio propio, de la comunidad y del medioambiente. Este proceso se realiza en un ambiente controlado y en ausencia de aire, mediante la biodigestión anaeróbica de biomasa en un biodigestor.

El resultado final es una mezcla de metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2) en concentraciones de entre 55-70% y 30-45% respectivamente, sumado a otros gases en menor cantidad. El biogás obtenido, puede ser utilizado mediante la tecnología

correcta (motor de cuatro tiempos ciclo Otto, motor diesel, motor Stirling, etc.) como combustible para la cogeneración de energía eléctrica y/o térmica.

La mineralización de la biomasa residual puede ser aprovechada, además, como un excelente abono agrícola para el uso propio en la misma instalación o para su venta.

El ciclo de generación del biogás supone emisiones de CO₂ iguales a cero, esto bajo la premisa de que la cantidad de CO₂ generada en el proceso de biodigestión es menor a la cantidad procesada por la vegetación y que es transformada en oxígeno por esta razón, el protocolo de Kioto define a la biomasa como un proceso con emisiones iguales a cero.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

- 1) Realizar un estudio técnico-económico de un biodigestor con el propósito de generar biogás posible de ser utilizado para la cogeneración, utilizando como biomasa los deshechos generados por un plantel de 100 bovinos lecheros de la Región Metropolitana.

1.2.2 Objetivos específicos

- 1) Realizar un estudio breve de la situación energética nacional, sus características, proyecciones y necesidades futuras
- 2) Establecer un marco teórico enfocado en los conceptos de biomasa y biogás
- 3) Realizar un estudio de la situación ganadera de la Región Metropolitana, enfocado en la caracterización de la biomasa generada por un plantel pecuario de lechería y su potencial energético
- 4) Diseñar un biodigestor compatible con las necesidades requeridas por el plantel pecuario en estudio

- 5) Establecer los requerimientos técnicos de los accesorios principales del biodigestor para su funcionamiento
- 6) Establecer los requerimientos técnicos y la selección de la tecnología de cogeneración
- 7) Realizar un estudio económico de costos para evaluar la viabilidad del proyecto.

1.3 Alcances y limitaciones

1.3.1 Alcances

- 1) El presente proyecto de título, considera únicamente la existencia bovina de lechería de la Región Metropolitana como parámetro de diseño de la instalación
- 2) Los cálculos de generación de purín, biogás, energía y potencia para toda la Región Metropolitana son teóricos y se realizan en base a documentación y literatura disponibles considerando, a su vez, una estabulación del 100% del ganado
- 3) El diseño del biodigestor, se establece bajo parámetros generales típicos de la industria lechera de la Región Metropolitana para instalaciones de 100 o más bovinos lecheros, no se considera una instalación en específico
- 4) El análisis sísmico y de viento, se desarrolla únicamente a lo especificado por la normativa API-650
- 5) La evaluación económica se restringe únicamente al supuesto de ahorro monetario bajo la comparativa de suplir el proceso desde gas natural a biogás manteniendo igual producción diaria de energía generada
- 6) Todos los cálculos son en base a generación continua de energía a plena carga, es decir las 24 horas al día.

1.3.2 Limitaciones

- 1) La información de la realidad bovina lechera nacional data de hace 9 años, debido principalmente a que el último censo agropecuario nacional data del año 2007 siendo este realizado cada 10 años

- 2) La falta de información detallada para planteles lecheros de la Región Metropolitana hace necesario el uso de información proporcionada por el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) que data del año 2006.

Capítulo II: Antecedentes

2.1 Escenario energético nacional y su proyección al 2020

El desarrollo de un país está relacionado con la capacidad de satisfacer sus propias necesidades internas tanto sociales, económicas, energéticas, entre otras. Desde un punto de vista energético, a medida que un país crece, se hace necesario establecer políticas proyectadas a futuro que otorguen un desarrollo sostenible y que permitan generar competitividad mediante una disponibilidad alta, limpia y segura de las fuentes energéticas, con aranceles atractivos para la inversión nacional y extranjera.

Restringir el acceso a fuentes de energías confiables, limpias y seguras, constituye, en efecto, una limitante para el crecimiento económico y al progreso social. Es indudable que durante los últimos años, el desarrollo económico del país ha ido en aumento, según la tabla 2.1 a medida que el producto interno bruto (PIB) de un país crece también lo hace la necesidad y demanda por energía.

Últimos años	PIB por Año	Energía por año
20 años	5,0 %	6,2 %
10 años	4,0 %	4,2 %
Año 2011	6,0 %	6,6 %
Año 2012	5,3 %	6,2 %

Tabla 2.1: Correlación entre el PIB y la necesidad energética nacional [1].

Durante los últimos veinte años, el crecimiento del producto interno bruto tuvo un aumento promedio de un 5% anual, lo que implicó un incremento en la necesidad energética en torno al 6,2% por año en promedio. No muy distinto a lo acontecido durante el año 2012, donde el incremento porcentual del producto interno bruto fue cercano al 5,3% lo que implicó aumentar la capacidad energética en un 6,2% para así, lograr satisfacer la demanda por energía [1].

Según se puede observar en la tabla 2.2 durante los años 2012 y 2013 la variación del consumo bruto de energía primaria en Tera calorías, anotó una variación de un 7,6% donde las necesidades energéticas del país aumentaron en 23.941 (Tcal) en ese rango de tiempo.

Tipo de energía	Año		Variación
	2012	2013	%
Petróleo Crudo	96.791	102.123	5,5
Gas Natural	45.579	45.68	0,2
Carbón	66.493	75.493	13,5
Hidroelectricidad	17.336	16.973	-2,1
Eólica	351	477	35,9
Leña y Biomasa	88.778	98.456	10,9
Solar	185	191	3,4
Biogás	72	134	84,8
Total	315.586	339.527	7,6

Tabla 2.2: Variación en el consumo bruto de energía primaria en Tera calorías durante los años 2012 y 2013 [2].

Un análisis más a detalle, según lo mostrado en la tabla 2.3 demuestra que Chile es un país altamente dependiente en recursos energéticos. Considerando tanto la energía primaria como secundaria, se puede argumentar que durante el año 2011 Chile debió importar cerca del 71% de la demanda total interna de energía, de la cual, sólo se es capaz de suplir cerca del 29% del total con recursos nacionales. Tomando como ejemplo países de la región, Argentina debe importar cerca del 10%, Perú un 28% y Bolivia un 4%, lo que representa un importante desafío a futuro. Si consideramos a Chile como un sistema en donde convergen diversos sectores

como: transporte, industria / minería, residencial, etc. podemos determinar que del total de energía demandada, la generación eléctrica consume cerca del 20% [1].

Energético	Producción (Bruta)	Importación	Exportación	Consumo (Bruto)
Petróleo Crudo	3.850	100.341	0	102.123
Gas Natural	9.017	36.220	0	45.680
Carbón	15.245	64.897	6.251	75.493
Hidroelectricidad	16.973	0	0	16.973
Eólica	477	0	0	477
Leña y Biomasa	97.816	0	0	98.456
Solar	191	0	0	191
Biogás	134	0	0	134
Total	143.704	201.458	6.251	339.527

Tabla 2.3: Balance de energía primaria año 2013 en Tera calorías [2].

Al año 2020 se proyectan en nuestro país tasas de crecimiento del consumo eléctrico en torno al 6 a 7% lo que significa una demanda cercana a 100 mil (GWh) de energía eléctrica a dicho año, lo que requerirá aumentar la oferta, sólo en dicho período, en más de 8.000 (MW) en nuevos proyectos de generación [3].

La tarea es gigantesca, considerando, además, que Chile es un país predominantemente importador de recursos energéticos y en particular, dependiente de combustibles fósiles cuyos precios y costos de operación en las centrales han incrementado los costos marginales de generación de energía y consecuentemente, el precio de la electricidad.

En Chile, el objetivo del gobierno es reducir en un 30% los costos marginales en 2017 respecto a 2013 pasando de 151,4 (US\$/MWh) a 106,0 (US\$/MWh) [4]. Reducir tanto los costos marginales como los niveles de emisiones contaminantes en los procesos de producción energética, son sin duda problemáticas imperantes a solucionar, sin embargo, también han logrado impulsar el desarrollo de nuevas fuentes de generación que favorecen el cuidado medioambiental mediante el reemplazo de combustibles fósiles.

2.2 Matriz energética nacional

El país cuenta con cerca de 17.633 (MW) de capacidad instalada, tal como se detalla en la tabla 2.4 esta es la potencia máxima teórica que el país puede desarrollar en un instante de tiempo, considerando que todas las plantas generadoras operan en un 100%.

Sistema interconectado	Generación bruta (GWh)	Capacidad instalada (MW)	Generación máxima (MW)
SING	16.751,1	4.145,8	2.167,4
SIC	48.795,7	13.332,2	6.991,9
Los Lagos	16,4	5,4	3,0
Aysén	149,8	46,7	25,5
Magallanes	286,6	103,4	50,6
Total	65.999,6	17.633,5	9.238,4

Tabla 2.4: Matriz energética Chile 2012 [4].

La generación en el sistema interconectado del norte grande (SING) representa el 23,5% del total del país, cuyo 85% de producción energética está destinada a la minería, mientras que la generación del sistema interconectado central (SIC)

representa cerca del 75,6% de la demanda nacional, generando aproximadamente el 76% del PIB nacional. Ambas suman cerca del 99% del total a nivel país.

Aunque la participación de las energías renovables no convencionales en el sistema interconectado del norte grande va en aumento, aún más, con proyectos en etapa de desarrollo y otros ya en operación, podemos concluir de la tabla 2.5 que el SING es prácticamente un sistema térmico de generación eléctrica, con un porcentaje de participación de cerca del 97% de tecnologías fósiles y cuyos costos marginales a marzo del 2014 llegaron a 41,3 (\$ /kWh) [4].

Tecnología	Capacidad instalada (MW)	Participación (%)
Carbón	2.100	44,4
Gas/Diesel	1.518	32,1
Gas	643	13,6
Diesel	313	6,6
Eólica	90	1,9
Solar	32	0,7
Cogeneración	18	0,4
Hidráulica de pasada	12	0,3
Total	4.725	100,0

Tabla 2.5: Tecnologías de generación para el SING. Año 2013.

En su contraparte, según lo expuesto en la tabla 2.6 el sistema interconectado central (SIC) genera casi un tercio de su energía por medio de tecnología hidráulica de embalse. Aquí toman valor las energías renovables no convencionales, sumando la energía hidráulica de embalse y de pasada, cerca del 50,1% de la generación es mediante energías limpias. No obstante, los costos marginales de producción

prácticamente triplican a los del SING, teniendo estos, valores en torno a los 112,8 (\$ /kWh) [4].

En definitiva, el alto precio de la energía se debe básicamente a que la cantidad del recurso fósil es limitado y cada vez menor, a su vez que la cantidad demandada por el hidrocarburo aumenta encareciendo el valor de la energía y perjudicando, por lo tanto, el beneficio por producto, sumado a una alta dependencia por esta fuente energética.

Tecnología	Capacidad instalada (MW)	Participación (%)
Hidráulica de embalse	4.118	26,9
Gas/Diesel	2.843	18,6
Carbón	2.382	15,6
Hidráulica de pasada	2.348	15,3
Diesel	2.244	14,7
Biomasa	619	4,0
Eólica	474	3,1
Solar	151	1,0
Cogeneración	74	0,5
Biogás	45	0,3
Total	15.298	100

Tabla 2.6: Tecnologías de generación para el SIC. Año 2013.

2.2.1 Diversificación en la matriz energética y usos de ERNC

Es indudable que el actual escenario energético del país es complejo y la necesidad por energía aumenta día a día, pero ¿qué tipo de energía queremos? Esta pregunta se plantea en la necesidad de permitir un desarrollo económico sustentable en base a inversiones para la producción de energía, que permitan costos operacionales bajos y que se traduzcan a costos marginales de producción energética competitivos y atractivos para la inversión.

El cambio en la matriz energética y la incorporación de nuevas tecnologías ERNC debe ser de forma gradual en función de las características propias de cada una de estas tecnologías y su grado de maduración.

También, es innegable el hecho de que los combustibles fósiles aún cuentan con características ventajosas respecto a las ERNC como son el poseer altos factores de planta con costos medios competitivos respecto a este tipo de tecnología.

Actualmente, si se considera tanto el SIC como el SING, tan sólo un poco más del 3% del total de energía generada se realiza utilizando ERNC, por este motivo, la ley 20.257 de fomento a las energías renovables no convencionales, establece alcanzar un 10% al año 2024, incrementando un 0,5% anual a partir del año 2015 [3].

Nuestro país cuenta con un alto potencial de generación de energía mediante recursos limpios que podrían suplir la necesidad energética del país con creces. A modo de ejemplo, la Región de Los Ríos cuenta con una capacidad de generación energética cercana a los 58.279 (MWh) al año mediante el uso de biogás provenientes de purines bovinos, considerando una estabulación de un 4% [5].

Según un estudio realizado el año 2007 en conjunto con la comisión nacional de energía de Chile, el potencial energético a partir del sustrato de estiércol de vacuno como biomasa residual húmeda a nivel país fue de 500 (GWh/a) aproximadamente, valor equivalente a más de 220 millones de metros cúbicos de biogás al año [6].

2.3 Biomasa y biogás. Antecedentes

2.3.1 Biomasa

Al año 2013, el porcentaje de participación de la biomasa en la matriz energética nacional, fue de un 4% con una capacidad instalada de aproximadamente 619 (MW), a su vez, el porcentaje de participación del biogás en la matriz energética nacional fue de un 0,3% con una capacidad instalada de aproximadamente 45 (MW). (Ver Tabla 2.6).

Como se vio en el apartado anterior, el potencial energético contenido en este recurso a nivel país es alto, aun así, es un recurso poco utilizado debido principalmente a los niveles de inversión y/o desconocimiento en la materia.

Se entiende por biomasa al conjunto de materia orgánica renovable de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial de la misma. La energía de la biomasa corresponde entonces a toda aquella energía que puede obtenerse de ella, bien sea a través de su quema directa o su procesamiento para conseguir otro tipo de combustible tal como el biogás o los biocombustibles líquidos.

El origen de la biomasa, se inicia desde la luz solar por medio de la fotosíntesis de plantas, árboles y vegetación, tal como se puede apreciar de la figura 2.1. Estos productos son utilizados tanto por la industria ganadera como forraje para alimentar al ganado o como materia prima de la industria forestal y celulosa. Los residuos generados en los procesos de manufactura tanto animal, industrial y residuos urbanos, forman parte de la biomasa disponible para la generación de energía. La biomasa con fines energéticos, puede ser clasificada en función de su naturaleza, siendo el tipo de clasificación más aceptada la siguiente:

Biomasa de origen natural: es aquella que se encuentra en el medioambiente sin haber sido afectada física y químicamente por el ser humano. Los recursos generados por los desechos naturales de un bosque constituyen un ejemplo de este tipo de biomasa.

Biomasa residual seca: se incluyen en este grupo los productos sólidos no utilizados de las actividades agrícolas y ganaderas, las forestales y de los procesos de las industrias agroalimentarias y de transformación de la madera. Algunos ejemplos de este tipo de biomasa son el estiércol, la paja, el orujo, la madera de podas y raleo, el aserrín, etc.

Biomasa residual húmeda: son los vertidos denominados biodegradables: las aguas residuales urbanas e industriales y los residuos ganaderos principalmente purines. La fermentación de este tipo de biomasa genera un gas (biogás) conformado principalmente de gas metano y dióxido de carbono, que se combustiona para generar calor, electricidad o ambos, por ejemplo mediante la cogeneración.

Cultivos energéticos: son cultivos realizados con la finalidad de producir biomasa transformable en biocombustible. Se encuentran en este grupo el maíz, raps, girasol y plantaciones dendroenergéticas.

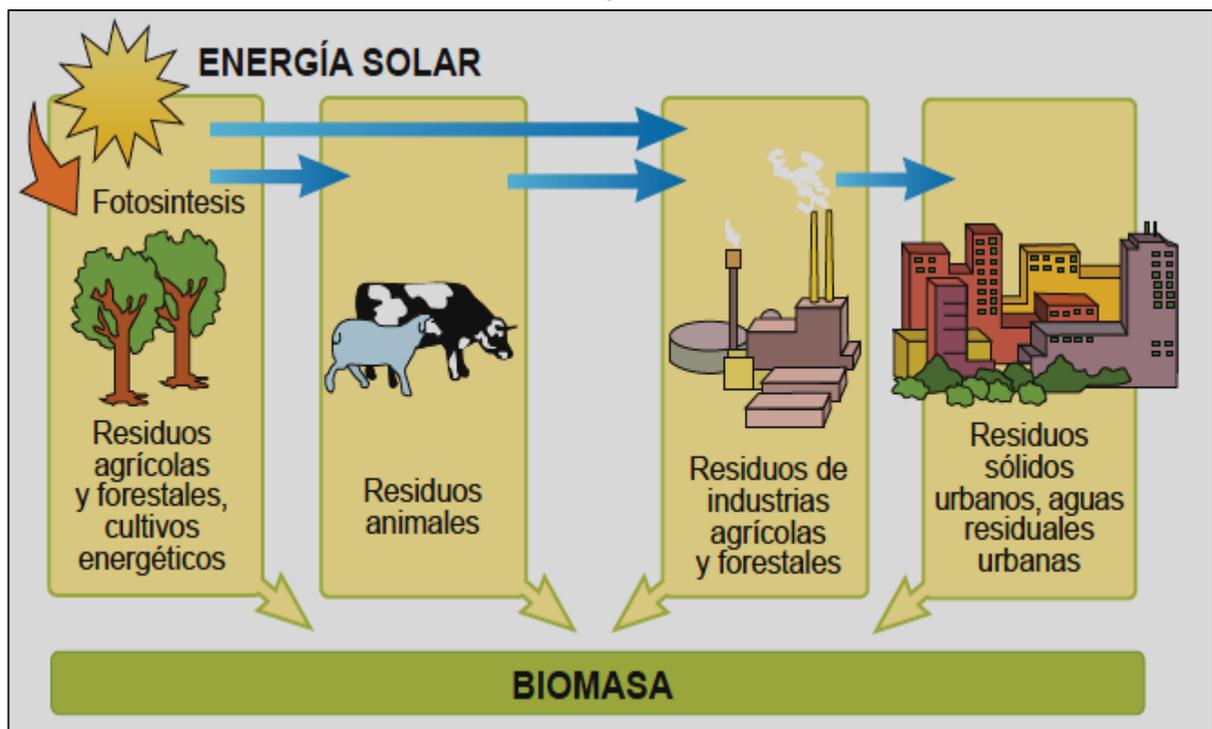


Figura 2.1: Origen de la biomasa [7].

La biomasa puede ser clasificada en función de su uso y la forma en la cual el contenido energético es aprovechado, pudiendo ser biomasa de combustión directa o biomasa para la producción de biogás.

El uso energético de la biomasa, presenta dos principales procesos de conversión en función del producto que queremos lograr u obtener.

- Mediante la combustión directa de biomasa se puede generar electricidad, vapor y calor
- Mediante la biomasa, específicamente biogás, se puede generar electricidad y calor, tal como se detalla en la tabla 2.7.

Tipo de proceso de conversión	Producto generado
Combustión directa de biomasa	Electricidad
	Vapor y calor
Producción de biogás	Electricidad
	Calor

Tabla 2.7: Procesos de conversión y productos generados [7].

El tipo de biomasa que se requiere según el proceso de conversión se detalla en la tabla 2.8. En ella se puede observar la importancia en el contenido líquido que conforma la biomasa para su transformación en biogás. Para la formación de gas metano, es importante la presencia de una atmosfera húmeda en ausencia de aire que favorezca la vivencia y reproducción de microorganismos metabólicamente activos.

El sustrato o biomasa utilizado cuya finalidad es la de generar biogás, debe contener principalmente grasas, proteínas, carbohidratos, celulosa y hemicelulosa.

Tipo de sistema	Tipos de biomasa
Combustión directa de biomasa	Residuos de la industria forestal.
	Madera natural y usada.
	Residuos agrícolas sólidos.
	Residuos sólidos orgánicos.
	Cultivos Dendroenergéticos.
Producción de biogás	Residuos del sector ganadero.
	Residuos agrícolas.
	Cultivos energéticos.
	Toda clase de biomasa húmeda
	Biomasa seca (lodos, grasas, etc.)
	Biogás de rellenos sanitarios.

Tabla 2.8: Tipo de biomasa según su tipo de proceso de conversión [7].

2.3.1.1 Purines de bovinos de lechería como sustrato

Se define como purín a la biomasa residual húmeda proveniente de los desechos animales, esta es una mezcla heterogénea de fecas, orinas, aguas residuales unidas a restos de alimentos como paja, aserrín y tierra producto de la actividad propia de los predios lecheros. Estos desechos, son acumulados principalmente en lecherías y patios de confinamiento de ganado.

Generalmente, el contenido de materia seca o sólidos totales (ST) en el purín no debe superar el 10% y varía según el tipo de tratamiento y manejo realizado en los distintos predios.

La cantidad de purines generados está directamente relacionada con los siguientes aspectos [8]:

- 1) Tipo de animal
- 2) Aguas sucias generadas del lavado de equipos de lechería
- 3) Aguas generadas del lavado de pisos y construcciones
- 4) Aguas lluvias.

Las variables bioquímicas involucradas en el estudio de los purines y que a la larga interfieren en la capacidad o potencial energético del sustrato, son las siguientes [8]:

- 1) PH
- 2) Conductividad eléctrica
- 3) Sólidos totales y volátiles
- 4) Humedad
- 5) Materia seca
- 6) Densidad, etc.

Un estudio realizado por el Servicio Agrícola Ganadero (SAG) [9] y representado en la tabla 2.9 identifica estas variables para purines de planteles lecheros de la Región Metropolitana. El análisis está enfocado en las variables presentes en dos planteles de bovinos de producción lechera ubicados en Peñaflor y Talagante.

Estas variables son de importancia a la hora de estudiar el potencial energético contenido en el sustrato para conocer la calidad del biogás que se puede obtener.

La cantidad de biogás generado, es función de la cantidad de purín producido y varía según el tipo de animal, como también, según la ubicación geográfica del plantel lechero. Esto se debe principalmente a las condiciones climáticas presentes en el lugar, lo que se traduce en cantidad de agua caída y que es aprovechada y acumulada en los pozos purineros.

Variable	Unidad	Agrícola los rey	Pahuilmo Mallarauco
pH (1:5)	Adimensional	8,6	7,7
CE (1:5)	(dS/m)	7,4	6,3
MO	(%)	70,7	76,7
CO	(%)	38,9	42,2
N Total	(%)	3,15	2,07
C/N	Adimensional	12,3	20,4
N-NO3	(ppm)	1.619	708
N-NH4	(ppm)	715	456
P	(%)	0,91	0,72
Sólidos Totales	(%)	27	26
Sólidos Volátiles	(%)	70	76
Humedad	(%)	73	74
Materia Seca	(%)	27	26
Coliformes Totales	(NMP/g)	3×10^7	3×10^7
Coliformes Fecales	(NMP/g)	3×10^7	3×10^7

Tabla 2.9: Variables analizadas por muestreo purín de planteles de lechería Región Metropolitana [9].

La tabla 2.10 es un método práctico de cálculo entregado por Deublein y Steinhauser [10]. Este método de tabla, permite calcular las cantidades de biomasa posible de ser generada a partir del tipo de animal en estudio, además, de entregar el contenido de materia sólida (MS) y cantidad de biogás posible de ser producido. El acrónimo UAE significa Unidad Animal Equivalente y es una forma de conversión tomando como base una vaca o vacuno de engorda.

Tipo de animal	UAE	Estiércol líquido (m ³)			Contenido de MS (%)	Producción de biogás (m ³ /UAE/día)
		Día	Mes	Año		
Vaca, vacuno de engorda	1	0,05	1,5	18	7 - 17	0,56-1,5
Vaca lechera	1,2	0,055	1,65	19,8	7 - 17	0,56-1,5
Toro de reproducción	0,7	0,023	0,69	8,28	7 - 17	0,56-1,5
Vacuno joven < 2 años	0,6	0,025	0,75	9	7 - 17	0,56-1,5
Ternero de crianza < 1 año	0,2	0,008	0,24	2,88	7 - 17	0,56-1,5
Ternero de engorda	0,3	0,004	0,12	1,44	7 - 17	0,56-1,5

Tabla 2.10: Rendimiento de estiércol líquido según tipo de animal por UAE [10].

Una forma más precisa de calcular la cantidad de biogás a ser producida en función de la cantidad de biomasa, es mediante lo establecido por Flotats y col (2009) quién mediante datos experimentales determinó que por cada tonelada de purín se obtienen 27,2 (m³) de biogás, asumiendo que la densidad del purín es aproximadamente 1 (ton/ m³) con una fracción de metano del 65%, a diferencia de Deublein y Steinhauser, el cual entrega un rango de producción de biogás.

2.3.2 Biogás

El biogás es una mezcla de metano (CH₄), dióxido de carbono (CO₂) y otros gases en menor proporción (impurezas). La formación de metano es un proceso biológico que ocurre de manera natural cuando la materia orgánica logra descomponerse bajo un ambiente húmedo, libre de oxígeno y en presencia de microorganismos.

El biogás es inflamable cuando el contenido de metano presente es superior al 45% del total del volumen generado. En general, la proporción de gas metano es superior al 55% variando hasta un 70% según se detalla en la tabla 2.11.

Composición	55-70% Metano (CH ₄)
	30-40% Dióxido de Carbono (CO ₂)
	Otros gases
Energía contenida	6,0-6,5 (KWh/m ³)
Equivalente en combustible	0,6-0,65 (L de combustible/m ³ de biogás)
Límite de explosión	6-12% de biogás en el aire
Temperatura de ignición	650-750 °C (55 a 70% de Metano)
Presión crítica	75 – 89 (bar)
Temperatura crítica	- 82.5 (°C)
Densidad Normal	1,2 (kg /m ³)
Olor característico	Huevo en descomposición
Masa molar	16,043 (kg/ kmol)

Tabla 2.11: Característica generales del biogás [10].

Como se mencionó anteriormente, el biogás es una mezcla de gases, los cuales en mayor o menor medida, tienen efectos sobre el rendimiento final del biogás obtenido, así como también, en la vida útil del equipamiento, accesorios y redes piping de la instalación, debido principalmente a los compuestos corrosivos y que son propios del proceso de generación del biogás.

La tabla 2.12 entrega los intervalos porcentuales en el contenido de las posibles impurezas generadas en los procesos de obtención de biogás, como también, sus principales efectos.

Componente	Contenido	Efecto
CO ₂	25-50 %	Disminuye el poder calorífico
		Aumenta el número de metano
		Causa corrosión
		Causa daño a las celdas de combustible alcalinas
H ₂ S	0 - 0,5 %	Causa corrosión y daño al equipamiento y redes piping
		Produce SO ₂ Producto de la combustión imperfecta
		Inhibe la catálisis
NH ₃	0 - 0,05 %	Las emisiones de NOX producen daño a las celdas de combustible
Vapor de agua	1 - 5 %	Causa corrosión y daño al equipamiento y redes piping
		La condensación causa daño a los equipos
		Riesgo de congelamiento en tuberías y accesorios
Polvo	> 5 (µm)	Bloquea accesorios, redes y celdas de combustible
N ₂	0 - 5 %	Disminuye el poder calorífico
Siloxenos	0 - 50 (mg/m ³)	Actúa como abrasivo dañando motores

Tabla 2.12: Principales impurezas del biogás y sus efectos [10].

2.3.2.1 Presencia de Metano y Dióxido de Carbono en el biogás

La composición de gas (referida principalmente a la proporción de dióxido de carbono a metano) puede ser parcialmente controlada y dependerá de los siguientes factores:

- 1) La adición de componentes de largas cadenas de hidrocarburos o también de compuestos ricos en grasas, pueden ayudar a mejorar la calidad del gas, permitiendo que las cantidades sean razonables para así, no afectar la acidez. En la figura 2.2 se puede apreciar como el contenido de metano aumenta en la medida que el contenido de átomos de carbono también lo hace

- 2) Generalmente la descomposición anaeróbica de la biomasa mejora con el tiempo de exposición. Ya hacia el final del tiempo de permanencia en el biodigestor, el contenido de metano incrementa desproporcionadamente, especialmente tan pronto como el proceso de liberación de CO_2 en la hidrólisis comienza a ser desactivada
- 3) El proceso de fermentación toma lugar mucho más rápido si el material dentro del biodigestor es de buena calidad y es homogéneamente activado. El tiempo de exposición puede ser incluso menor
- 4) Un alto contenido de líquido dentro del biodigestor resulta en una alta concentración de CO_2 contenida en agua, aunque, al aumentar la temperatura, disminuye la cantidad de CO_2 disuelta en el agua
- 5) Una alta presión conduce a una mayor concentración de CO_2 disuelta en agua. Esto puede influenciar en la calidad del gas de una manera positiva, siempre y cuando el material de la parte inferior del biodigestor se elimine a causa de la descarga de CO_2 .

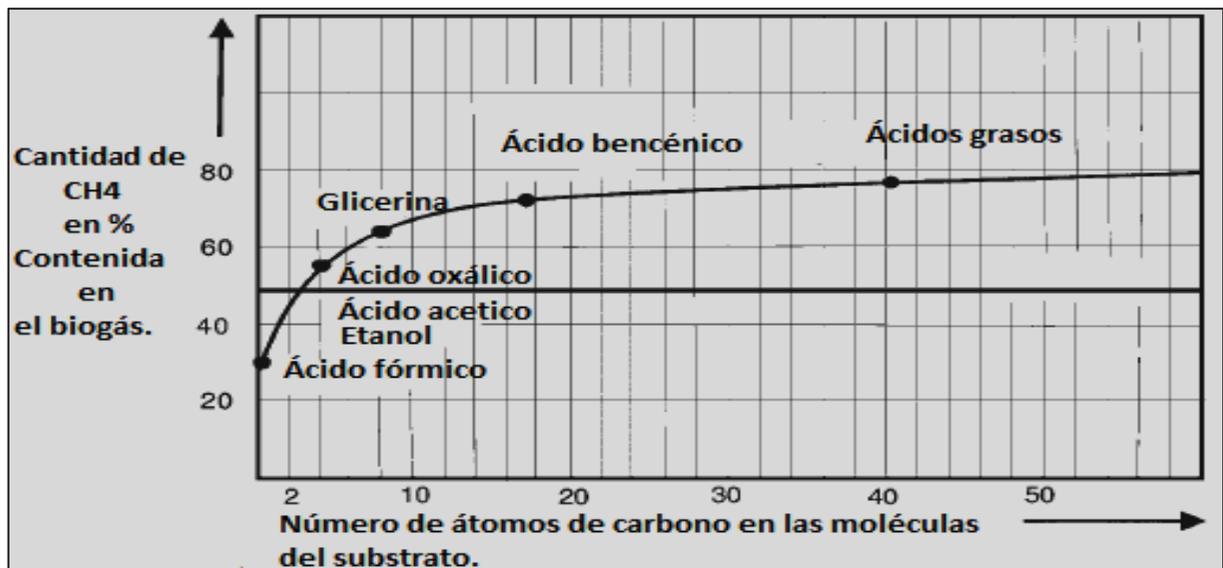


Figura 2.2: Correlación metano y número de átomos de carbono en el sustrato [10].

Para obtener un rendimiento adecuado en el producto final y/o para proteger equipos e instalaciones, se hace necesario mantener bajo control ciertos elementos que aparecen en el proceso de formación del biogás detallados a continuación.

2.3.2.2 Presencia de nitrógeno y oxígeno en el biogás

En general, el biogás contiene nitrógeno y oxígeno en una proporción de 4 a 1. Estos componentes, se introducen cuando la ventilación está encendida en el reactor con la finalidad de eliminar el sulfuro. Estos gases presentes en el aire, también pueden ingresar al reactor en pequeñas cantidades cuando las tuberías no están lo suficientemente ajustadas y herméticas.

2.3.2.3 Presencia de monóxido de carbono en el biogás

La cantidad de monóxido de carbono debe estar por debajo del límite de detección correspondiente a un 0,2% del volumen.

2.3.2.4 Presencia de amoníaco en el biogás

Por lo general, la concentración de amoníaco es muy baja (<0,1 mg por metro cúbico de biogás) aunque el rango aceptado de concentración de amoníaco puede ser superior y estar comprendida entre 1 y 1,5 (mg/m³) de biogás.

2.3.2.5 Presencia de ácido sulfhídrico (H₂S) en el biogás

El contenido de ácido sulfhídrico en los gases de salida, depende del tipo de proceso y el sustrato utilizado. Sin un proceso de desulfurización, la cantidad de H₂S comprendida en el gas puede exceder un 0,2% del volumen. Si el sustrato fermentado es viscoso, el contenido de H₂S es más bajo que el de un sustrato más líquido.

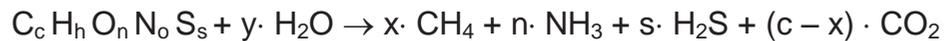
La aparición de grandes cantidades de H₂S son potencialmente dañinas, debido a su alto poder corrosivo, pudiendo dañar tanto equipos, cañerías del circuito y en general, cualquier elemento susceptible a la corrosión y que esté en contacto con este elemento, sin embargo, mediante un proceso previo de desulfurización en el

reactor mismo, se puede reducir el contenido de H₂S a 70 (mg/m³) usando co-substratos, o a 310 (mg/m³) utilizando estiércol líquido como sustrato para la fermentación, pero inclusive con un proceso previo de desulfurización de H₂S, el contenido es relativamente alto. Para disminuir los niveles de H₂S, se hace necesario un proceso efectivo, como por ejemplo, una trampa de ácido que permita la condensación del sulfuro mediante virutas de hierro.

2.4 Proceso de conversión de la biomasa a biogás

El biogás se obtiene a partir de un proceso bioquímico conocido como reacción anaeróbica. Este ocurre naturalmente cuando la materia orgánica (biomasa o sustrato) se descompone en una atmosfera húmeda en ausencia de oxígeno, pero en presencia de un grupo de microorganismos metabólicamente activos.

En general, la formación de biogás responde a la siguiente fórmula:



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

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

Los productos obtenidos se resumen en la tabla 2.13.

Carbohidratos	$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CO_2 + 3CH_4$
Grasas	$C_{12}H_{24}O_6 + 3H_2O \rightarrow 4,5CO_2 + 7,5CH_4$
Proteínas	$C_{13}H_{25}O_7N_3S + 6H_2O \rightarrow 6,5CO_2 + 6,5CH_4 + 3NH_3 + H_2S$

Tabla 2.13: Principales productos obtenidos a partir del sustrato [10].

A causa de que los sulfuros permanecen en los residuos y el CO₂ se une al NH₃, la proporción de biogás resultante está en la proporción de:

$\text{CH}_4 : \text{CO}_2 = 71\% : 29\%$

La fermentación del metano es un proceso complejo, el cual puede ser dividido en cuatro fases de degradación conocidas como: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Cada una de estas fases están relacionadas directamente unas con otras y es llevada a cabo por diferentes grupos de microorganismos. La figura 2.3 representa esquemáticamente la descomposición anaeróbica en sus distintas etapas.

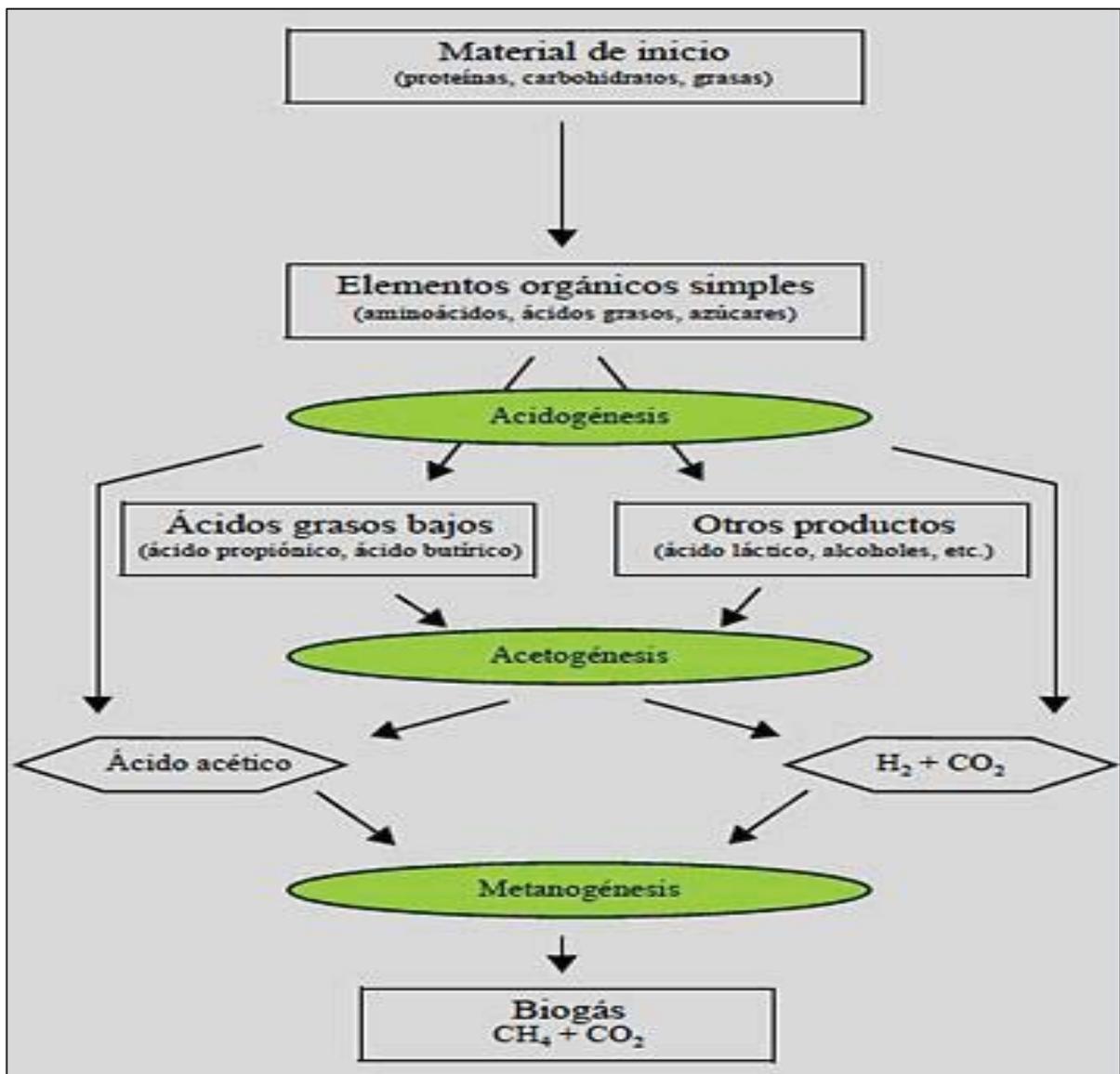


Figura 2.3: Representación esquemática de la descomposición anaeróbica [11].

2.4.1 Hidrólisis

La hidrólisis es la etapa inicial en la cual los compuestos insolubles y complejos tales como: carbohidratos, proteínas y grasas, se dividen en monómeros, elementos orgánicos más simples, como por ejemplo: aminoácidos, azúcares, ácidos grasos mediante la acción de exoenzimas (hidrolasa) propias de las bacterias facultativas y obligatoriamente anaeróbicas. En esta etapa, los enlaces covalentes son separados en una reacción química con agua tal como se muestra en la figura 2.4.

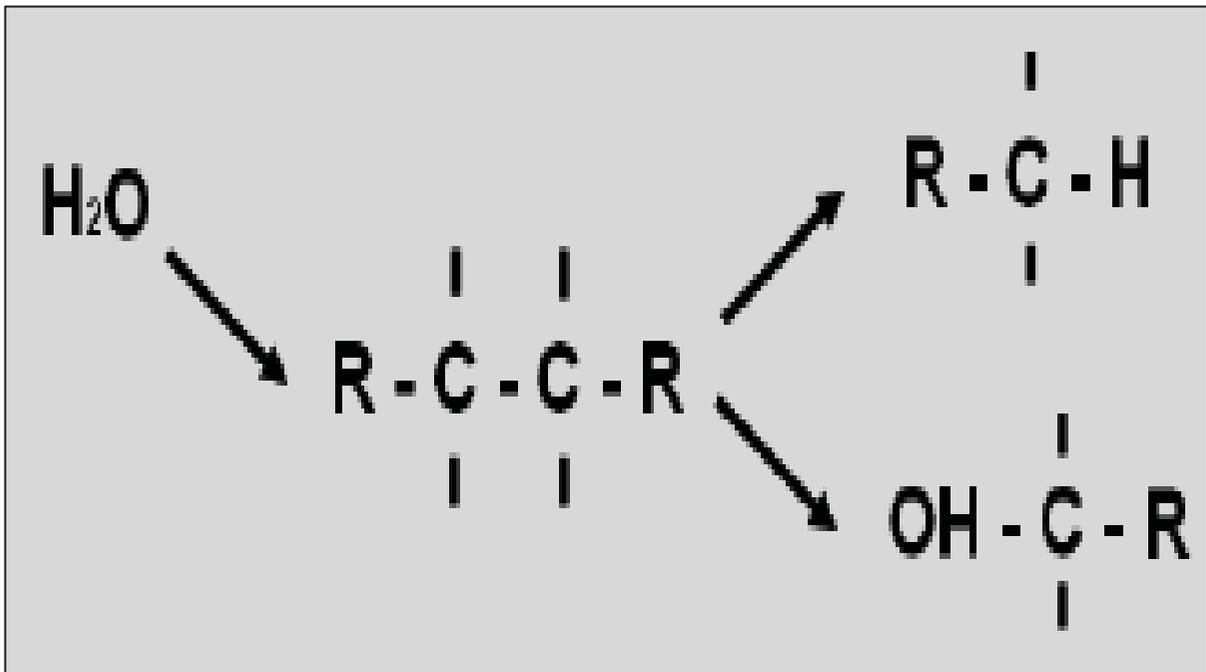


Figura 2.4: Formación de monómeros durante la hidrólisis [10].

La hidrólisis de los carbohidratos toma a lugar en unas pocas horas, en cambio la hidrólisis de las proteínas y lípidos toma lugar en unos días. Los microorganismos anaeróbicos facultativos toman el oxígeno disuelto en el agua lo que permite obtener un bajo potencial Redox (medición de la actividad de electrones) necesario para la existencia de microorganismos anaeróbicos.

2.4.2 Acidogénesis

Los productos intermedios formados por el proceso de hidrólisis, se dividen luego durante la acidogénesis (fase de acidificación) por medio de bacterias fermentadoras

anaeróbicas, formando así, ácidos grasos más bajos, como por ejemplo: acéticos, prebióticos y butírico. En esta fase también se forman pequeñas cantidades de ácido láctico y alcoholes junto a la formación de dióxido de carbono e hidrógeno.

2.4.3 Acetogénesis

En esta etapa, mediante bacterias acetogénicas, se forma principalmente ácido acético, precursor principal del biogás, además de hidrógeno y dióxido de carbono. La figura 2.5 detalla las principales reacciones químicas de la fase acetogénica y sus subproductos.

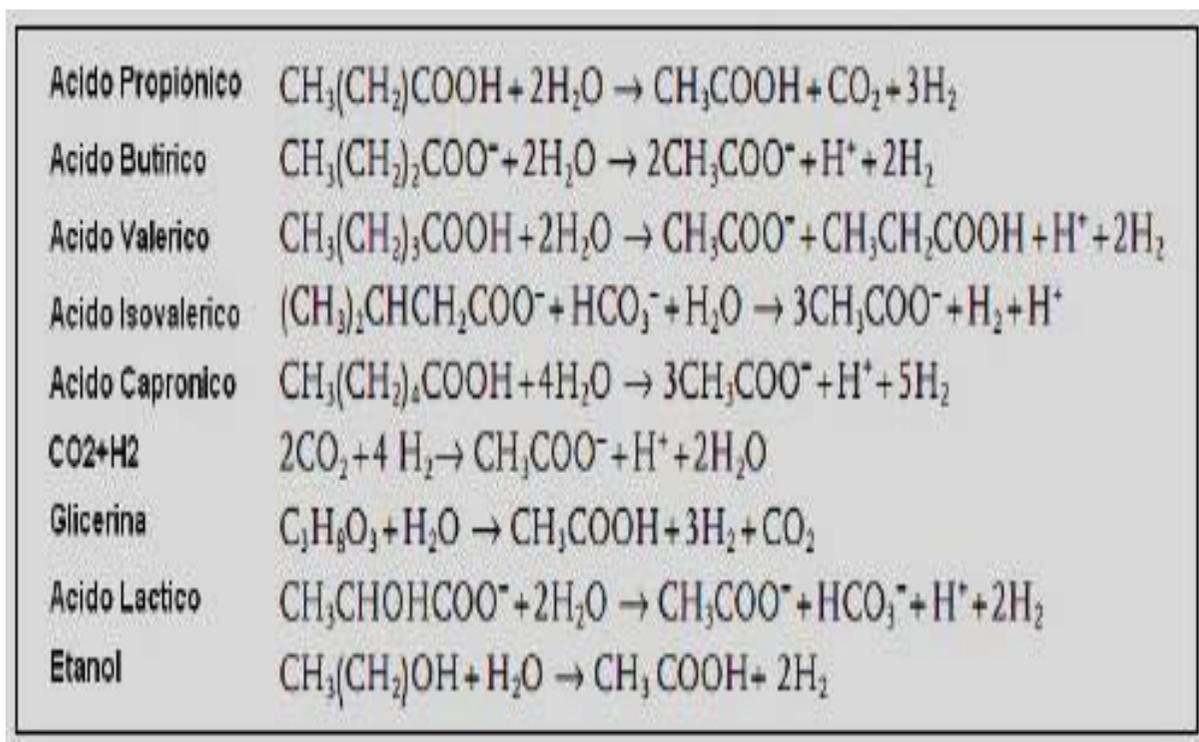


Figura 2.5: Subproductos de la fase acetogénica [10].

En esta etapa, es particularmente importante la presión parcial del hidrógeno. Un contenido excesivo impide la conversión de los productos intermedios de la acidogénesis por razones relacionadas con la energía, implicando en consecuencia, la acumulación de ácidos orgánicos, como por ejemplo: el ácido propiónico, el ácido isobutírico, el ácido isovalérico y el ácido hexanoico, los cuales inhiben la formación del metano.

Se hace necesario que las bacterias acetogénicas (bacterias productoras de hidrógeno) deban coexistir en una comunidad biótica cerrada (biocenosis) con las arqueas metanogénicas que consumen hidrógeno y dióxido de carbono durante la formación de metano durante la metanogénesis. La figura 2.6 representa esquemáticamente la degradación acetogénica y la biocenosis con las que las arqueas metanogénicas forman metano.

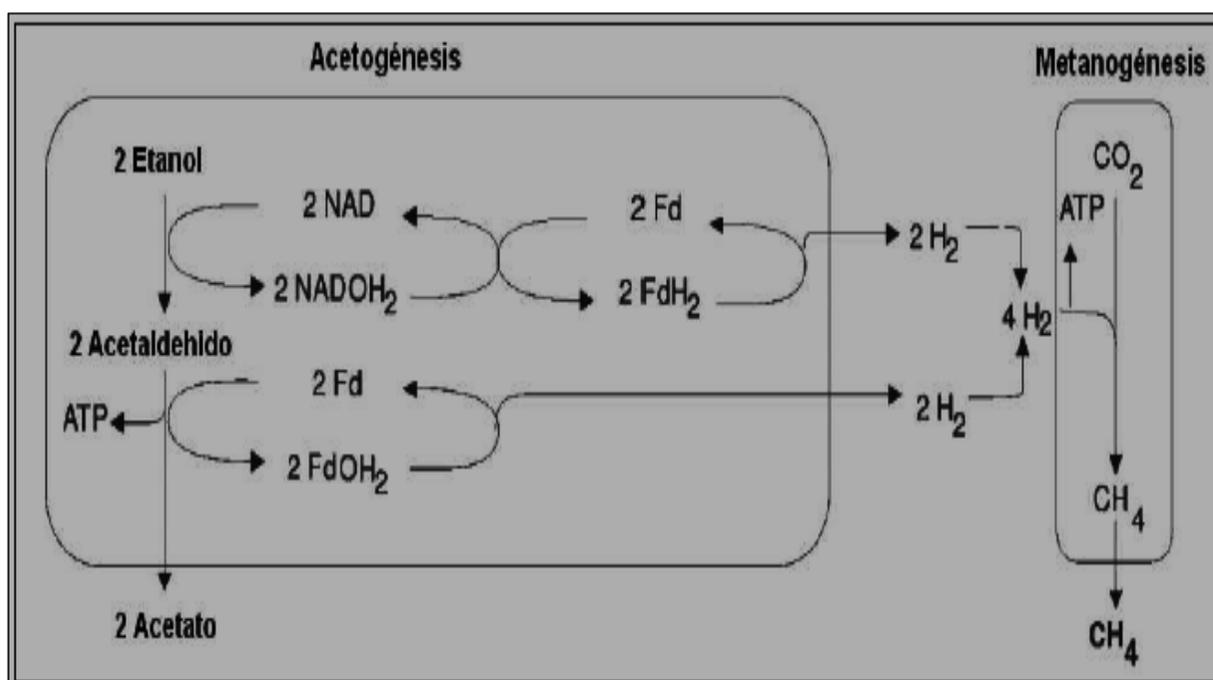


Figura 2.6: Esquema degradación acetogénica y metanogénica [10].

2.4.4 Metanogénesis

En esta etapa final de generación de biogás, el ácido acético, el hidrógeno y el dióxido de carbono se convierten en metano por medio de microorganismos conocidos como arqueas metanogénicas estrictamente anaeróbicas. Los metanógenos hidrogenotróficos producen metano a partir del hidrógeno y del dióxido de carbono, mientras que las bacterias acetoclásticas que forman metano lo producen por división del ácido acético. Esencialmente, las cuatro fases de degradación anaeróbicas ocurren en un solo proceso de etapa única, sin embargo, los microorganismos involucrados tienen distintas necesidades energéticas según cada etapa dentro del biodigestor.

2.5 Parámetros del proceso de producción de biogás

Como en todo proceso biológico, la consistencia de las condiciones dentro del biodigestor es de relevante importancia. Un cambio de la temperatura o en la concentración del sustrato puede mermar la producción de biogás. Los procesos metabólicos de los microorganismos de fermentación dependen de ciertos parámetros detallados en la tabla 2.14.

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

Tabla 2.14: Valores ambientales requeridos para la producción de biogás [10].

Un proceso de fermentación óptimo, debe considerar parámetros constantes ya que una alteración de las condiciones del medio puede tomar tres o más semanas hasta que el sistema ecológico sea adaptado a las nuevas condiciones y la producción de biogás tome a lugar nuevamente.

2.5.1 Temperatura

La temperatura muestra dos rangos óptimos para la acidificación de las bacterias, 32-42(°C) para microorganismos mesofílicos y otra de 48-55(°C) para microorganismos termofílicos, tal como se detalla en la figura 2.7.

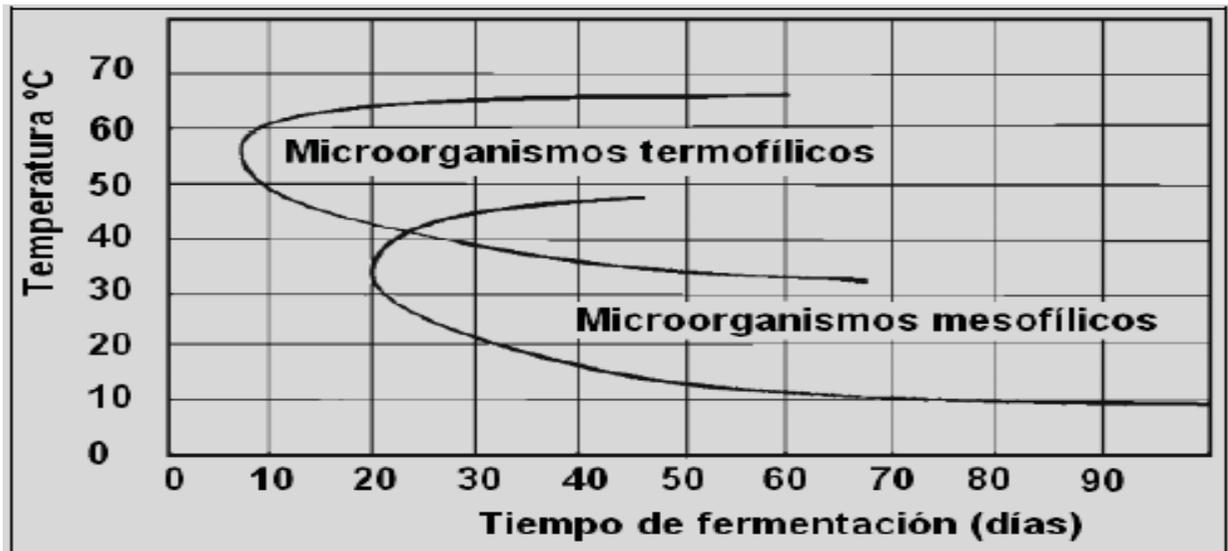


Figura 2.7: Relación tiempo de fermentación v/s temperatura [10].

2.5.2 pH

La siguiente ecuación entrega la relación entre el pH y la concentración de iones de hidrógeno en mol mL⁻¹:

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

El pH óptimo para la proliferación de microorganismo formadores de metano están entre un rango de 6,7 a 7,5. Aunque el proceso acepta rangos cercanos al pH neutro presentando problemas si este baja de un valor de 6 o sube de un valor de 8.

2.5.3 Potencial Redox

El potencial Redox es análogo al concepto del pH. Esta es una forma de medición de la actividad de los electrones. En el biodigestor se hace necesario valores bajos de este parámetro, aceptando mediciones que comprenden entre -300 y -330 (mV) como óptimo.

2.5.4 Nutrientes, relación C: N: P

La relación C: N de sustrato debe estar comprendida en los rangos de 16:1 – 25:1 como recomendación.

2.5.5 Sólidos volátiles y materia seca

La cantidad de materia seca o sólidos totales (ST) no debe superar el 10% como recomendación, debido principalmente a que un contenido alto en sólidos, impide el libre movimiento de las bacterias propias del proceso de biodigestión anaeróbica mermando la producción de biogás.

La cantidad de sólidos volátiles (SV) en kilogramos, permite determinar la cantidad de biogás posible de ser generado cuando este es multiplicado por el rendimiento del biogás en metros cúbicos por cada kilogramo de sólidos volátiles.

CAPÍTULO III: Estudio del potencial de generación de biomasa y biogás

3.1 Realidad ganadera nacional

El VII censo nacional agropecuario realizado el año 2007 [13] estableció una dotación de 3.789.697 cabezas bovinas, de las cuales 3.738.547 se concentraban entre la Región de Valparaíso y la Región de Magallanes y La Antártica, ambas con una participación del 98,7%. Esta cantidad contiene la totalidad de las distintas categorías de existencias de ganado, las que incluye: vacas, vaquillas, terneras, terneros, novillos y toritos, toros y bueyes, valores detallados en tabla 3.1 [12].

Por contener más del 98% de la totalidad de la existencia bovina nacional, los datos más actuales consideran solamente las regiones comprendidas desde Valparaíso a Magallanes y la Antártica.

Región	Número de cabezas	Participación (%)
Arica y Parinacota	2.273	0
Tarapacá	123	0
Antofagasta	282	0
Atacama	7.149	0
Coquimbo	41.323	1
Valparaíso	107.704	3
Metropolitana	101.275	3
O'Higgins	88.986	2
Maule	265.780	7
Biobío	459.219	12
La Araucanía	677.978	18
Los Ríos	629.385	17
Los Lagos	1.058.210	28
Aysén	199.284	5
Magallanes y La Antártica	143.635	4
Total	3.789.697	100%

Tabla 3.1: Existencia de ganado bovino según región a nivel nacional [12].

A partir de los datos de la tabla 3.2, se puede observar una situación preocupante y que demuestra una variación negativa en la existencia de ganado bovino, tomando como rango de tiempo los años 2007 y 2011. A medida que la cantidad de ganado disminuye, también lo hace la capacidad de generación de biogás a partir de purines.

Región	Existencia de ganado bovino Número de cabezas		
	Año		Variación
	2007	2011	%
Valparaíso	72.602	58.309	-19,7
Metropolitana	80.779	56.977	-29,5
O'Higgins	58.529	47.895	-18,2
Maule	166.391	104.791	-37,0
Biobío	253.799	183.183	-27,8
La Araucanía	363.879	285.181	-21,6
Los Ríos	508.115	436.539	-14,1
Los Lagos	818.195	749.600	-8,4
Aysén	168.486	137.410	-18,4
Magallanes	138.936	117.501	-15,4
Total	2.629.711	2.177.386	-17,2

Tabla 3.2: Existencia de ganado bovino según región a nivel nacional y variación porcentual [12].

De la tabla 3.2, se puede concluir que la población bovina, a nivel nacional, ha disminuido un 17,2% donde la región que más ha mermado su población bovina es la Región del Maule cuyo porcentaje de retroceso fue de un 37%. En su contraparte, la región que menos ha disminuido su población bovina ha sido la Región de Los Lagos.

3.1.1 Realidad ganadera de la Región Metropolitana

A partir de la tabla 3.1 en la Región Metropolitana se concentran 101.275 cabezas de ganado bovino, lo que representa cerca del 3% a nivel nacional [12] con un total de 2.636 informantes repartidos en 671.120,39 (ha) de superficie [13].

La tabla 3.3 representa los datos ordenados por distribución geográfica de las provincias de la Región Metropolitana y divididas en estratos determinados por el número de cabezas bovinas en rebaños de 50 a 99; 100 a 299; 300 y más.

Estrato Número de cabezas bovinas	Chacabuco	Santiago	Cordillera	Maipo	Talagante	Melipilla
50 a 99	1.343	1.010	415	344	482	6.443
100 a 299	2.668	1.737	1.918	2.107	1.336	11.310
300 y más	4.953	2.870	1.868	1.324	7.686	30.965
Total	8.964	5.617	4.201	3.775	9.504	48.718
Participación en (%)	11,10	6,95	5,20	4,67	11,77	60,31

Tabla 3.3: Existencia de ganado bovino según provincia [12].

De la tabla 3.3 se puede concluir que más de la mitad de la existencia bovina de la Región Metropolitana se concentra en la provincia de Melipilla, con un 60,31% del total.

3.2 Ganado bovino de lechería en la Región Metropolitana

La cantidad de ganado bovino de lechería en explotación con rebaños de 50 cabezas o más ascendía a 797.505 animales al año 2011 a nivel nacional, lo que

incluía las categorías de vacas, vaquillas, terneras, terneros y toros, cuyos emplazamientos están comprendidos entre la Región de Valparaíso y la Región de Magallanes y la Antártida.

La categoría de vaca se subdivide, a su vez, en vacas para ordeña, nodrizas y de desecho. La cantidad de existencia de ganado en planteles lecheros para la Región Metropolitana dividido por provincias, se detalla en la tabla 3.4.

Provincia	Vacas			Vaquillas	Terneras	Terneros	Toros
	Ordeña	Nodrizas	Desecho				
Chacabuco	466	-	102	94	129	-	6
Santiago	491	-	155	115	94	-	3
Cordillera	-	-	-	-	-	-	-
Maipo	-	-	-	-	-	-	-
Talagante	2.908	-	624	1.504	1.196	75	48
Melipilla	6.451	-	1.885	2.513	2.057	208	33
Total Regional	10.316	-	2.766	4.226	3.476	283	90

Tabla 3.4: Existencia de ganado en planteles lecheros para la Región Metropolitana ordenados por provincias [12].

Los planteles lecheros de pequeños y medianos productores, generalmente practican un sistema extensivo de producción sobre la base de pastoreo directo en el potrero durante la mayoría del año. Durante los meses de invierno, el sistema de alimentación se da por medio de concentrados y fardos de alfalfa. Bajo esta modalidad las vacas ingresan a la sala de ordeña 1 a 2 veces por día, volviendo nuevamente al potrero [9].

Los planteles con un número mayor a 100 bovinos practican un sistema más intensivo, en el cual los animales permanecen estabulados, siendo alimentados principalmente con fardos de alfalfa y concentrados. En este último sistema de producción, los animales permanecen en un patio de tierra durante gran parte de la jornada, pasando a la sala de ordeña 2 veces al día.

La mayor parte de los residuos generados quedan en el patio de donde son retirados una vez al año. Se estima que la producción de guano en estas condiciones, varía entre 4,0 a 5,8 (m³/vaca/año) siendo aplicados directamente al campo o quedando disponibles para su posterior venta [9]. Por otra parte, los purines producidos en la sala de ordeña son retirados diariamente mediante alguno de los siguientes procedimientos:

- 1) Lavado con agua de canal, que va directamente a las acequias de regadío y desde ahí, al sistema de riego predial
- 2) “Manguereo” y junto al agua de limpieza los residuos van a un pozo purinero
- 3) Paso de una tolva por los pasillos para el retiro de los sólidos y líquidos, los cuales son derivados a un potrero de sacrificio donde son amontonados sin ventilación posterior. La fracción líquida se filtra en el suelo, mientras que la parte sólida restante es reutilizada como abono agrícola
- 4) Limpieza de pasillos se realiza mediante una pala mecánica con tractor tres veces al día, luego, los depósitos son acumulados en un pozo purinero. Se agrega agua para diluir y luego son bombeados a una piscina con agitador o bien, directamente al campo.

Se estima que la producción de estiércol depositado por los animales en la sala de ordeña es de aproximadamente 25 (kg) de guano por animal al día, con un 85% de humedad, es decir 3 a 4 (kg) de materia seca al día por animal [9].

En general, los productores no llevan registros ni tienen estimaciones de la producción de purines ni guano seco. La literatura indica que la producción de estiércol de ganado lechero bajo condiciones de la zona central de Chile para un animal de 635 (kg) de peso es de aproximadamente 52,2 (kg/día) con una humedad promedio del 87,3% [9], valor muy cercano al expuesto mediante el método de Deublein y Steinhauser [10].

3.3 Volumen teórico de purín generado por existencia de ganado bovino

A partir de la tabla 3.4 se puede calcular la cantidad de purín generado por la existencia de ganado bovino de lechería para la Región Metropolitana, utilizando el método descrito por Deublein y Steinhauser [10] y detallado en la tabla 2.10. Para tal caso se considerará lo siguiente:

- 1) Se entiende como vaca de ordeña, la definición de vaca lechera, cuyo UAE correspondiente es igual a 1,2
- 2) Se entiende como vaca de desecho, aquella de engorda destinada para la venta de carne [14], cuya UAE correspondiente es igual a 1
- 3) Se entiende por vaquilla, al vacuno joven menor de 2 años cuya UAE correspondiente es igual a 0,6
- 4) Para terneras y terneros la conversión equivalente en UAE son 0,2 y 0,3 respectivamente
- 5) Para la conversión de toro a UAE se tomará un valor de 0,7.

El método de Deublein y Steinhauser [10] toma como base de conversión la vaca o vacuno de engorda para obtener las UAE correspondientes para las distintas variedades animales en estudio. Según este método (detallado en la tabla 2.10) para obtener el valor del purín anual generado se debe multiplicar por un factor de 18

(correspondiente a la vaca o vacuno de engorda) la cantidad de UAE para cada clasificación, tal como se detalla en la tabla 3.5

Clasificación	Nº de animales	UAE	Purín (m ³ /año)
Para ordeña	10.316	12.379	222.822
Nodrizas	-	-	-
Desecho	2.766	2.766	49.788
Vaquillas	4.226	2.536	45.648
Terneras	3.476	695	12.510
Ternero	283	85	1.530
Toro	90	63	1.134
Total	21.157	18.524	333.432

Tabla 3.5: Cálculo de volumen de purín generado anualmente por bovinos de lecherías de la Región Metropolitana.

Se puede argumentar, en base a la tabla 3.5, que el volumen teórico de sustrato o biomasa generada a partir de los desechos de bovinos de lecherías de la Región Metropolitana asciende a **333.432 (m³/año)** donde cerca del **67%** del total es aportado por vacas destinadas para la ordeña.

3.4 Volumen teórico de biogás generado por existencia de ganado bovino

A partir de la tabla 3.5 es factible calcular la cantidad teórica de biogás posible de ser generada por existencia de ganado bovino de lechería para la Región Metropolitana. Utilizando el método descrito por Flotats y col (2009), el cual

establece que por cada metro cúbico de purín se logran obtener 27,2 (m³) de biogás, con un contenido de 65% de metano. El valor de 27,2 se establece como un factor de conversión.

Para tal efecto, se procede según la regla de tres simple detallada a continuación:

$$Q = P \cdot 27,2 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right) \quad [\text{Ec. 3.1}]$$

Donde:

Q = Producción de biogás (m³/año).

P = Producción de purín, 333.432 (m³/año).

27,2= Factor de conversión de Flotats y col (2009).

De la ecuación 3.1 y utilizando la tabla 3.6 se puede argumentar que el volumen teórico de biogás generado a partir de los desechos de bovinos de lecherías de la Región Metropolitana asciende a **9.069.350 (m³/año)** donde cerca del **67%** del total es aportado por vacas destinadas para la ordeña.

Clasificación	Nº de animales	UAE	Purín (m ³ /año)	Biogás (m ³ /año)
Para ordeña	10.316	12.379	222.822	6.060.758
Nodrizas	-	-	-	-
Desecho	2.766	2.766	49.788	1.354.234
Vaquillas	4.226	2.536	45.648	1.241.626
Terneritas	3.476	695	12.510	340.272
Ternero	283	85	1.530	41.616
Toro	90	63	1.134	30.845
Total regional	21.157	18.524	333.432	9.069.350

Tabla 3.6: Cálculo de volumen de biogás generado anualmente por bovinos de lecherías de la Región Metropolitana.

3.5 Cálculo del potencial teórico contenido por existencia de ganado bovino

Desde de los resultados expuestos en la tabla 3.6 se determinó que el potencial teórico de biogás generado a partir de los desechos de bovinos de lecherías de la Región Metropolitana asciende a 9.069.350 (m³/año). En base a este último valor, se puede obtener la energía contenida en este volumen de biogás, considerando una fracción de gas metano contenido en la mezcla igual a un 65% aunque este valor puede variar entre un 55 y 70%.

Para tal efecto se procede según la siguiente ecuación [16]:

$$E = Q \cdot m \cdot p \left(\frac{\text{kWh}}{\text{año}} \right) \quad [\text{Ec. 3.2}]$$

Donde:

E = Energía bruta generada al año (kWh/año).

Q = Biogás generado (m³/año).

m = Fracción de metano contenido (65%).

p = Poder calorífico del metano (kWh/m³).

Desarrollando la ecuación 3.2 resulta:

$$E = 9.069.301 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{año}} \right) \cdot 0,65 \cdot 9,96 \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \right) \cdot \frac{1}{1000} \left(\frac{\text{MWh}}{\text{kWh}} \right)$$

Donde E = 58.714,65 (MWh/año).

Considerando una estabulación del ganado en las lecherías en un 100% entonces, teóricamente es posible generar **58.714,65 (MWh/año)** de energía bruta con la tecnología adecuada a pleno funcionamiento, es decir, las 24 horas del día y los 365 días del año. Esto lograría producir una potencia media nominal de generación igual a **6,7 (MW)**.

3.6 Caracterización de un biodigestor a partir de un plantel de 100 bovinos

3.6.1 Cálculo del volumen de purín generado

Según la literatura, una vaca lechera con un peso promedio de 635 (kg) producirá diariamente un aproximado de 52,2 (kg/día) de purín con un 87,3% de humedad [9]. Si se considera una densidad del purín igual a 1.020 (kg/m³) [18], se puede obtener el volumen de purín generado por animal según la siguiente regla de tres expresada a continuación:

$$\frac{1(\text{m}^3)}{1.020 (\text{kg})} = \frac{V}{52,2 (\text{kg})}$$

Por lo tanto, una vaca con un peso promedio de 635 (kg) producirá un volumen (V) de desperdicio aproximadamente igual a **0,0512 (m³)** al día.

Considerando un plantel lechero de 100 bovinos, el volumen anual de purín generado será de:

$$V = 0,0512 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día} \cdot \text{animal}} \right) \cdot 365 \left(\frac{\text{día}}{\text{año}} \right) \cdot 100 (\text{animal})$$

Por consiguiente, un plantel de lechería de 100 bovinos con un peso promedio de 635 (kg) producirán un volumen (V) de **1.868,8 (m³/año)** de purín, equivalentes **5.220 (kg/día)** de sustrato.

3.6.2 Niveles de sólidos totales (ST)

La cantidad de humedad presente en el purín corresponde a un 87,3% por lo tanto, el porcentaje de sólidos totales (ST) correspondiente es de un 12,7%. El valor óptimo de sólidos totales debe ser igual o menor a un 10% por lo tanto, se requiere disminuir de un 12,7% a un 10% de ST.

Para tal efecto se procede según la siguiente ecuación [17]:

$$\% ST = \frac{1\text{kg excreta} \cdot \% ST \text{ excreta fresca}}{1\text{kg excreta fresca} + w} \quad [\text{Ec. 3.3}]$$

Dónde w es igual a la cantidad de litros de agua que se deben añadir por cada kilogramo de excreta fresca.

Desarrollando la ecuación 3.3 resulta:

$$0,10 = \frac{1 \cdot 0,127}{1 + w}$$

Por lo tanto, para disminuir el porcentaje de sólidos totales de un 12,7% a un 10% es necesario agregar **0,27 litros** de agua por cada kilogramo de excreta fresca.

Ahora se hace necesario calcular la cantidad de líquido a sumar a la mezcla en kilogramos, asumiendo una densidad del agua igual a 1 (kg/L).

Para tal efecto se procede según la siguiente ecuación [17]:

$$MH_2O = \frac{x \cdot ST \%}{10\%} - x \text{ (kg)} \quad [\text{Ec. 3.4}]$$

Donde:

MH_2O = Masa de agua agregada (kg/día).

x = Cantidad de purín (kg/día).

ST = Porcentaje de sólidos totales.

Desarrollando la ecuación 3.4 y utilizando los datos obtenidos, resulta:

$$MH_2O = \frac{5.220 \cdot 12,7}{10\%} - 5.220 \text{ (kg)}$$

De esta manera, se deben agregar **1.409,4 (kg/día)** de masa de agua a los 5.220 (kg/día) de purín, de esta forma se logra disminuir desde un 12,7% a un 10% de sólidos totales (ST).

Para obtener el 10% de sólidos totales en materia sólida (MS) se debe utilizar la siguiente ecuación [17]:

$$MS = \frac{ST\% \cdot 5.220}{100\%} \left(\frac{\text{kg}}{\text{día}} \right) \quad [\text{Ec. 3.5}]$$

Donde:

MS= Materia sólida por día (kg/día).

ST= Sólidos totales (%).

Desarrollando la ecuación 3.5 resulta:

$$MS = \frac{10\% \cdot 5.220}{100\%} \left(\frac{\text{kg}}{\text{día}} \right)$$

Por lo tanto, la cantidad de materia sólida (MS) es igual a **522 (kg/día)**.

3.6.3 Cálculo de la carga diaria del biodigestor

Si se considera una producción diaria de 5.220 (kg) de purín, a la que se le debe agregar 1.409,4 (kg) de agua para diluir el excedente de sólidos, entonces la carga diaria del biodigestor (C) será [17]:

$$C = 5.220 \left(\frac{\text{kg}}{\text{día}} \right) \text{ de purín} + 1.409,4 \left(\frac{\text{kg}}{\text{día}} \right) \text{ de agua}$$

Por lo tanto, la carga para alimentar el biodigestor será la suma de la cantidad de biomasa y el líquido para diluir. Esto da como resultado una carga diaria de **6.629,4 (kg/día)** o **6,45 (m³/día)** de sustrato o purín con una densidad de 1.020(kg/m³) [18].

3.6.4 Cálculo de la temperatura en el interior del biodigestor

El régimen mesofílico de operación es el más utilizado y comprende rangos de entre 25-45(°C). A medida que la temperatura aumenta, también lo hace la velocidad de reproducción de los microorganismos acelerando el proceso de digestión, dando lugar a mayores producciones de biogás [15]. Por decisión del diseñador, la temperatura de operación al interior del biodigestor será fijada en **35 (°C)** ubicándose dentro del rango mesofílico.

3.6.5 Cálculo del tiempo de retención

El tiempo de retención es aquel en donde el contenido de biomasa permanece en el interior del reactor. Este parámetro es función de la temperatura de operación al interior del estanque biodigestor.

Una forma de obtener el tiempo de retención es mediante el uso de la figura 3.1. Esta figura, representa un gráfico en el cual mediante la experimentación entre las variables “Días de retención” y “Temperatura”, se logra obtener una línea de tendencia detallada por la ecuación 3.6.

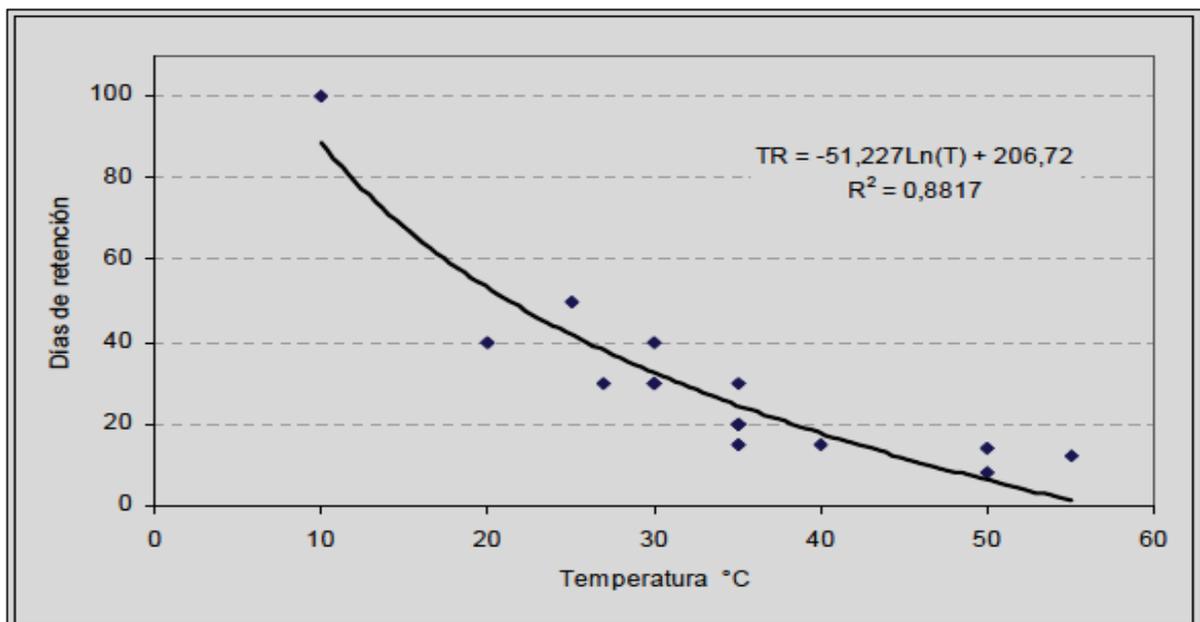


Figura 3.1: Tiempo de retención en función de la temperatura de operación [17].

$$TR = -51,227 \cdot \ln(T) + 206,72 \text{ (días)} \quad [\text{Ec. 3.6}]$$

Donde:

TR = Tiempo de retención (días).

T = Temperatura de operación (°C).

Desarrollando la ecuación 3.6 resulta:

$$TR = -51,227 \cdot \ln(35) + 206,72 \text{ (Días)}$$

Por lo tanto, el tiempo de retención (TR) toma un valor de **25 días**.

3.6.6 Cálculo del volumen del biodigestor

El cálculo del volumen del biodigestor es función del tiempo de retención (TR) y el volumen de la carga diaria (C), su valor se obtiene según la siguiente ecuación [17]:

$$V = C \cdot TR \cdot 1,2 \text{ (m}^3\text{)} \quad [\text{Ec. 3.7}]$$

Donde:

V = Volumen neto del digestor (m³).

C = Carga diaria de biomasa (m³/día).

TR = Tiempo de retención (Días).

1,2 = Holgura para el almacenamiento del biogás.

Desarrollando la ecuación 3.7 resulta:

$$V = 6,45 \cdot 25 \cdot 1,2 \text{ (m}^3\text{)}$$

Por lo tanto, el volumen neto de operación del biodigestor (V) toma un valor de **193,50 (m³)**.

3.7 Balance másico de la instalación

La figura 3.2 representa el diagrama de flujo másico para una instalación básica generadora de biogás bajo los parámetros típicos de un plantel lechero emplazado en la zona central.

El purín generado por el ganado de ordeña y estabulado, es retirado del pasillo mediante una pala mecánica con tractor tres veces al día, luego, los depósitos son acumulados en un pozo purinero donde se agrega agua para diluir. La mezcla es homogenizada mediante un mezclador, para luego, ser bombeada al biodigestor, lugar en donde se obtendrá biogás y biomasa orgánica mineralizada para riego o para la venta como fertilizante agrícola.

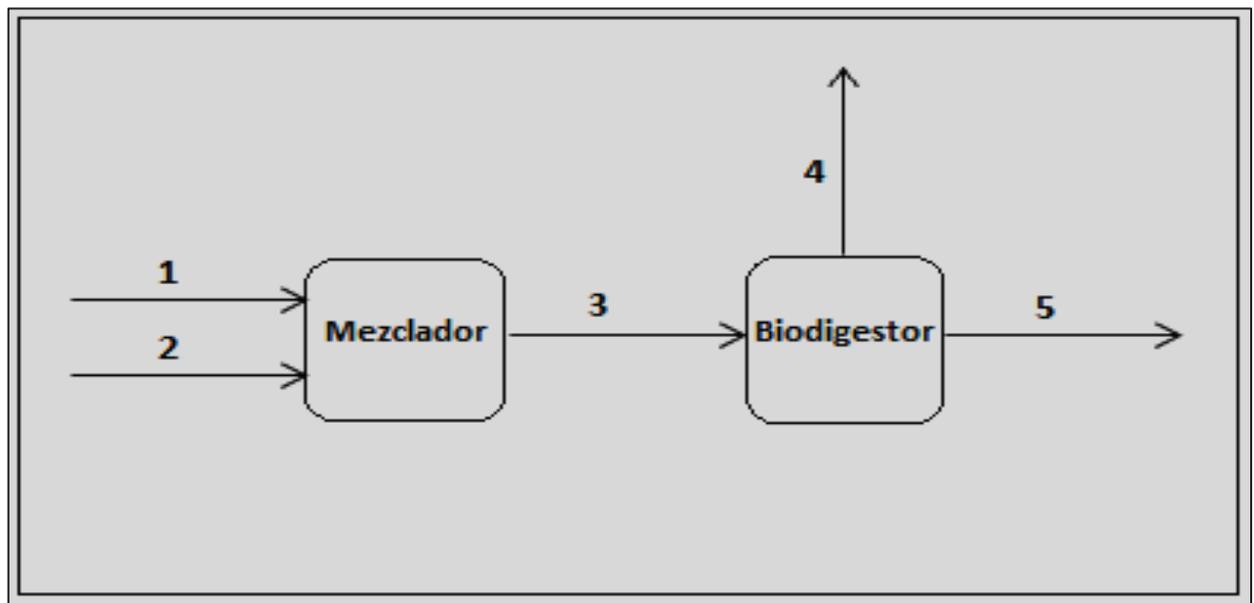


Figura 3.2: Diagrama básico de la instalación.

Donde:

(1): Adición de agua de disolución de sólidos totales

(2): Adición de biomasa para la biodigestión

(3): Mezcla de biomasa y agua

(4): Biogás rico en metano y alto poder calorífico

(5): Efluente de biomasa mineralizada para la utilización en praderas, riego o venta.

Línea de operación 1: mediante la línea de operación 1, se vierte en el pozo purinero la cantidad de líquido necesario para la disolución de los sólidos totales presentes en la biomasa, con la finalidad de reducir de un 12,7% de ST a un 10%. Valor calculado en el apartado 3.6.2, ascendiendo a 1.409,4 (kg) de agua.

Línea de operación 2: la línea de operación 2, representa el purín o sustrato generado en los establos o sala de ordeña. Estos son retirados mediante palas mecánicas y depositados en el pozo purinero para ser mezclado y homogeneizado junto al agua proveniente de la línea de operación 1.

La composición de la biomasa es de un 12,7% ST, 87,3% de humedad y 73% SV. Este último, es un valor promedio obtenido desde la tabla 2.9.

Línea de operación 3: desde la línea de operación 3, es bombeada la mezcla de biomasa más el líquido de disolución, los cuales son cargados al biodigestor (El líquido agregado no es considerado como biomasa).

Como se ha añadido agua a la mezcla, la cantidad de sólidos volátiles se ve mermada debido a la disolución de materia sólida (MS) la cual ha disminuido de un 12,7% a un 10% lo que representa 522 (kg) de materia sólida en la mezcla. Esto representa una disminución de un 21,26% respecto a la materia sólida con un 12,7% de sólidos totales (ST).

La carga de sólidos volátiles (SV) se calcula según la siguiente ecuación [16]:

$$SV \text{ de ST} = MS \cdot \frac{\%SV}{100} \text{ (kg)} \quad [\text{Ec. 3.8}]$$

Donde:

SV de ST = Cantidad de SV en función de ST (kg).

MS = Materia sólida (kg).

%SV = Porcentaje de sólidos volátiles.

Desarrollando la ecuación 3.8 resulta:

$$\text{SV de ST} = 522 \cdot \frac{73}{100} \text{ (kg)}$$

Esto representa una carga de sólidos volátiles correspondiente a **381,06 (kg)**. Este valor representa una carga diaria de 381,06 (kg) de SV en un espacio de 193,5 (m³) de biodigestor lo que se traduce a **1,97 (kg·SV/m³)**.

Línea de operación 4: desde la línea de operación 4, una vez ocurrida la digestión anaeróbica en el biodigestor, se obtiene biogás rico en metano y con un alto poder calorífico. Para el cálculo del biogás generado por día, se toman los siguientes valores teóricos desde la literatura especializada [16]: Rendimiento del biogás 450 (L/kg·SV) con 55% CH₄ y 45% de CO₂ y una densidad de 1,28 (kg/m³).

Para obtener el volumen de biogás posible de ser generado, se procede según la siguiente ecuación [16]:

$$Q = y \cdot \frac{\text{SV}}{1000} \text{ (m}^3\text{)} \quad [\text{Ec. 3.9}]$$

Donde:

Q = Cantidad de biogás (m³).

y = Rendimiento del biogás (L/kg·SV).

SV = Sólidos volátiles (kg).

Desarrollando la ecuación 3.9, resulta:

$$Q = 450 \cdot \frac{381,06}{1000} \text{ (m}^3\text{)}$$

Por lo tanto, la cantidad diaria de biogás generado (Q) en función del rendimiento del biogás y la cantidad de sólidos volátiles asciende a **171,48 (m³)**.

Línea de operación 5: La línea de operación 5 corresponde a los residuos generados por la digestión anaeróbica, mineralizados y posibles de ser utilizados como abono o para la comercialización en el mercado.

La cantidad de ceniza generada en el proceso es la diferencia entre la materia sólida y los sólidos volátiles expresados en kilogramos.

La tabla 3.7 representa un resumen de los balances másicos expresado en corriente por día.

Compuestos	Corriente por día (kg)				
	1	2	3	4	5
Biomasa (kg)	-	5.220	5.220	-	-
ST (%)	-	12,7	10	-	-
ST (kg)	-	662,94	522	-	-
SV (%)	-	73	73	-	-
SV (kg)	-	483,95	381,06	-	-
CH ₄ (%)	-	-	-	55	-
CO ₂ (%)	-	-	-	45	-
H ₂ O (kg)	1.409,4	4.557,06	-	-	-
Cenizas (kg)	-	-	-	-	140,94
Biogás (m ³)	-	-	-	171,48	-
Biogás (kg)	-	-	-	219,49	-

Tabla 3.7: Representación de los balances másicos.

3.8 Cálculo del potencial energético contenido en la instalación

El contenido de biogás posible de ser generado por la instalación y detallado en la línea de operación 4 asciende a 171,48 (m³/ día). Con este valor y utilizando la ecuación 3.2, se logra obtener la cantidad de energía contenida.

Desarrollando la ecuación 3.2 con un contenido de gas metano del 55% resulta:

$$E = 171,48 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right) \cdot 0,55 \cdot 9,96 \left(\frac{\text{kWh}}{\text{m}^3} \right)$$

Por lo tanto, la capacidad de generación energética bruta de la planta (E) es de **939,37 (kWh/día)**, o la de suministrar una potencia media de **39,14 (kW)**. El resumen de los parámetros operativos de funcionamiento y generación del biodigestor se detalla en la tabla 3.8.

Parámetro	Valor	Unidad
Carga Diaria	6.629,4	(kg/día)
Volumen neto	193,5	(m ³)
Tiempo de retención	25	(Días)
Temperatura interior	35	(°C)
Carga diaria de materia orgánica	1,97	(kg SV/m ³)
Producción de biogás	171,48	(m ³ /día)
Energía generada	939,37	(kWh/día)
Potencia nominal	39,14	(kW)

Tabla 3.8: Resumen parámetros operativos del biodigestor.

Capítulo IV: Selección y diseño del biodigestor

4.1 Biodigestores

Un biodigestor es un elemento esencial dentro de una planta de biogás, este actúa como un reactor hermético cumpliendo además, la función de contenedor de la materia orgánica. Es también el lugar en donde se produce la digestión anaeróbica. Los elementos complementarios al biodigestor tales como: equipos, estanques y tuberías, deben ser fiables, de modo que los elementos contenidos no puedan escapar y ni entrar en contacto con el medio, debido principalmente a que estas sustancias causan la desoxigenación del agua, pudiendo incluso contaminar las napas subterráneas.

Al igual que los elementos constructivos de una planta de biogás, un estanque reactor es susceptible al deterioro debido al contacto directo con compuestos químicos tales como: el ácido sulfúrico, amoníaco y ácido nítrico. Cuando los niveles de pH son inferiores a 0,6 ($\text{pH} < 0,6$) la zona de superficie se desgasta debido a la corrosión, por tal motivo, el material en la ingeniería constructiva de un biodigestor, se diseña principalmente con hormigón armado, bloques de concreto, láminas de acero soldadas, madera, GRP, plástico grueso o lonas de plástico, todo esto en función del diseño y los requerimientos propios de cada instalación [10].

4.1.1 Tipos de biodigestores

Se puede establecer una clasificación para un biodigestor en función de su capacidad para mantener altas concentraciones de microorganismos en el reactor o por medio del método de carga del material orgánico.

4.1.1.1 Biodigestor de mezcla completa sin recirculación

Este reactor, es uno de los más utilizados dentro del uso de residuos orgánicos. Su configuración es la de un estanque hermético y circular, pudiendo ser de acero u hormigón armado. En su forma de operación, utiliza mezcladores de sustrato, los que incorporan la carga añadida de forma regular y no violenta. Esto permite que el

sustrato entre en contacto con la población bacteriana y con el sustrato en degradación de forma armónica. En comparación a otros biodigestores, los tiempos de retención son altos. Este modelo de biodigestor es representado por la figura 4.1.

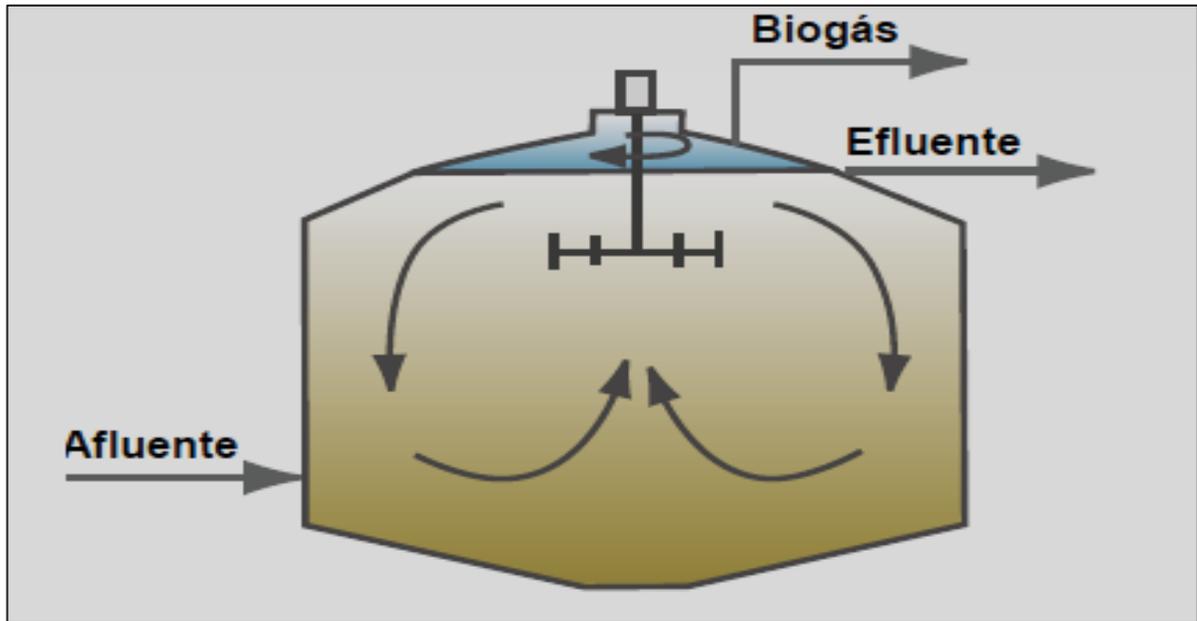


Figura 4.1: Biodigestor de mezcla completa sin recirculación [16].

Su capacidad de operación, permite concentraciones de hasta un 12% de ST, un tiempo de retención hidráulico de entre 20 y 25 días con un rango mesofílico de temperatura en su operación.

4.1.1.2 Biodigestor de mezcla completa con recirculación

Este sistema es conocido como reactor anaeróbico de contacto y sería equivalente al sistema de lodos activos aerobios para el tratamiento de aguas residuales. Se ha comprobado que regulando la recirculación, es posible conseguir tiempos de retención hidráulica más bajos que en un reactor de mezcla completa simple. Esto es debido a la incorporación de un separador entre el decantador y la recirculación, logrando un mayor tiempo de retención de los microorganismos. Este sistema es únicamente aplicable a aguas residuales de alta carga orgánica (aguas residuales de azucareras, cerveceras, etc.). Este tipo de biodigestor es representado por la figura 4.2.

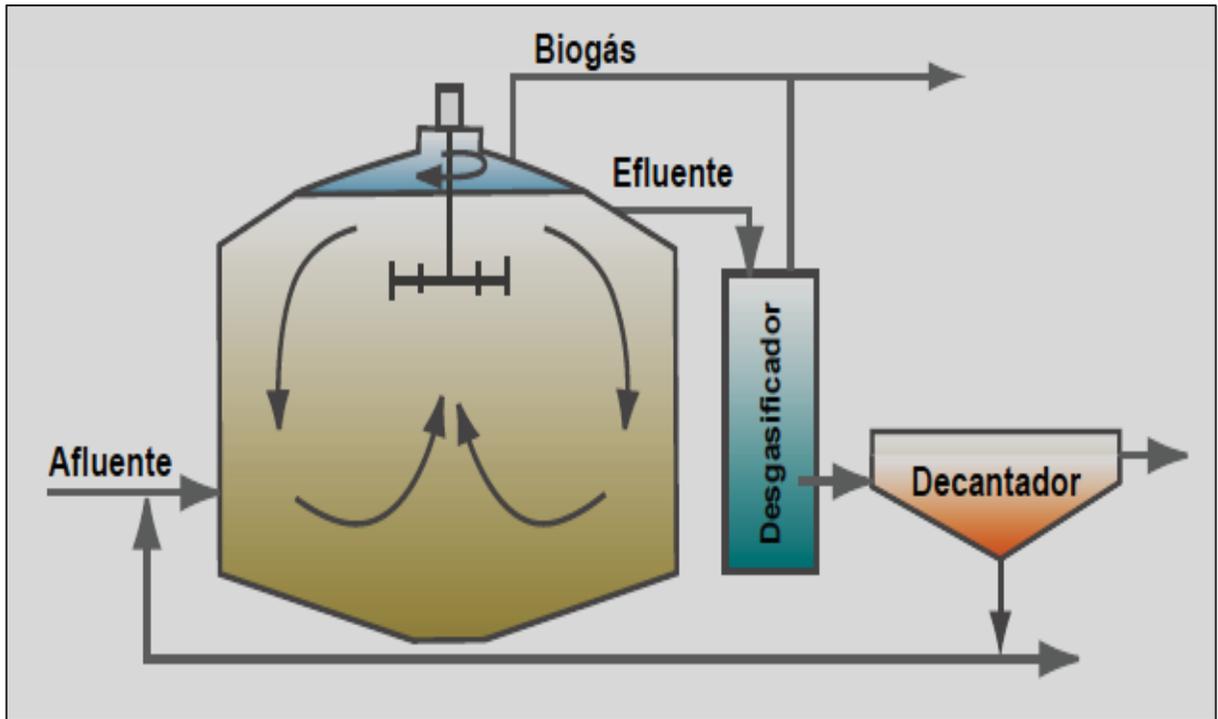


Figura 4.2: Biodigestor de mezcla completa con recirculación [16].

La tabla 4.1 detalla las principales características de un biodigestor de mezcla completa con y sin recirculación.

Características	Estanques verticales de sección circular
	Construcción en acero u hormigón armado
	Volúmenes posibles de sobre los 3.000 m ³ , pero no recomendables
	Velocidades de carga posibles en el rango de 1 a 3 (kg SV/m ³ día)
	Para sustratos bombeables, con contenidos de ST de hasta un 12%
	Apropiados para procesos continuos, discontinuos y semi-continuos

Tabla 4.1: Características de biodigestores de mezcla completa, con y sin recirculación [16].

4.1.1.3 Biodigestor de flujo pistón

La particularidad de este tipo de biodigestor, es que utiliza la nueva carga orgánica agregada para generar un empuje longitudinal del material ya contenido. La mezcla se produce generalmente en planos paralelos y perpendiculares a la dirección del flujo por medio de agitadores especialmente contruidos para ello. Son ideales para la digestión de sustratos con un alto contenido de sólidos.

El fundamento del diseño de este biodigestor está basado en las fases de degradación del proceso anaeróbico. Las primeras fases de Hidrólisis y Acidogénesis se realizan en las áreas cercanas a la entrada de la biomasa en el biodigestor, en cambio, las fases de Acetogénesis y Metanogénesis se llevan a cabo en la parte final cercanas a la salida del efluente. Este tipo de biodigestor es representado en la figura 4.3.

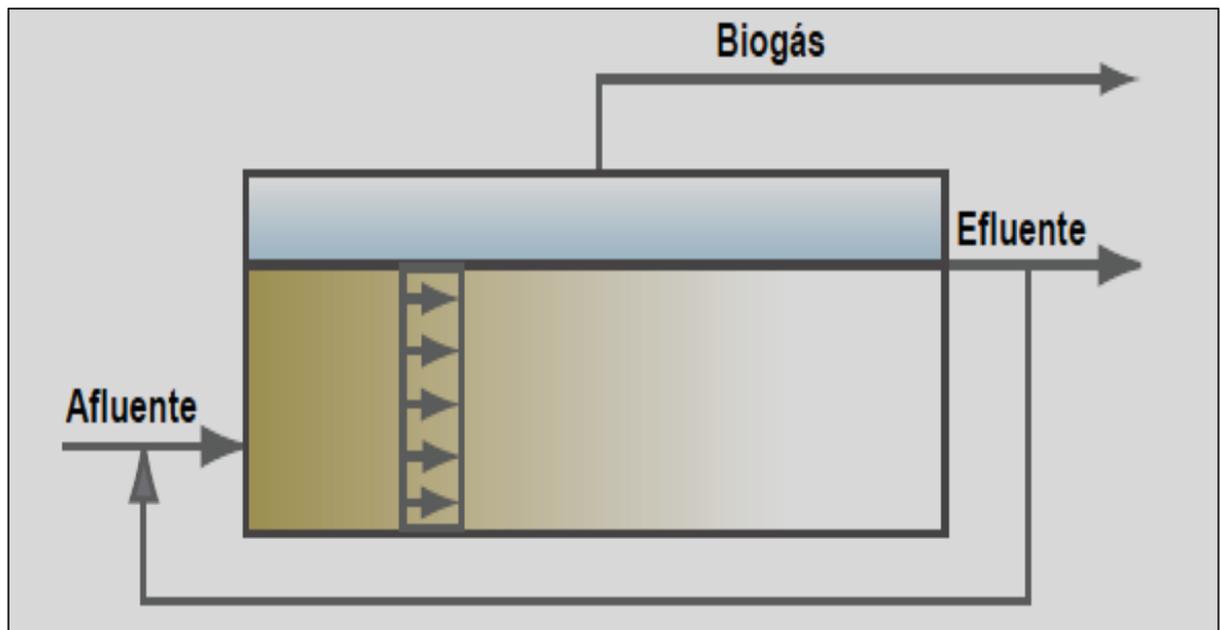


Figura 4.3: Biodigestor tipo pistón [16].

4.1.1.4 Biodigestor tipo Batch

La carga de este tipo de biodigestor se realiza una vez o también por medio de lotes una vez que la producción de biogás comienza la etapa de decaimiento en la producción de biogás. Llegando a cierto nivel, el biodigestor es descargado y

vaciado por completo, para ser nuevamente cargado con material fresco e iniciándose un nuevo proceso de producción de biogás.

4.1.1.5 Biodigestor de tipo continuo

Este tipo de biodigestor, es cargado y descargado de forma periódica según la disponibilidad del sustrato, siendo, generalmente durante todos los días. Cualquier tipo de construcción es apropiada para una planta continua, pero el material de fermentación debe ser fluido y uniforme. El proceso se caracteriza por una fermentación constante y una producción uniforme de gas de fácil control. La cantidad de material agregado debe ser igual a la cantidad de salida del efluente.

4.2 Elección del tipo de biodigestor para el diseño

La elección del tipo de biodigestor debe estar en función de los requerimientos técnicos de la instalación. La tabla 4.2 representa la caracterización del sustrato, así como también, de algunos parámetros operativos del plantel lechero importantes para la elección del tipo de biodigestor.

Característica	Comentario o valor
Volumen de digestor	193,50 (m ³)
Carga diaria de materia orgánica	1,97 (kg SV/m ³)
ST	10%
Densidad del sustrato [18]	1.020 (kg/m ³)
Gravedad específica del sustrato	1,02
Rango de temperatura	Mesofílico, 35 (°C)
Tiempo de retención hidráulica	25 Días
Mezclador interior del biodigestor	Sí
Tipo de recolección del sustrato	3 veces por día

Tabla 4.2: Características del sustrato e instalación plantel lechero para la elección del tipo de biodigestor.

Según lo descrito en el apartado 4.1 y considerando lo expuesto en la tabla 4.2, el tipo de biodigestor que más se adapta a los requerimientos operativos y a la caracterización del sustrato es el biodigestor de mezcla completa sin recirculación de carga continua, construido en acero soldado según la normativa API-650 [19].

4.3 Diseño del biodigestor

Para el diseño del biodigestor, se utilizará la normativa API-650 [19] para estanques de acero soldado. Esta normativa, es una serie de recomendaciones constructivas de estanques para el almacenamiento de petróleo y sus derivados. Creada por el American Petroleum Institute (API), esta normativa es ampliamente utilizada para el diseño de estanques de procesos de almacenamiento de agua o concentrados, aplicando para estanques cuya presión interna es cercana a la atmosférica, no mayor a los 2,5 psig (presión manométrica).

La figura 4.4, representa la geometría del estanque y las medidas principales para el diseño.

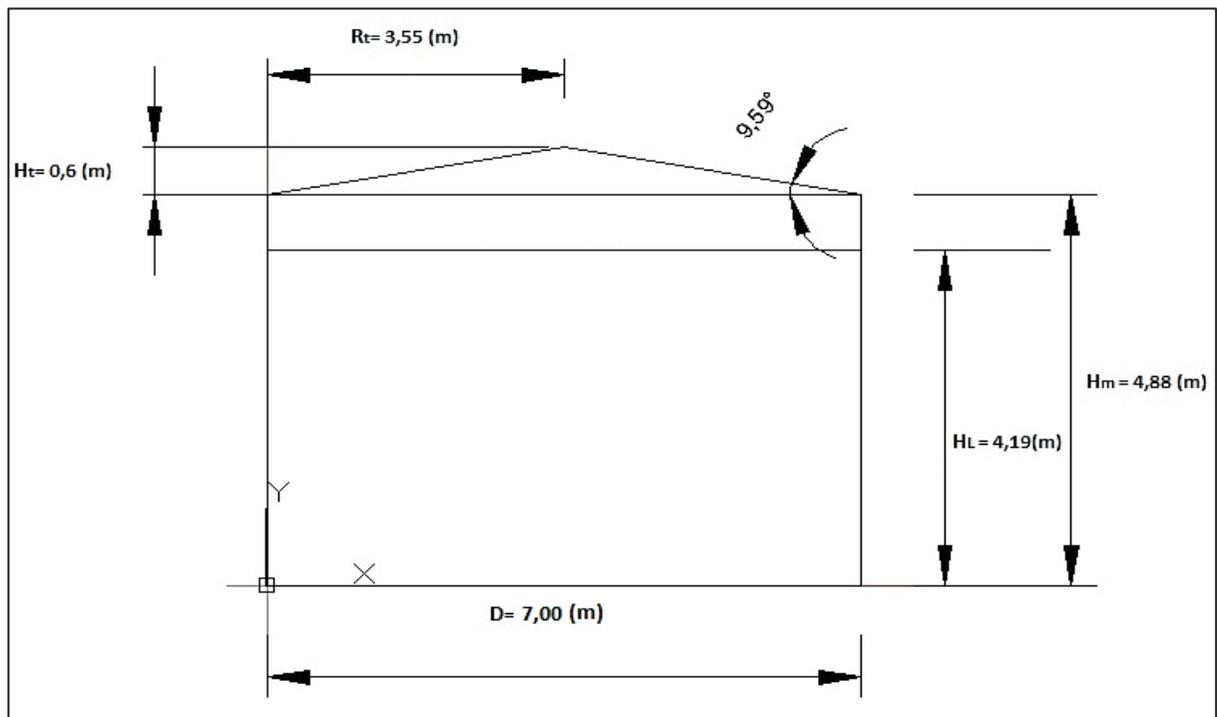


Figura 4.4: Geometría constructiva del biodigestor.

La tabla 4.3 representa un resumen de las medidas geométricas del biodigestor.

Geometría		Valor	Unidad
Cilindro (cuerpo)	Diámetro (D)	7,00	(m)
	Altura del manto (H_m)	4,88	(m)
	Altura del nivel del líquido de diseño (H_L)	4,19	(m)
Cono (techo)	Diámetro (D)	7,00	(m)
	Altura (H_t)	0,60	(m)
	Ángulo	9,73	(°)

Tabla 4.3: Resumen del diseño geométrico del biodigestor.

La tabla 4.4 representa las capacidades volumétricas del diseño del biodigestor en función de su geometría y las cantidades de biomasa generadas y estudiadas en el capítulo III.

Volumen	Valor	Unidad
Volumen cilindro	187,80	(m ³)
Volumen cono	7,70	(m ³)
Volumen total	195,50	(m ³)
Volumen neto de trabajo	161,25	(m ³)
Volumen mínimo operativo	6,45	(m ³)

Tabla 4.4: Resumen de las capacidades volumétricas del biodigestor.

El volumen neto de trabajo fue calculado en base a la carga volumétrica aportado por los desechos de purín generados en 25 días (TR). El volumen mínimo operativo

fue calculado en base a la cantidad diaria de purín generado en el plantel lechero. El volumen total calculado inicialmente fue de 193,5 (m³), pero por razones constructivas, este parámetro toma finalmente un valor de **195,5 (m³)**.

4.3.1 Cálculo del espesor de placa del manto del estanque

Se consideró una altura de 4,88 (m) del cuerpo cilíndrico del biodigestor, debido a la disponibilidad de planchas de acero en el mercado con un ancho de 2,44 (m) x 12 (m), tal como se muestra en la figura 4.5. Esto implica minimizar el número de anillos en el diseño del manto a dos. Según la normativa API-650, en su apartado 3.3.2 el dimensionamiento de la tolerancia a la corrosión viene bajo criterio de quien diseña.

MEDIDAS ESPECIALES A PEDIDO

CONSULTE POR SU PROYECTO

APLICACIONES

- Construcción de plataformas
- Equipamiento de transporte
- Circulación
- Estanques y calderas
- Obras civiles
- Estructuras en general

Planchas Gruesas	
Espesor mm	Peso Teórico kg/m ²
6,0	48,0
8,0	64,0
10,0	80,0
12,0	96,0
14,0	112,0
16,0	128,0
18,0	144,0
20,0	160,0
22,0	176,0
25,0	200,0
28,0	224,0
30,0	240,0
32,0	256,0
35,0	280,0
38,0	304,0
40,0	320,0
45,0	360,0
50,0	400,0
63,0	504,0
75,0	600,0
100,0	800,0

ASTM A - 36, A - 572 gr 50.
Anchos: 1.000; 2.000; 2.440; 3.000 mm.
Largos: 6 y 12 m y largos especiales.

SACK
Todo un mundo en acero

Figura 4.5: Disponibilidad de dimensiones de planchas de acero ASTM A-36 para el mercado nacional.

A partir de la bibliografía entregada en el curso “ICM-871 Diseño de Equipos de Procesos”, se da una definición del tipo de soporte que debe poseer un techo en función de su diámetro y en consecuencia, en función del diámetro del estanque. Lo anterior se aprecia en la tabla 4.5 que entrega una definición de soportes para techos en función del diámetro del estanque.

Rango de diámetro (m)	Tipo de apoyo
$D < 7,2$	Sin apoyo (Techo auto soportante)
$7,2 < D < 14,4$	Con columna central
$14,4 < D$	Múltiples columnas

Tabla 4.5: Tipo de apoyo del techo en función del diámetro del estanque.

Según lo expresado en la tabla 4.5, se diseña el estanque bajo un diámetro de 7 (m) de esta forma, se evita la incorporación de una columna central, siendo así, el diseño del techo fijo y auto soportado.

4.3.1.1 Método de un pie o 1-foot method

La tabla 4.6, establece los espesores mínimos aceptados a partir del diámetro del estanque.

Diámetro nominal del estanque (m)	Espesor mínimo de la plancha (mm)
$D < 15$	5
$15 < D < 36$	6
$36 < D < 60$	8
$60 < D$	10

Tabla 4.6: Espesor mínimo en función del diámetro [19].

Si bien se considera un espesor mínimo en función del diámetro, la normativa API-650 también incluye métodos de cálculo de espesores en función de las propiedades mecánicas del material de diseño. En este caso, se obtiene el espesor de placa del manto utilizando el método de un pie (1-foot method) descrito en el apartado 3.6.3 de la norma API-650. Las ecuaciones para el cálculo de los espesores de placa, se obtienen por este método, donde la condición principal en su uso es que se debe usar para estanques que tengan menos de 61 (m) de diámetro nominal.

Para tal efecto, se procede según las siguientes ecuaciones [19]:

$$t_d = \frac{4,9D(H - 0,3)G}{S_d} + CA \text{ (mm)} \quad [\text{Ec. 4.1}]$$

$$t_t = \frac{4,9D(H - 0,3)}{S_t} \text{ (mm)} \quad [\text{Ec. 4.2}]$$

Donde:

t_d = Espesor por condición de diseño (mm).

t_t = Espesor por prueba hidrostática (mm).

H = Nivel de diseño del líquido (m). (Altura desde el fondo del anillo en estudio hasta el nivel superior del manto incluyendo el perfil de coronamiento).

D = Diámetro normal del estanque (m).

G = Densidad específica.

S_d = Esfuerzo admisible en condición de diseño (MPa).

S_t = Esfuerzo admisible en condición de prueba hidrostática (MPa).

CA = Corrosión admisible para el manto del estanque 1/8" (3,18 mm).

Los valores de S_d y S_t se obtienen a partir de la tabla 4.7.

Características mecánicas del material (ASTM A-36)	Valor	Unidad
Tensión máxima admisible de diseño (S_d)	159,85	(MPa)
Tensión hidrostática máxima admisible (S_t)	171,62	(MPa)
Tensión de fluencia (S_y)	248,11	(MPa)

Tabla 4.7: Propiedades mecánicas acero ASTM A-36 [19] Tabla 5-2b.

Reemplazando valores y desarrollando la ecuación 4.1 para el espesor de diseño del primer anillo resulta:

$$t_d = \frac{4,9 \cdot 7 \cdot (4,88 - 0,3) \cdot 1,02}{159,85} + 3,18 \text{ (mm)}$$

Reemplazando valores y desarrollando la ecuación 4.2 para el espesor por prueba hidrostática del primer anillo resulta:

$$t_t = \frac{4,9 \cdot 7 \cdot (4,88 - 0,3)}{171,62} \text{ (mm)}$$

Por lo tanto, el valor de t_d y t_t son **4,18 (mm)** y **0,92 (mm)** respectivamente.

Reemplazando valores y desarrollando la ecuación 4.1 para el espesor de diseño del segundo anillo resulta:

$$t_d = \frac{4,9 \cdot 7 \cdot (2,44 - 0,3) \cdot 1,02}{159,85} + 3,18 \text{ (mm)}$$

Reemplazando valores y desarrollando la ecuación 4.2 para el espesor por prueba hidrostática del segundo anillo resulta:

$$t_t = \frac{4,9 \cdot 7 \cdot (2,44 - 0,3)}{171,62} \text{ (mm)}$$

Por lo tanto, el valor de t_d y t_t son **3,65 (mm)** y **0,43 (mm)** respectivamente.

La normativa API-650 establece elegir el mayor valor entre t_d y t_t para el diseño del manto del estanque para cada anillo, aunque lo anterior queda condicionado a la disponibilidad de espesores comerciales, el que debe ser mayor o igual al valor obtenido de t_d y t_t en cada anillo analizado.

Los valores obtenidos mediante el método de 1-pie se detallan a continuación en la tabla 4.8.

N° Anillo	Espesor de prueba	Espesor sin corrosión	Espesor de diseño	Espesor comercial
	t_t (mm)	t_d (mm)	t_d (mm)	(mm)
1	0,92	1	4,18	6
2	0,43	0,47	3,65	6

Tabla 4.8: Resumen de los espesores del manto.

De lo anterior, se establece que el espesor de placa del manto para ambos anillos y en consideración de los espesores comerciales, toma un valor igual a **6 (mm)**.

4.3.2 Cálculo del espesor de placa del fondo del estanque

Para obtener el espesor de la placa del fondo del estanque, se procede a calcular el esfuerzo admisible en condición de prueba hidrostática para el primer anillo del cuerpo del estanque.

Para tal efecto se procede según la ecuación 4.2. Reemplazando valores se tiene:

$$S_t = \frac{4,9 \cdot 7 \cdot (4,88 - 0,3)}{6} \text{ (MPa)}$$

Por lo tanto, el esfuerzo admisible por prueba hidrostática (S_t) toma un valor de **26,18 (MPa)**.

La tabla 4.9, representa los rangos de la presión producida en el primer anillo del manto del estanque, los que se contrastan al valor de 26,18 (MPa). Luego que el valor anterior es posicionado en un rango, se establece el rango en que se sitúa el espesor de placa del manto del primer anillo del estanque de valor igual a 6(mm), de esta forma, la intersección de los dos valores entrega el espesor de placa del fondo.

Espesor de la placa del manto del primer anillo (mm)	Presión en el primer anillo del manto del estanque (MPa)			
	< 190	< 210	< 220	< 250
t < 19	6	6	7	9
19 < t < 25	6	7	10	11
25 < t < 32	6	9	12	14
32 < t < 40	8	11	14	17
40 < t < 45	9	13	16	19

Tabla 4.9: Espesor placa del fondo (mm) en función del esfuerzo permisible por prueba hidrostática y espesor de placa primer anillo del manto [19] Tabla 3-1.

El espesor de la plancha toma, por lo tanto, un valor de **6 (mm)** ya que tanto el valor del espesor de la placa del manto como el esfuerzo admisible por prueba hidrostática en el primer anillo del manto son menores a 19 (mm) y 190 (MPa) respectivamente.

Si se suman **2 (mm)** por concepto de tolerancia a la corrosión (CA), entonces el espesor de la placa del fondo del estanque toma un valor final de **8 (mm)**.

4.3.3 Cálculo del espesor de placa del techo del estanque

A partir de la normativa API-650 en su apartado 3.10.5, el tipo de techo considerado para el diseño es del tipo cónico, fijo y auto soportado. Esto implica que no necesita de una columna central de soporte para el techo ya que este está apoyado únicamente en la periferia del estanque por medio de un anillo de coronamiento.

Para el diseño de este tipo de techo, se debe cumplir que el ángulo conformado entre el radio y la altura del techo debe estar comprendido entre un rango de 9,5° y 37° es decir $9,5^\circ < \alpha < 37^\circ$ además, la presión producida por el peso propio del techo no debe ser inferior a 1,2 (kPa).

Por lo tanto, si se cumple lo anterior, el espesor del techo seguirá la siguiente ecuación [19]:

$$t_t = \frac{D}{4,8 \cdot \text{sen } \alpha} \text{ (mm)} \quad [\text{Ec. 4.3}]$$

Donde:

t_t = Espesor nominal placa del techo (mm).

D= Diámetro nominal del estanque (m).

α = Ángulo del techo cónico (°).

Según la normativa API-650, el valor de t_t debe ser superior a 5 (mm) pero no debe exceder los 12,5 (mm) de espesor.

Desarrollando la ecuación 4.3 y utilizando los datos obtenidos desde la tabla 4.3, resulta:

$$t_t = \frac{7}{4,8 \cdot \text{sen } 9,73} \text{ (mm)}$$

Por lo tanto, el valor de t_t es igual a **8,63 (mm)**.

El valor de t_t es válido siempre y cuando la suma de las cargas vivas (CV) y cargas muertas (CM) no sea superior a los 220 (kgf/m²), de lo contrario, se debe multiplicar por un factor de corrección (F) detallado según la siguiente ecuación [19]:

$$F = \sqrt{\frac{CV + CM}{0,022}} \quad [\text{Ec. 4.4}]$$

Para el caso de la tolerancia a la corrosión (CA), la normativa API-650 en su apartado 3.3.2 deja a criterio de quien diseña dar el valor de su dimensionamiento.

Se entiende por carga muerta, toda aquella producida por los accesorios permanentemente unidos al techo del reactor. Dentro de las cargas muertas actuando en el biodigestor se encuentran:

- 1) Carga producto del peso de las planchas del techo cónico
- 2) Boquilla salida del biogás
- 3) Cañerías
- 4) Manhole.

Se entiende por cargas vivas, todas aquellas que son variables durante un ciclo. Dentro de las cargas vivas consideradas en el presente estudio se encuentran:

- 1) Carga por viento
- 2) Carga por persona.

Para el cálculo de la carga producto de la acción del peso de las planchas, se considerará una corrosión admisible (CA) igual a **1,37(mm)** lo que sumado al valor t_c igual a **8,63 (mm)** obtenido desde la ecuación 4.3 se logra finalmente un espesor de plancha de **10 (mm)**.

Con la finalidad de conseguir el valor del peso de las planchas del techo cónico, se procederá al cálculo del área del techo tipo cono según la siguiente ecuación [19]:

$$A = \rho \cdot r \cdot \pi \text{ (m}^2\text{)} \quad [\text{Ec. 4.5}]$$

Donde:

A = Área del techo tipo cono (m²).

ρ = Hipotenusa formada por el radio y altura del cono (m).

r = Radio del techo (m) (ver figura 4.4).

Reemplazando valores en la ecuación 4.5 resulta:

$$A = 3,55 \cdot 3,5 \cdot \pi \text{ (m}^2\text{)}$$

De lo anterior, se obtiene que el área de la superficie del techo tipo cono es igual a **39,05 (m²)**.

La tabla 4.10 se construye a partir del apartado 3.11.1 de la normativa API-650 [19]. Esta detalla la presión del viento para distintas configuraciones superficiales. Esta presión de viento se basa en una velocidad igual a 160 (km/h) determinada por la normativa aunque para velocidades mayores o menores a esta, se debe utilizar el siguiente factor de corrección [19]:

$$f = \left(\frac{V}{160} \right)^2 \quad [\text{Ec. 4.6}]$$

Donde:

f = Factor de corrección.

V = Velocidad a utilizar (km/h).

Durante agosto del año 2015, se estableció una alerta para la Región Metropolitana por parte de la Dirección Meteorológica de Chile. En esta alerta, se esperaban vientos de entre 60 a 80 (km/h), con ráfagas que podrían alcanzar inclusive los 100 (km/h). En base a esta información y según el criterio de quien diseña, se establece aplicar un factor de seguridad igual a 1,5 a las ráfagas de viento máximas posibles en dicho periodo, luego, se establece una velocidad límite igual a los 150 (km/h) para el diseño del biodigestor.

Reemplazando este valor crítico de velocidad y para obtener el factor de corrección desde la ecuación 4.6 resulta:

$$f = \left(\frac{150}{160} \right)^2$$

Por lo tanto, el factor de corrección será igual a **0,88**. Los valores de presión del viento se detallan en la tabla 4.10.

Tipo superficie	Presión [a 160 (km/h)]	Presión corregida [a 150 (km/h)]	
	(kPa)	(kPa)	(kgf/m ²)
Cilíndrica	0,86	0,76	76
Cónica	0,72	0,63	63
Plana	1,4	1,23	123

Tabla 4.10: Presión del viento a 160 y 150 (km/h) sobre distintas superficies.

En conclusión, la presión del viento que actúa sobre el techo del estanque toma un valor igual a **63 (kgf/m²)**.

El peso del techo del estanque (W_R) producto de las planchas de acero, se calcula en base a la siguiente ecuación [19]:

$$W_R = \pi \cdot \frac{D}{2} \cdot \frac{t}{1.000} \cdot \frac{D}{2 \cdot \cos\alpha} \cdot \gamma \text{ (kgf)} \quad [\text{Ec. 4.7}]$$

Donde:

W_R = Peso del techo (kgf).

D= Diámetro del techo (m).

t= Espesor de la plancha (mm).

γ = Densidad del acero 7.850 (kgf/m³).

Reemplazando valores en la ecuación 4.7 resulta:

$$W_R = \pi \cdot \frac{7}{2} \cdot \frac{10}{1.000} \cdot \frac{7}{2 \cdot \cos 9,73} \cdot 7.850 \text{ (kgf)}$$

Por lo tanto, el peso del techo (W_R) es igual a **3.065,13 (kgf)**.

Los resultados de los cálculos, tanto de las cargas vivas y cargas muertas, se resumen en la tabla 4.11.

Área del techo (A)		39,05	(m ²)
Cargas muertas	Peso de planchas por unidad de área	78,49	(kgf/m ²)
	Otros	25,61	(kgf/m ²)
Cargas vivas	Presión del viento en superficie cónica	63	(kgf/m ²)
	Peso hombres por unidad de área	5,12	(kgf/m ²)
Peso del techo por unidad de área < 220 (kgf/m ²)		172,22	(Kgf/m ²)

Tabla 4.11: Resumen de las cargas vivas y muertas.

Como la suma de las cargas vivas y cargas muertas no excede el valor de 220 (kgf/m²), entonces el espesor de la placa de **10 (mm)** es válido.

4.3.4 Cálculo del anillo de coronamiento

El anillo de coronamiento es aquel en donde se apoya el techo en la parte superior del manto del estanque. El área de la sección transversal para el perfil de coronamiento, en donde descansa el techo cónico auto soportado, presenta las características mostradas en la figura 4.6.

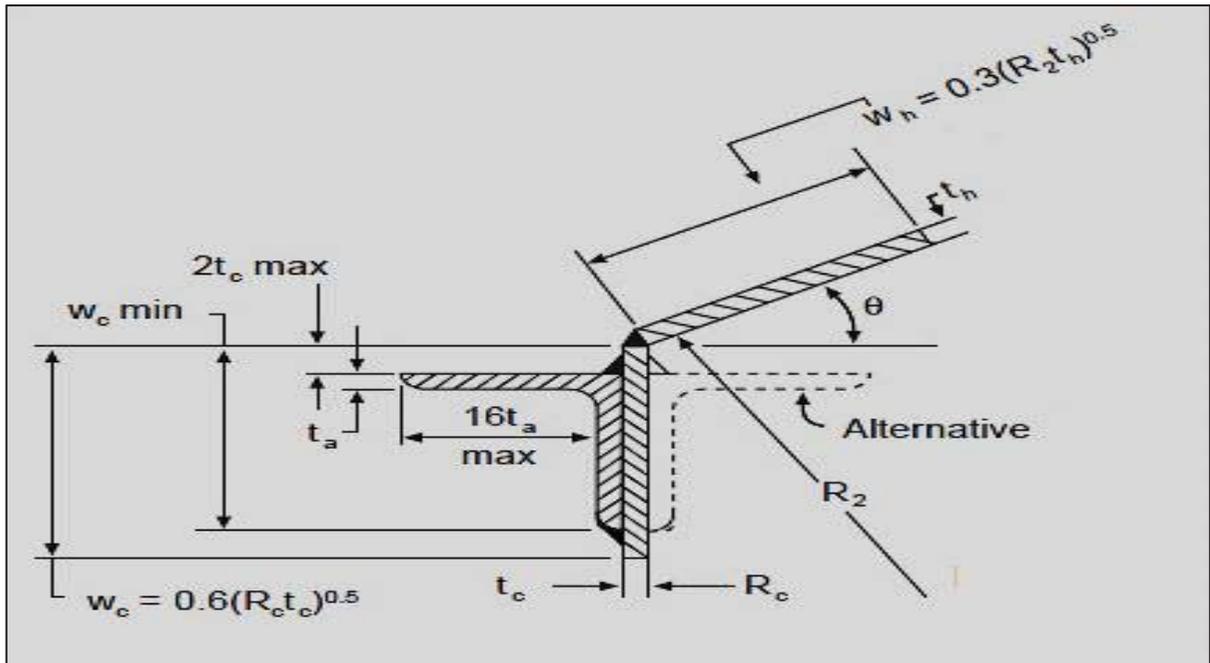


Figura 4.6: Configuración anillo de coronamiento para el estanque [19] Figura F-2.

Donde:

t_a = Espesor del perfil.

t_b = Espesor de la barra.

t_c = Espesor de la placa del manto aumentado.

t_h = Espesor de la placa del techo.

t_s = Espesor de la placa del manto aumentada.

w_c = Ancho máximo de la pared involucrada.

w_h = Ancho máximo del techo involucrado.

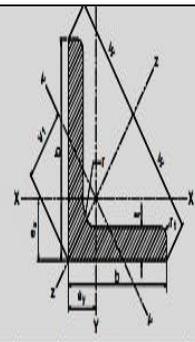
R_c = Radio interno del estanque.

R_2 = Longitud de la normal del techo, medido desde el centro del eje vertical del estanque.

Según la normativa API-650 en su apartado 3.1.5.9 para estanques con un diámetro menor o igual a 11 (m), las dimensiones mínimas del perfil de coronamiento para la unión ángulo-techo serán de L 2 x 2 x 3/16 (in) o 51 x 51 x 4.8 (mm), cuya área de sección transversal es igual a 4,72 (cm²), tal como se muestra en la figura 4.7.

Designación del perfil	Designación Comercial	Dimensiones		Radios de acuerdo		Relación	Ag	Peso	Distancias al centro de gravedad			X-X = Y-Y			v-v			z-z		J	Cw
		b	t	r	r ₁				e _x	e _y	w	v _i	l _x = l _y	S _x = S _y	r _x = r _y	l _v	S _v	l _v	l _z		
		mm	mm	mm	mm	cm ²	Kg/m	cm												cm	cm
L 51 x 51 x 3,2*	L 2 x 2 x 1/8	50,8	3,2			15,9	3,21	2,52	1,34	3,16	1,89	7,76	2,07	1,55	2,95	1,56	0,96	12,58	1,98	0,107	0,217
x 4,8*	x 3/16	50,8	4,8			10,6	4,72	3,7	1,42	3,61	2	11,26	3,06	1,54	4,41	2,2	0,97	18,12	1,96	0,357	0,697
x 6,4*	x 1/4	50,8	6,4	7	3,5	7,9	6,17	4,84	1,49	3,61	2,1	14,45	4,00	1,53	5,8	2,77	0,97	23,10	1,93	0,832	1,571
x 7,9	x 5/16	50,8	7,9			6,4	7,49	5,88	1,54	3,61	2,18	17,19	4,83	1,52	7,06	3,24	0,97	27,32	1,91	1,540	2,817
x 9,5	x 3/8	50,8	9,5			5,3	8,84	6,94	1,60	3,61	2,26	19,87	5,68	1,50	8,38	3,7	0,97	31,35	1,88	2,632	4,651

Perfiles Angulo
según
IRAM-IAS
U 500-558



Ag = Área bruta de la sección transversal.
I = Momento de Inercia de la sección respecto de los ejes principales.
 $r = \sqrt{I/A}$ Radio de giro.
S = Módulo resistente elástico de la sección.
Q = Momento estático de media sección.
Z = Módulo plástico de la sección.
J = Módulo de torsión.
Cw = Módulo de alabeo.

Figura 4.7: Detalles para un perfil L de alas iguales.

El cálculo para la obtención del área de coronamiento se obtiene según la siguiente ecuación [19]:

$$S = \frac{D^2}{0,432 \cdot \sin \alpha} \text{ (mm}^2\text{)} \quad [\text{Ec. 4.8}]$$

Donde:

S = Área de la sección transversal (mm²).

D = Diámetro del asiento del cono (m).

α = Ángulo con respecto a la horizontal.

Reemplazando valores en la ecuación 4.8 resulta:

$$S = \frac{7^2}{0,432 \cdot \sin 9,73} \text{ (mm}^2\text{)}$$

Por lo tanto, el área de la sección transversal del perfil de coronamiento toma un valor igual a **671,14 (mm²)** o **6,71 (cm²)** valor mayor al mínimo de **4,72 (cm²)**.

De la figura 4.7 se elige un perfil de **51x51x7,9 (mm)** cuya área es igual a **7,49 (cm²)** valor que satisface lo requerido por la ecuación 4.8.

4.4 Soldadura

4.4.1 Tipo de electrodo para la soldadura

De acuerdo a la normativa API-650 en su apartado 2.8, la soldadura de materiales con una resistencia a la tracción inferior a 550 (MPa) se realiza con electrodos para soldadura por arco manual.

La normativa debe ser de acuerdo a la clasificación AWS serie E60 y E70 o equivalente (convenientes para las características eléctricas, la posición de la soldadura y otras condiciones de uso). Su selección debe ser de acuerdo con el diseño del tanque.

La resistencia a la tracción del acero A-36 se presenta en una rango inferior a los 550 (MPa) y superior a los 400 (MPa) por lo cual este tipo de electrodo cumple lo establecido por la normativa.

4.4.2 Soldadura para el manto

4.4.2.1 Soldadura vertical

El tipo de configuración seleccionado para la soldadura vertical a utilizar en el manto es del tipo junta a tope con ranura rectangular (configuración d) según lo dispuesto en la figura 4.8.

Según lo dispuesto en la normativa API-650 [19] en su apartado 3.1.5.2, la soldadura o junta vertical debe ser de penetración y fusión completa, lo cual se logra con soldadura doble, lo que implica que se obtenga la misma calidad del material depositado, tanto en el interior como en el exterior de las partes soldadas. De esta

forma, se cumplen los requerimientos del procedimiento por soldadura. Las soldaduras verticales, deben ser paralelas entre sí, con una distancia mínima de 5 veces el espesor de la plancha.

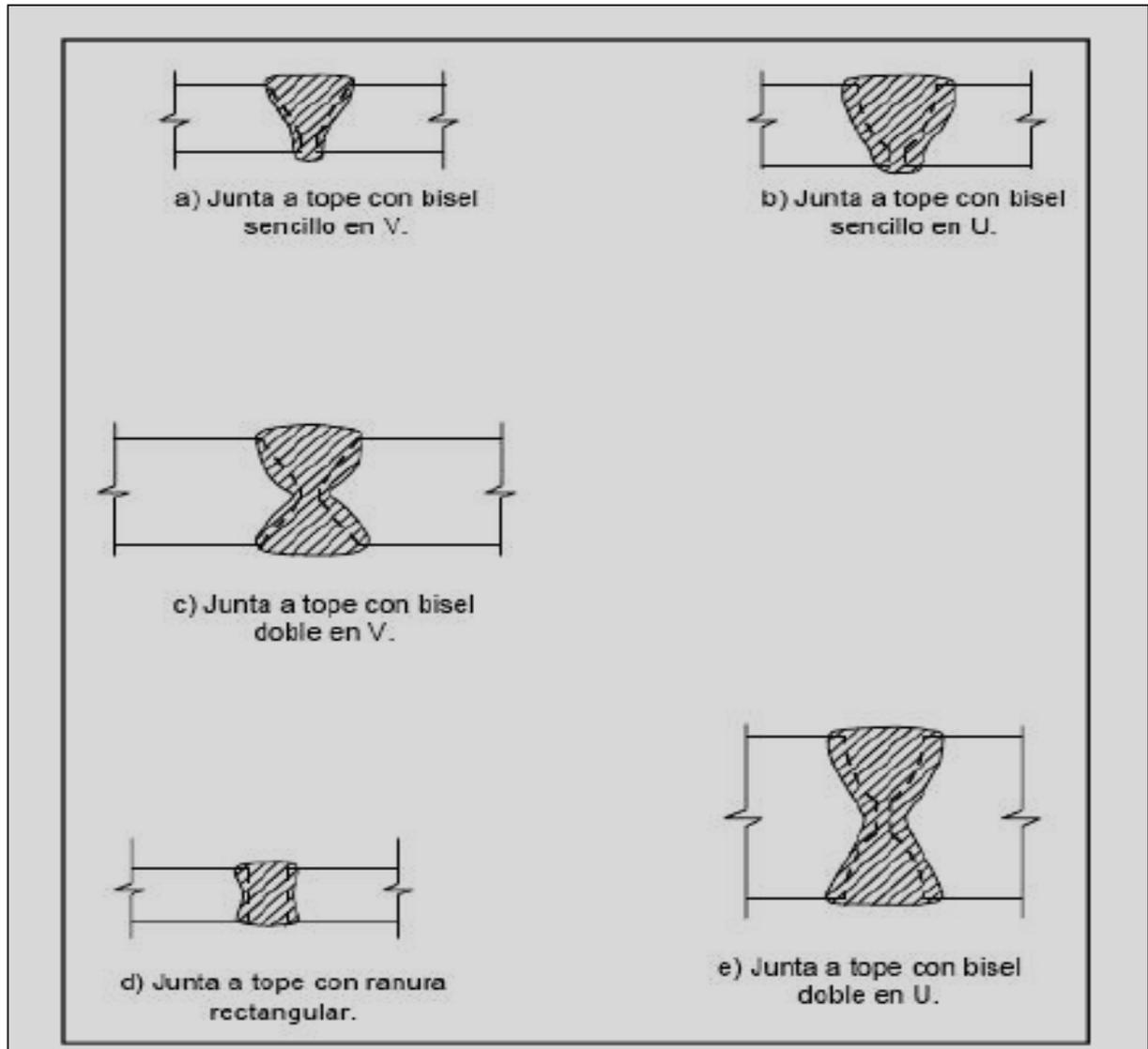


Figura 4.8: Configuraciones de soldaduras para juntas verticales [19] Figura 3-

1.

Las juntas verticales en anillos adyacentes no deben ser alineadas y deben tener como mínimo un desfase de 5 veces el espesor de la lámina del anillo más grueso que se encuentre en la junta. La soldadura tipo ranura rectangular, según la normativa AWS, se detalla en lo expuesto en la figura 4.9.

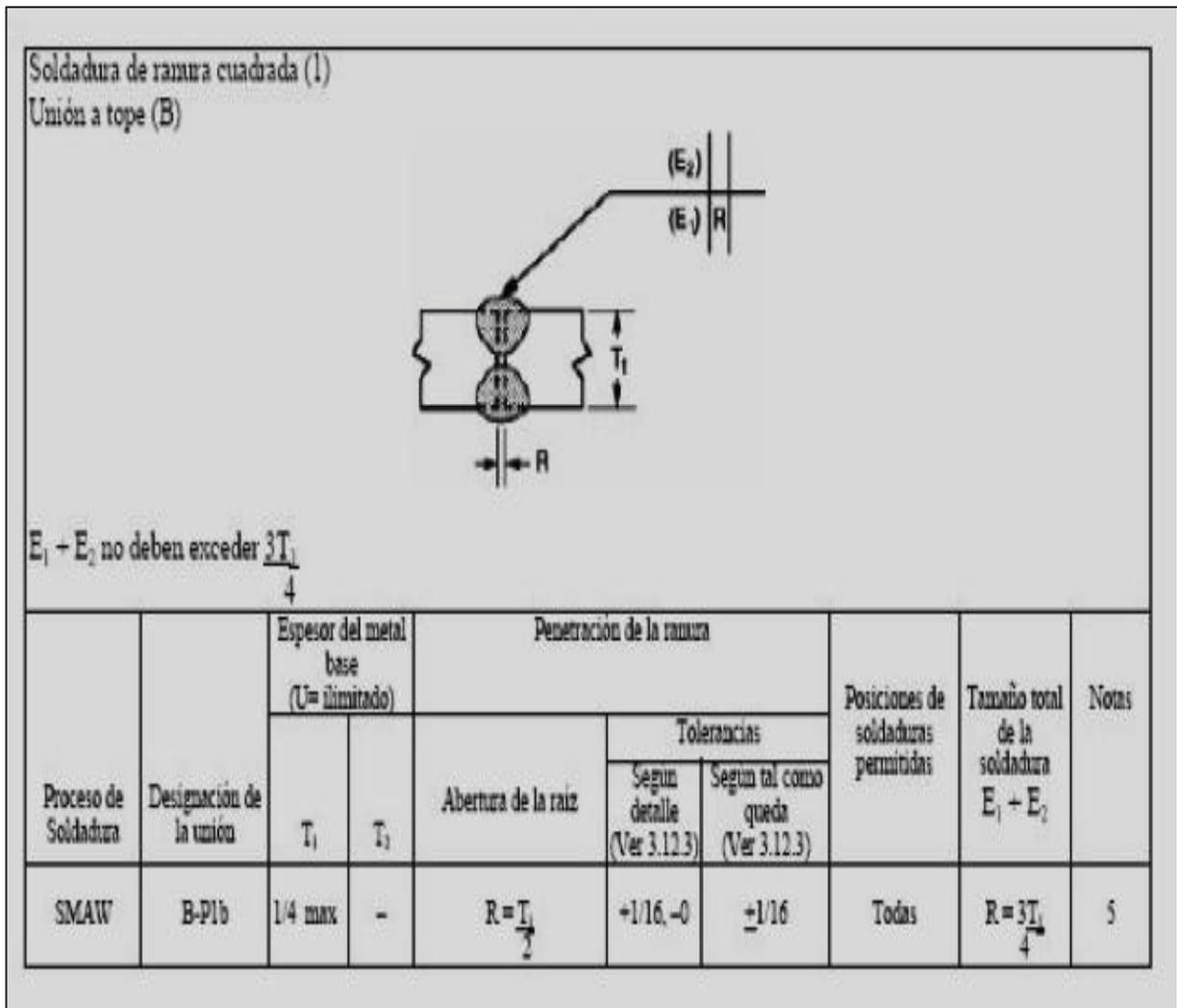


Figura 4.9: Soldadura de ranura cuadrada [20].

4.4.2.2 Soldadura horizontal

Según lo dispuesto en la normativa API-650, en su apartado 3.1.5.3, el tipo de soldadura a utilizar debe ser de penetración y fusión completa, lo cual se logra con soldadura doble.

Esto implica que se obtenga la misma calidad del material depositado, tanto en el interior como en el exterior de las partes soldadas, de esta forma, se cumple con los requerimientos del procedimiento por soldadura, excepto la que se realiza entre el ángulo de coronamiento y el cuerpo, la cual puede ser unida por doble soldadura a traslape, cumplimiento con el procedimiento de soldadura.

El tipo de configuración seleccionado para la soldadura horizontal a utilizar en el manto, es del tipo junta rectangular de penetración completa, según lo dispuesto en la figura 4.10 y detallado en la figura 4.9.

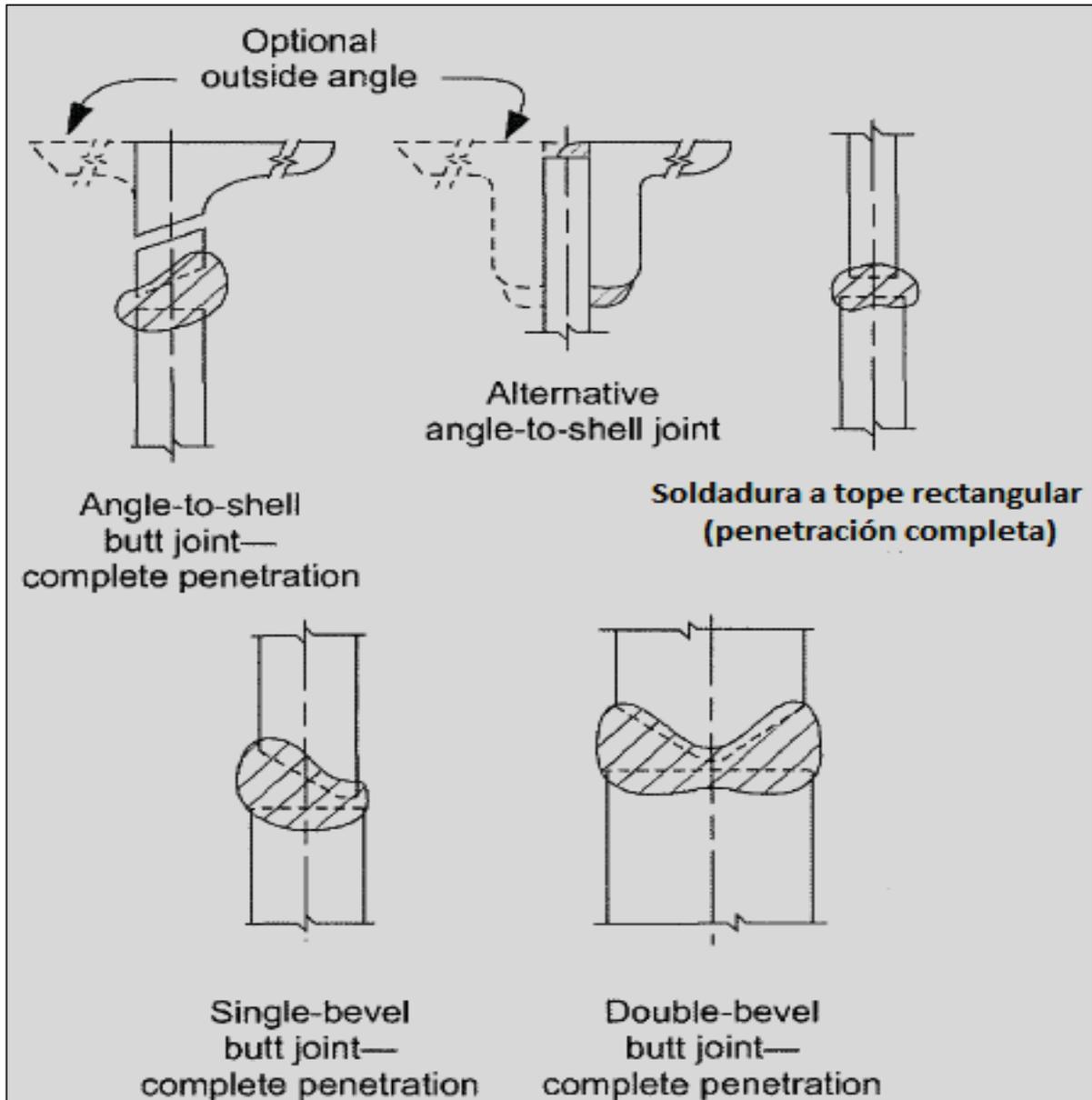


Figura 4.10: Configuraciones de soldadura horizontal [19] Figura 3-2.

4.4.3 Soldadura para el fondo del biodigestor

Para fines de diseño, el tipo de soldadura a utilizar será de traslape y filete completo de soldadura simple tal como se muestra en la figura 4.11.

El traslape tendrá un mínimo de **32 (mm)** de unión. Los bordes de las láminas deben ser razonablemente rectos y cortados a escuadra. Los traslapes triples deberán estar al menos a una distancia de **300 (mm)** entre las placas soldadas. Las láminas requieren soldadura solo por un lado, con un filete continuo en todas las juntas del fondo. Lo anterior según recomendación de la norma API-650.

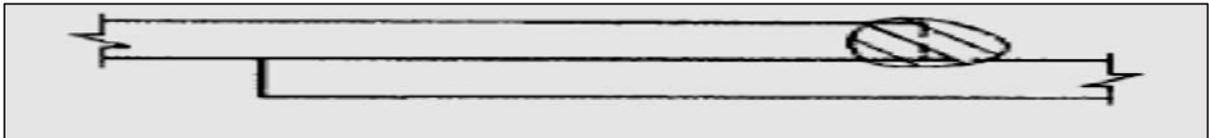


Figura 4.11: Soldadura de traslape de filete completo de soldadura simple [19] Figura 3-3A.

4.4.4 Soldadura unión manto-fondo

La normativa considera que para espesores inferiores a 12,5 (mm), la unión entre el fondo y el canto de las placas del cuerpo tendrá que ser hecha mediante un filete continuo de soldadura y que esta descansa en ambos lados de la placa del cuerpo.

La dimensión de cada cordón, sin tomar en cuenta la corrosión permisible, no será mayor a 12,5 (mm) y no menor al espesor nominal de la más delgada de las placas a unir. Una guía a considerar es la representada en la tabla 4.12.

Espesor nominal placa del manto (mm)	Mínimo tamaño filete de soldadura (mm)
$e < 5$	5
$5 < e < 20$	6
$20 < e < 32$	8
$32 < e < 45$	10

Tabla 4.12: Tamaño mínimo de filete en función del espesor nominal de la placa [19].

Como el espesor de placa del fondo del estanque es de **8 (mm)**, el mínimo tamaño del filete de soldadura debe ser de **6 (mm)**.

4.4.5 Soldadura de techo y perfil de coronamiento

Las placas del techo deberán ser soldadas a traslape por el lado superior con un filete continuo igual al espesor de las placas.

Las placas del techo, deberán ser soldadas al perfil de coronamiento del estanque con un filete continuo por el lado superior únicamente y el tamaño del filete deberá ser igual al espesor más delgado. Las secciones que conformen el perfil de coronamiento para techos autosoportados estarán unidas por cordones de soldadura de doble penetración y fusión completa. La figura 4.12 representa las configuraciones anteriormente expuestas.

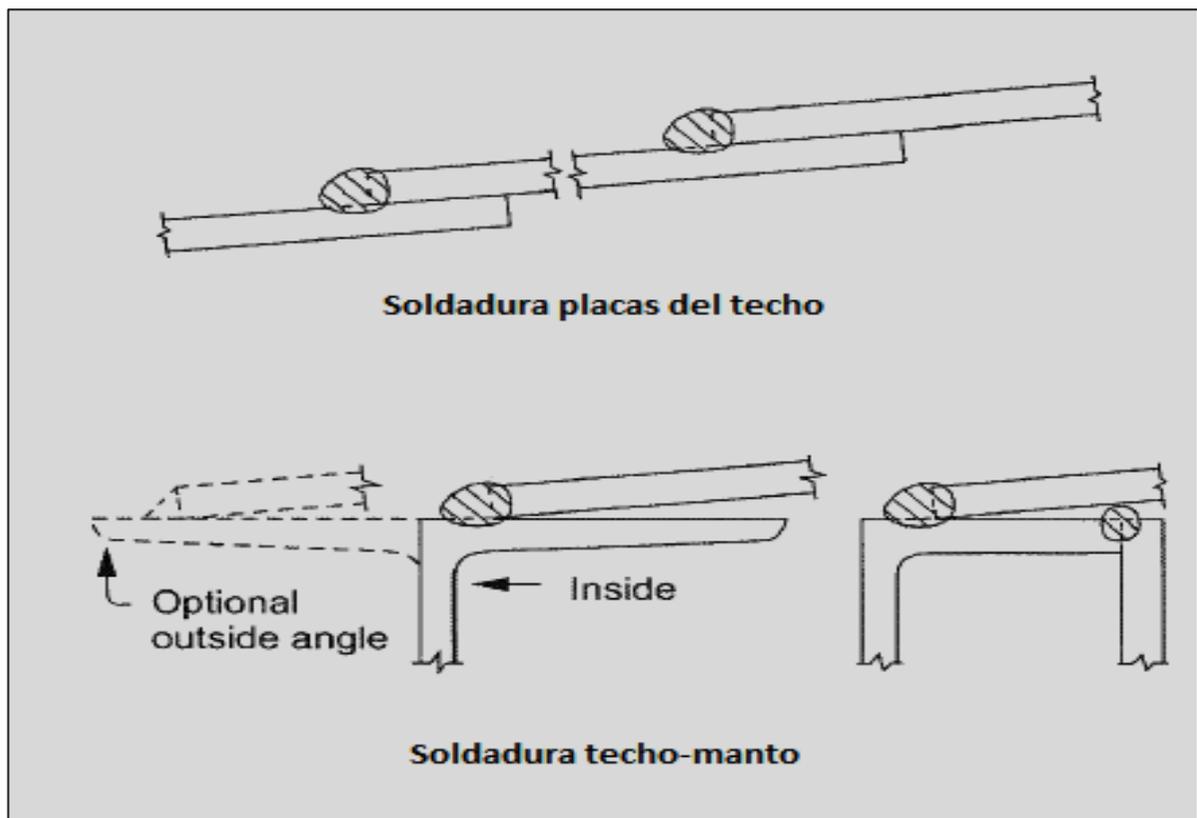


Figura 4.12: Soldaduras para el techo y unión techo-manto [19] Figura 3-3A.

4.5 Análisis de viento

Un análisis de viento nos indica la estabilidad del estanque a la acción del viento y si existe la necesidad de anclaje.

El momento de volteo (M_V) provocado en el estanque no anclado por la acción del viento, no debe superar el momento resistente al viento (M_R) del estanque por acción de su peso.

El valor del momento resistente se calcula según la siguiente ecuación [19]:

$$M_R = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{W_{T*} \cdot D}{2} \right) (N \cdot m) \quad [\text{Ec. 4.9}]$$

Donde:

M_R = Momento resistente al viento ($N \cdot m$).

W_{T*} = Peso muerto del estanque sin considerar corrosión (N).

D = Diámetro del estanque (m).

El valor del momento de volteo se calcula según la siguiente ecuación [19]:

$$M_V = F_1 \cdot \frac{H_t}{2} + F_2 \cdot \left(H_t + \frac{H_{\text{Cono}}}{3} \right) (N \cdot m) \quad [\text{Ec. 4.10}]$$

Donde:

M_V = Momento de volteo ($N \cdot m$).

F_1 = Fuerza aplicada en el cilindro (N).

F_2 = Fuerza aplicada en el techo cónico (N).

H_t = Altura del cilindro + cono (m).

H_{Cono} = Altura del cono (m).

Para efectuar los cálculos, es necesario establecer los pesos sin corrosión admisible tanto del manto (W_{M*}), del techo (W_{R*}) como del fondo del estanque (W_{b*}).

Los espesores de placa sin corrosión admisible son 2,82(mm), 8,63(mm), 6(mm) para el manto (W_{M*}), techo (W_{R*}) y fondo del estanque (W_{b*}) respectivamente.

Para el cálculo del manto, sin considerar la corrosión, se procede según la siguiente ecuación [19]:

$$W_{M*} = \pi \cdot D \cdot \gamma \cdot h \cdot [(S1 - CA) \cdot 0,001 + (S2 - CA) \cdot 0,001] \text{ (kgf)} \quad [\text{Ec. 4.11}]$$

Donde:

W_{M*} = Peso del manto del estanque sin corrosión admisible (kgf).

D= Diámetro del estanque (m).

γ =Densidad del acero 7.850 (kgf/m³).

h= Altura del anillo (m).

S1 y S2= Espesor de placa de cada anillo (mm).

CA= Corrosión admisible del manto (mm).

Reemplazando valores en la ecuación 4.11 resulta:

$$W_{M*} = \pi \cdot 7,0 \cdot 7.850 \cdot 2,44 \cdot [(6 - 3,18) \cdot 0,001 + (6 - 3,18) \cdot 0,001] \text{ (kgf)}$$

Por lo tanto, el peso del manto sin corrosión admisible (W_{M*}) toma un valor de **2.375,67 (kgf) o 23.756,7 (N)**.

El peso del techo sin considerar la corrosión admisible se calcula según la ecuación 4.7, reemplazando valores resulta:

$$W_{R*} = \pi \cdot \frac{7}{2} \cdot \frac{(10 - 1,37)}{1.000} \cdot \frac{7}{2 \cdot \cos 9,73} \cdot 7.850 \text{ (kgf)}$$

Por lo tanto, el peso del techo sin corrosión admisible (W_{R*}) toma finalmente un valor de **2.645,2 (kgf) o 26.452 (N)**.

El peso del fondo del estanque sin considerar la corrosión admisible (W_{F*}) se calcula según la siguiente ecuación [19]:

$$W_{F*} = \pi \cdot r^2 \cdot \frac{(t - CA)}{1.000} \cdot \gamma \text{ (kgf)} \quad [\text{ec. 4.12}]$$

Donde:

r = Radio del estanque (m).

t = Espesor de placa (mm).

CA= Corrosión admisible (mm).

γ = Densidad del acero 7.850 (kgf/m³).

Reemplazando valores en la ecuación 4.12 resulta:

$$W_{F*} = \pi \cdot 3,5^2 \cdot \frac{(8 - 2)}{1.000} \cdot 7.850 \text{ (kgf)}$$

El peso del fondo del estanque sin corrosión admisible (W_{F*}) toma un valor de **1.812,62 (kgf) o 18.126,2 (N)**.

Por lo tanto, el peso muerto del estanque W_{T*} sin considerar la corrosión admisible se obtiene según la siguiente ecuación [19]:

$$W_{T*} = W_{M*} + W_{R*} + W_{F*} \text{ (kgf)} \quad [\text{Ec. 4.13}]$$

Reemplazando valores en la ecuación 4.13 resulta:

$$W_{T*} = 2.375,67 + 2.645,2 + 1.812,62 \text{ (kgf)}$$

Por lo tanto, el valor del peso muerto sin corrosión admisible asciende a **6.833,49(kgf) o 68.334,9 (N)**.

Con lo anterior y reemplazando en la ecuación 4.9 los valores para el cálculo del momento resistente resulta:

$$M_R = \frac{2}{3} \cdot \left(\frac{68.334,9 \cdot 7}{2} \right) (\text{N} \cdot \text{m})$$

Por lo tanto, el valor del momento resistente al viento (M_R) es igual a **159.448,1 (N·m)**.

Para el cálculo del momento de volteo (M_V) es necesario primero calcular la fuerza aplicada en el cilindro por acción del viento. Si se considera el área expuesta del cilindro, como un rectángulo de altura 4,88 (m) y una base de 7 (m), el área expuesta toma un valor de **34,16 (m²)**. Análogamente, si se considera el área expuesta del cono del techo como un triángulo isósceles de base 7 (m) y altura 0,6 (m), el área expuesta toma un valor de **2,1 (m²)**.

A partir de la tabla 4.10 se tiene que el factor de presión para una superficie cilíndrica a 150 (km/h) es de 760 (N/m²). Si este último valor se multiplica por el área expuesta del cilindro, la fuerza toma un valor de **25.961,6 (N)**.

La fuerza del viento sobre la superficie expuesta cónica del techo se obtiene desde la tabla 4.10. Esta toma un valor igual a 630 (N/m²). Al multiplicar este valor por el área expuesta del techo cónico se obtiene la fuerza que actúa sobre dicha superficie, la que toma finalmente un valor de **1.323 (N)**.

Reemplazando valores para el momento de volteo en la ecuación 4.10 resulta:

$$M_V = 25.961,6 \cdot \frac{5,48}{2} + 1.323 \cdot \left(5,48 + \frac{0,6}{3} \right) (\text{N} \cdot \text{m})$$

Por lo tanto, el valor obtenido como momento del volteo es equivalente a **78.648,82 (N·m)**. Este valor es inferior a **159.448,1 (N·m)** correspondiente al momento resistente al viento, consecuentemente, el diseño no requiere de anclajes, siendo autoportable por acción del viento a una velocidad de 150 (km/h).

4.6 Análisis sísmico

Las cargas sísmicas que actúan sobre el estanque, producen un momento de volteo que es función de la fuerza actuando sobre el centro de gravedad del cilindro a una distancia igual a la que existe entre el centro de gravedad y el fondo del estanque.

Por la acción de este fenómeno, podemos encontrar una acción de alta frecuencia amplificada producto del contenido moviéndose junto al estanque, así como también, la acción de una baja frecuencia amplificada producto de la formación de olas superficiales.

Sólo se considera el momento de volteo en función de la base del estanque, no en la cimentación. Los cuatro valores que intervienen en el momento de volteo son:

- 1) Fuerza sísmica donde interviene el peso total de las paredes del estanque (W_M)
- 2) Fuerza sísmica generada por la cubierta del estanque (W_R)
- 3) Fuerza sísmica generada por el peso efectivo del líquido que se considera adherido a las paredes del tanque (W_1)
- 4) Fuerza sísmica debido al peso efectivo del líquido en movimiento (W_2).

Para obtener el valor del momento de volteo se utiliza la siguiente ecuación [19]:

$$M_S = Z \cdot I \cdot (C_1 \cdot W_M \cdot X_S + C_1 \cdot W_R \cdot H_t + C_1 \cdot W_1 \cdot X_1 + C_2 \cdot W_2 \cdot X_2) \text{ (N} \cdot \text{m)} \quad [\text{Ec. 4.14}]$$

Donde:

M_S = Momento de volteo (N·m).

Z = Factor zona sísmica.

I = Factor de importancia.

C_1 y C_2 = Coeficientes laterales sísmicos.

W_M = Peso del manto del estanque (N).

X_S = Altura desde el fondo al centro gravedad del estanque (m).

W_R = Peso total del techo incluyendo la carga viva (N).

H_t = Altura total del cuerpo del estanque (m).

W_1 = Peso de la masa efectiva contenida en el estanque (N).

X_1 = Distancia desde el fondo del estanque hasta la línea de aplicación de W_1 (m).

X_2 = Distancia desde el fondo del estanque hasta la línea de aplicación de W_2 (m).

W_2 = Peso efectivo de la masa contenida en el estanque que se mueve en el primer oleaje (N).

4.6.1 Análisis sísmico mediante la normativa API-650

4.6.1.1 Factor zona sísmica (Z)

La figura 4.13 representa los distintos factores según la zona sísmica en estudio. Para fines de diseño y en consideración del emplazamiento de la instalación se considera una zona sísmica igual a 3.

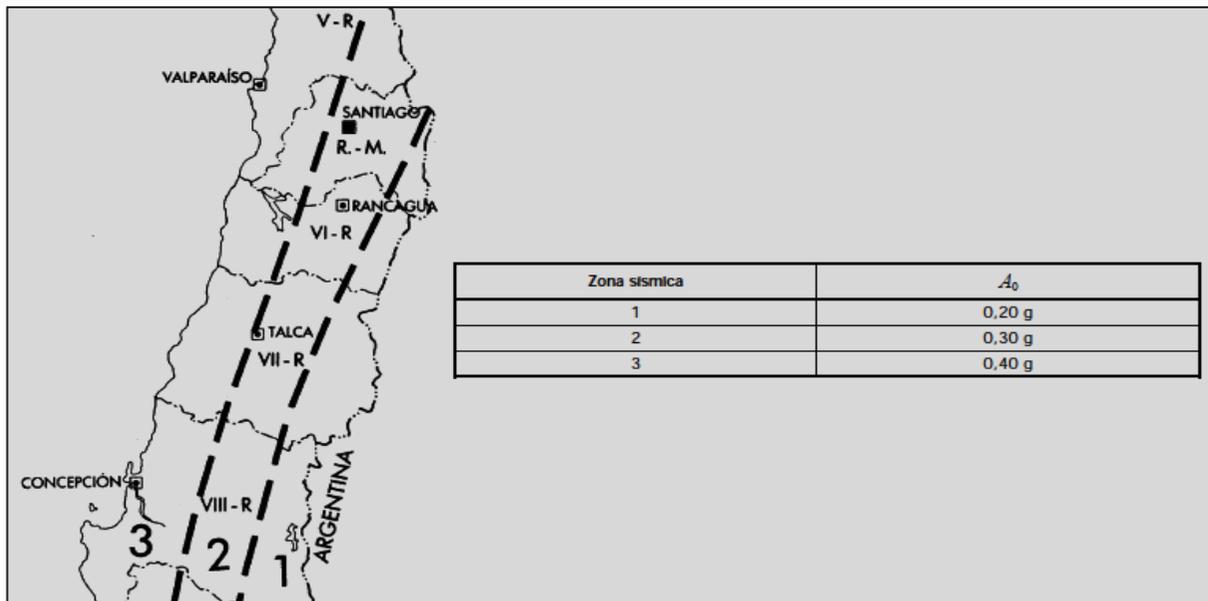


Figura 4.13: Zonas sísmicas según la localidad [21].

Con el valor de la zona sísmica, obtenido desde la tabla 4.13, se logra conseguir el factor Z, en este caso toma un valor igual a 0,3.

Zona Sísmica	Factor Z
1	0,075
2A	0,150
2B	0,200
3	0,300
4	0,400

Tabla 4.13: Valor del factor Z según zona sísmica [19] Tabla E-2.

4.6.1.2 Factor de importancia (I)

El factor de importancia (I) tendrá un valor de 1,0 para todos los estanques a menos que el factor de importancia sea mayor y especificado por el comprador. El factor de importancia no debería exceder de 1,25 y este valor máximo debe ser de aplicación únicamente a los depósitos que deben proporcionar servicio de emergencia post-terremoto o de estanques que almacenan sustancias tóxicas y/o explosivas en las zonas donde una liberación del producto se considere peligrosa para la seguridad del público en general [19].

Para fines prácticos de cálculo, se definirá un factor de importancia de **1,2**.

4.6.1.3 Coeficientes laterales sísmicos (C_1) y (C_2)

Según la norma API-650 en su apartado E-3.3.1, el coeficiente sísmico C_1 toma un valor de **0,6** mientras que el coeficiente sísmico C_2 toma un valor según la siguiente ecuación [19]:

$$C_2 = \frac{0,75 \cdot S}{T} \quad [\text{Ec. 4.15}]$$

Cuando se cumple que $T < 4,5$. En el caso contrario, el valor de C_2 será [19]:

$$C_2 = \frac{3,375 \cdot S}{T^2} \quad [\text{Ec. 4.16}]$$

Donde:

S= Coeficiente de sitio (Tabla 4.14).

T= Periodo natural del 1^{er} modo de onda en segundos. Este valor se obtiene según la siguiente ecuación [19]:

$$T = 1,81 \cdot k \cdot (\sqrt{D}) \quad [\text{Ec. 4.17}]$$

Donde:

D= Diámetro nominal del estanque.

K= Factor obtenido desde la figura 4.14 y dado por la relación diámetro del estanque y la altura de llenado del líquido del estanque $(D/H) = (7 / 4,19) = 1,67$.

Tipo	Descripción	Valor de S
S1	Suelo con un material como roca, caracterizado por una velocidad mayor de onda de corte mayor a 760(m/seg) o bien por un suelo rígido o denso donde la profundidad es menor a 60 (m).	0,1
S2	Un perfil de suelo del tipo rígido o denso, donde la profundidad es mayor a 60 (m).	1,2
S3	Un perfil de suelo de 12(m) o más de profundidad, que contiene más de 6 (m) de arcilla dura y más de 12 (m) de arcilla blanda.	1,5
S4	Suelo tipo blando conteniendo más de 12(m) de arcilla blanda.	2,0

Tabla 4.14: Coeficiente de sitio [19] Tabla E-3.

A partir de la tabla 4.14 y considerando el lugar de emplazamiento de la instalación, se da un valor de S para un suelo tipo 3 con un valor de S de 1,5.

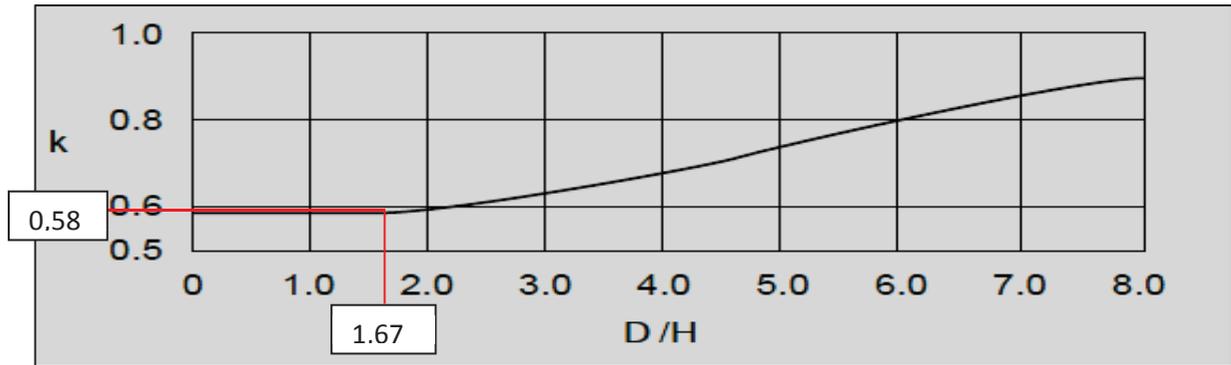


Figura 4.14: Valor de k en función de (D/H) [19] Figura E-4.

Desde la figura 4.14 se obtiene que el valor de k sea aproximadamente igual a **0,58** para una relación D/H igual a 1,67.

Reemplazando en la ecuación 4.17 resulta:

$$T = 1,81 \cdot 0,58 \cdot (\sqrt{7})$$

De lo anterior, T toma un valor de **2,78 (s)** siendo este inferior a 4,5 por lo tanto, el factor C_2 se obtiene desde la ecuación 4.15 resultando:

$$C_2 = \frac{0,75 \cdot 1,5}{2,78}$$

Donde el valor de C_2 es igual a **0,41**.

4.6.1.4 Peso del manto del estanque (W_M)

El peso del manto del estanque, se calcula en base a la ecuación 4.11 considerando en este caso el espesor de la corrosión admisible.

Reemplazando valores en la ecuación 4.11 resulta:

$$W_M = \pi \cdot 7 \cdot 7850 \cdot 2,44 \cdot [(6) \cdot 0,001 + (6) \cdot 0,001] \text{ (kgf)}$$

Por lo tanto, el peso del manto tiene un valor de **5.054,62 (kgf)** o **50.546,2 (N)**.

4.6.1.5 Altura desde el fondo al centro gravedad del estanque (X_S)

La distancia desde el fondo del estanque a su centro de gravedad es la mitad de la altura del estanque de 4,88 (m). Este toma un valor de **2,44 (m)**.

4.6.1.6 Peso del techo

El peso del techo del estanque fue calculado en el apartado 4.3.3 tomando un valor de **3.065,13 (kgf)** o **30.651,3 (N)**.

4.6.1.7 Peso de la masa efectiva contenida en el estanque (W_1) y (W_2)

Para el cálculo de las masas efectivas, es preciso el cálculo del peso del contenido en el interior del estanque (W_T). De la tabla 4.2 se obtiene la densidad del purín o sustrato a contener en el estanque (biodigestor). Desde la tabla 4.4 se obtiene el volumen neto de trabajo. Al multiplicar la densidad con este volumen, se obtiene un peso del contenido en el estanque, el que toma un valor de **164.475 (kgf)**. De la figura 4.15 se obtiene el valor de W_1 y W_2 , dado que la relación (D/H) toma un valor de **1,67**.

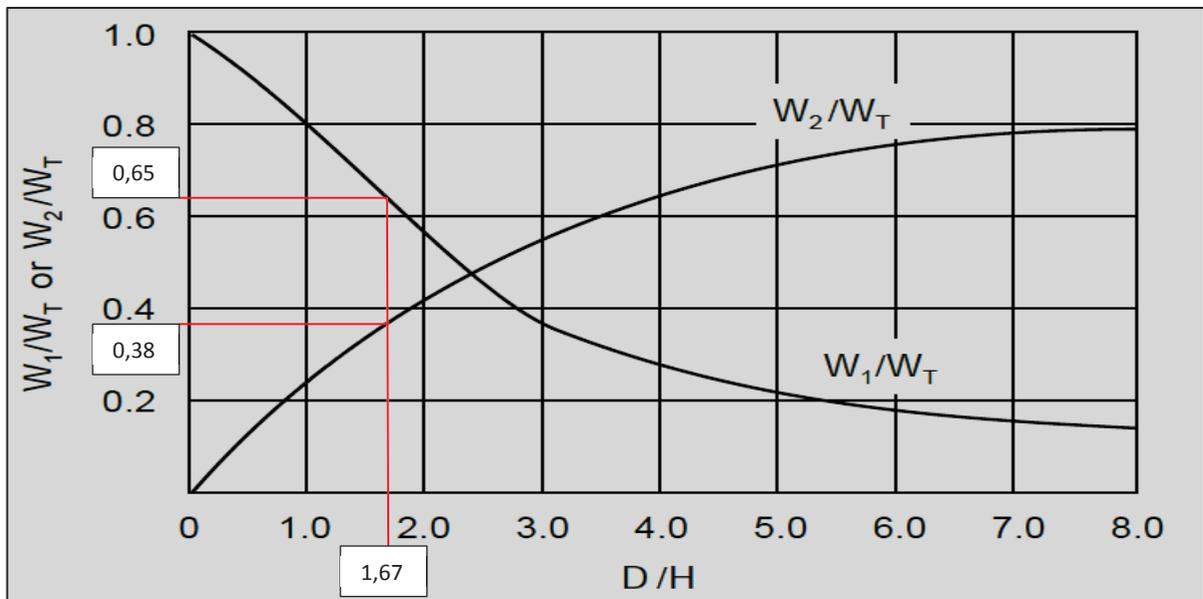


Figura 4.15: Valores de W_1 Y W_2 en relación a D/H [19] Figura E-2.

Desde la figura 4.15 se obtienen los valores aproximados de W_1/W_T y W_2/W_T siendo estos **0,65** y **0,38** respectivamente.

Ahora, como es conocido el valor de W_T se tiene:

$$\frac{W_1}{164.475} = 0,65$$

Donde W_1 toma un valor de **106.908,75 (kgf)** o **1.069.087,5 (N)**.

$$\frac{W_2}{164.475} = 0,38$$

Donde W_2 toma un valor de **62.500,5 (kgf)** o **625.005 (N)**.

4.6.1.8 Distancias (X_1) y (X_2)

Las distancias desde el fondo del estanque X_1 y X_2 hasta la línea de aplicación de W_1 y W_2 respectivamente, se calcula en base a la figura 4.16.

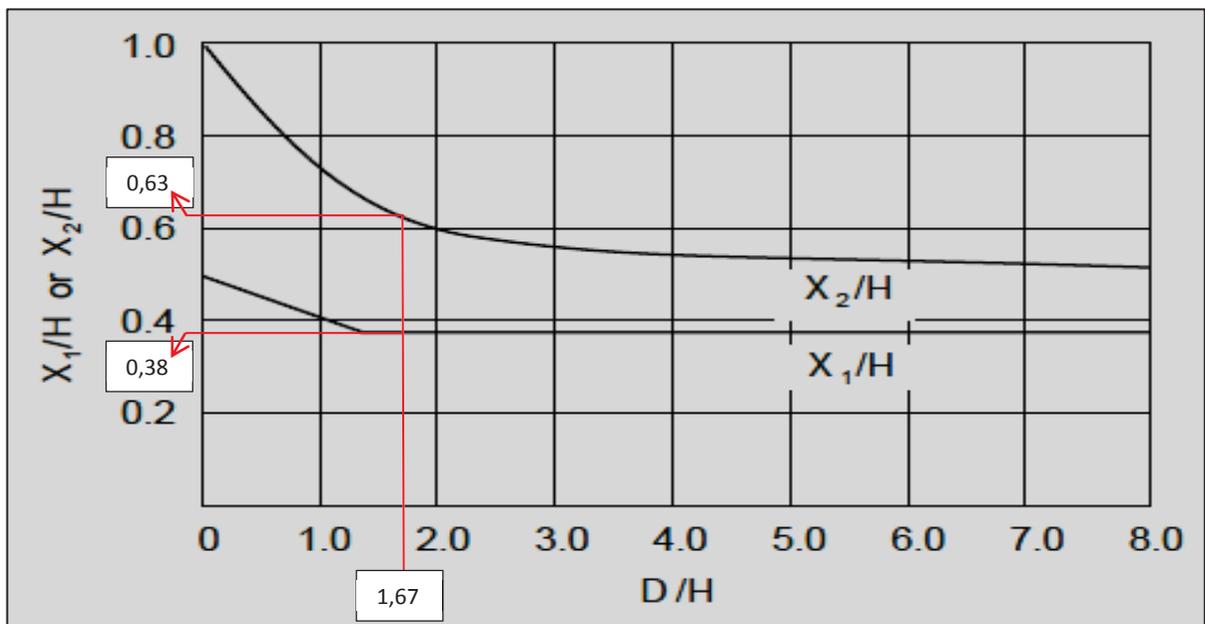


Figura 4.16: Distancias de X_1 y X_2 [19] Figura E-3.

Conocida la relación D/H, desde la figura 4.16 se obtiene:

$$\frac{X_1}{4,19} = 0,38$$

Donde X_1 toma un valor de **1,59 (m)**.

$$\frac{X_2}{4,19} = 0,63$$

Donde X_2 toma un valor de **2,64 (m)**.

La tabla 4.15 resume las variables para el cálculo del momento de volteo.

Variable	Valor	Unidad
Factor zona sísmica (Z)	0,3	Adimensional
Factor de importancia (I)	1,2	Adimensional
Coeficiente lateral sísmico (C_1)	0,6	Adimensional
Coeficiente lateral sísmico (C_2)	0,41	Adimensional
Peso del manto (W_M)	50.546,2	(N)
Altura desde el fondo al centro de gravedad del estanque (X_s)	2,44	(m)
Peso del techo (W_R)	30.651,3	(N)
Peso de la masa (W_1)	1.069.087,5	(N)
Peso de la masa (W_2)	625.005	(N)
Distancia centroidal (X_1)	1,59	(m)
Distancia centroidal (X_2)	2,64	(m)
Altura total estanque (H_t)	4,88	m)

Tabla 4.15: Resumen de parámetros para el cálculo del momento de volteo.

A partir de la tabla 4.15 y reemplazando valores en la ecuación 4.14 resulta:

$$M_S = 0,3 \cdot 1,2 \cdot (0,6 \cdot 50.546,2 \cdot 2,44 + 0,6 \cdot 30.651,3 \cdot 4,88 + 0,6 \cdot 1.069.087,5 \cdot 1,59 + 0,4 \cdot 625.005 \cdot 2,64) \text{ (N} \cdot \text{m)}$$

Desarrollando lo anterior, se obtiene que el momento de volteo (M_S) es igual a **663.718,10 (N·m)**.

4.6.2 Análisis de deslizamiento

El análisis de deslizamiento, realiza una comparación entre la fuerza de roce del suelo del emplazamiento y la fuerza sísmica. Para obtener el valor de la fuerza sísmica, se utiliza la siguiente ecuación [19]:

$$F_Z = Z \cdot I \cdot (C_1 \cdot W_S + C_1 \cdot W_R + C_1 \cdot W_1 + C_2 \cdot W_2) \text{ (N)} \quad [\text{Ec. 4.18}]$$

De la tabla 4.15 y reemplazando valores en la ecuación 4.18 resulta:

$$F_Z = 0,3 \cdot 1,2 \cdot (0,6 \cdot 50.546,2 + 0,6 \cdot 30.651,3 + 0,6 \cdot 1.069.087,5 + 0,4 \cdot 625.005) \text{ (N)}$$

Por lo tanto, el valor de la fuerza sísmica (F_Z) es de **338.462,28 (N)**.

La fuerza de roce, se calcula en base al peso total del estanque tomando un coeficiente de roce igual a **0,5**.

Para continuar, es preciso calcular el valor del peso del fondo del estanque (W_F) considerando la corrosión admisible a partir de la ecuación 4.12. Reemplazando valores resulta:

$$W_F = \pi \cdot 3,5^2 \cdot \frac{8}{1.000} \cdot 7.850 \text{ (kgf)}$$

Por lo tanto, el peso del fondo del estanque tiene un valor de **2.416,83 (kgf)** o **24.168,3 (N)**.

La tabla 4.16 detalla los pesos involucrados en el estanque.

Parámetro	Valor	Unidad
Peso del techo (W_R)	30.651,3	(N)
Peso del manto (W_M)	50.546,2	(N)
Peso del contenido (W_T)	1.644.750	(N)
Peso del fondo (W_F)	24.168,3	(N)
Peso total	1.750.115,8	(N)

Tabla 4.16: Peso total del estanque.

El cálculo de la fuerza de roce se realiza según la siguiente ecuación general:

$$F_R = F \cdot \mu \text{ (N)} \quad [\text{Ec. 4.19}]$$

Donde:

F_R = Fuerza de roce (N).

F = Peso total del estanque.

μ = Coeficiente de fricción (0,5).

Reemplazando valores en la ecuación 4.19 resulta:

$$F_R = 1.750.115,8 \cdot 0,5 \text{ (N)}$$

Por lo tanto, el valor de la fuerza de roce es de **875.057,9 (N)**.

En consecuencia de que el valor de la fuerza de roce es mayor al de la fuerza sísmica, el estanque no desliza.

4.6.3 Análisis de volcamiento

El peso de resistencia al volcamiento (w_L), para estanques no anclados, se rige según la siguiente expresión [19]:

$$w_L = 99 \cdot t_b \cdot \sqrt{F_{by} \cdot G \cdot H} \quad (\text{N/m}) \quad [\text{Ec. 4.20}]$$

$$w_L \leq 196 \cdot G \cdot H \cdot D \quad [\text{Ec. 4.21}]$$

Donde:

w_L = Peso máximo del contenido que puede resistir la curvatura del estanque, respecto al momento de volteo (N/m).

t_b = Espesor de placa, no mayor a 6 (mm) respecto al primer anillo.

F_{by} = Tensión de fluencia 248,11 (MPa).

G = gravedad específica del fluido.

D = diámetro nominal del estaque (m).

H = Nivel de diseño del líquido (m). (Altura desde el fondo del anillo en estudio hasta el nivel superior del manto incluyendo el perfil de coronamiento).

Reemplazando valores en la ecuación 4.20 resulta:

$$w_L = 99 \cdot 6 \cdot \sqrt{248,11 \cdot 1,02 \cdot 4,88} \quad (\text{N/m})$$

Por lo tanto el valor de w_L es igual a **20.874,62 (N/m)**.

Reemplazando valores en la ecuación 4.21 resulta:

$$w_L = 196 \cdot 1,02 \cdot 4,88 \cdot 7 \quad (\text{N/m})$$

Por lo tanto el valor de w_L es igual a **6.829,27 (N/m)**.

Utilizando el valor de w_L obtenido de la ecuación 4.20 en la ecuación 4.21 se tiene:

$$20.874,62 \leq 6.829,27$$

Como el criterio de la desigualdad no se cumple, se debe usar el valor de w_L igual a 6.829,27 (N/m) para que la desigualdad de la ecuación 4.21 sea válida.

Por lo tanto, el valor de w_L a utilizar es el que cumple con la desigualdad y ese valor es **6.829,27 (N/m)**.

Si se cumple la siguiente desigualdad, el estanque no requiere ser anclado [19].

$$\frac{M_S}{D^2 \cdot (w_t + w_L)} \leq 1,57 \quad [\text{Ec. 4.22}]$$

Donde:

w_t = Peso del perímetro del manto y la porción de techo correspondiente (N/m).

M_S = Momento de volteo (N·m).

Para el cálculo del peso del perímetro del manto y la porción de techo correspondiente se utiliza la siguiente ecuación [19]:

$$w_t = \frac{(W_M + W_R)}{\pi \cdot D} \left(\frac{N}{m} \right) \quad [\text{Ec. 4.23}]$$

Reemplazando valores en la ecuación 4.23 resulta:

$$w_t = \frac{(50.546,2 + 30.651,3)}{\pi \cdot 7} \text{ (N/m)}$$

Por lo tanto, el peso del perímetro del manto y la porción de techo (w_t) correspondiente toma un valor de **3.692,29 (N/m)**.

Reemplazando valores en la ecuación 4.22 resulta:

$$\frac{663.718,10}{7^2 \cdot (3.692,29 + 6.829,27)} \leq 1,57$$

$$1,29 \leq 1,57$$

Como la desigualdad anterior es válida, entonces el estanque es estable y no requiere ser anclado.

Del análisis acabado de viento y de sismo, se concluye que el estanque cumple con los requerimientos exigidos por la normativa API-650, por lo que no requiere ser anclado.

4.7 Selección de accesorios

Un diseño de estanque no se limita únicamente a la construcción de sus elementos principales tales como: manto, techo o fondo. Para poder obtener operatividad en el proceso, es necesario instalar elementos secundarios tales como: manhole, venteos y boquillas.

Estos elementos permiten dar seguridad, continuidad operacional y perpetuidad al proceso, por ejemplo, las boquillas nos permiten el llenado y vaciado del estanque dando continuidad operacional, el control de presión interna es llevado por las válvulas de venteo que son complementadas con elementos de protección de sobrellenado como antorchas los cuales otorgan seguridad. Finalmente el manhole permite el ingreso de trabajadores los cuales a través de las mantenciones de rutina dan una vida útil mayor al estanque. Estos elementos deben estar sellados debido a la hermeticidad del proceso.

4.7.1 Boquillas y conexiones

El sistema de boquillas, permite la entrada de biomasa desde el pozo purinero al biodigestor, así como también, la salida del efluente hacia el pozo de sacrificio. Todas las boquillas cuyo diámetro sea superior a 80 (mm) deberán contar con una placa de refuerzo, de manera de contrarrestar la concentración de esfuerzos por acción de la perforación en el manto del estanque. Los detalles se muestran en las figuras 4.17, 4.18 y 4.19.

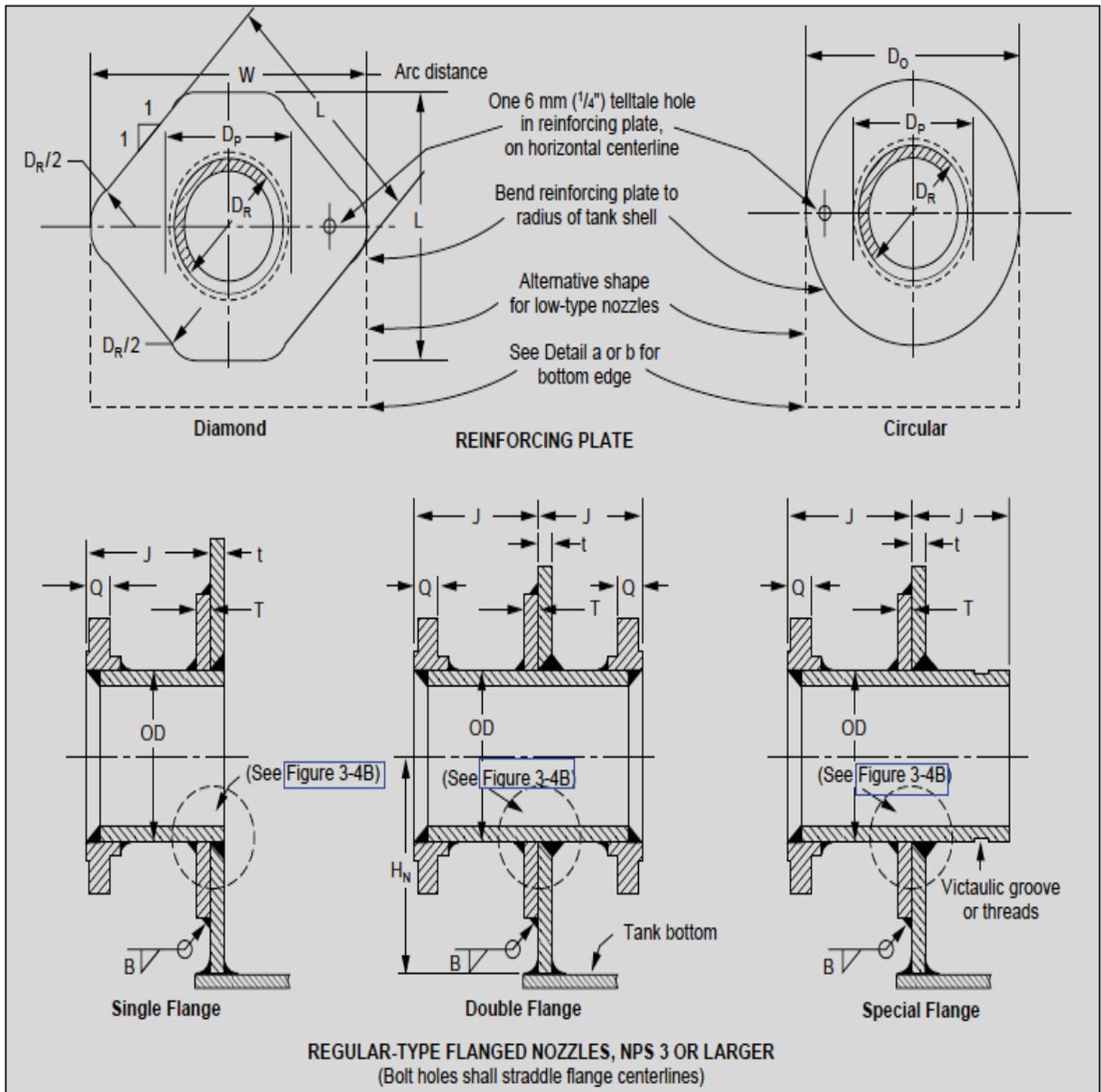


Figura 4.17: Detalle de boquillas en el manto del estanque [19] Figura 3-5.

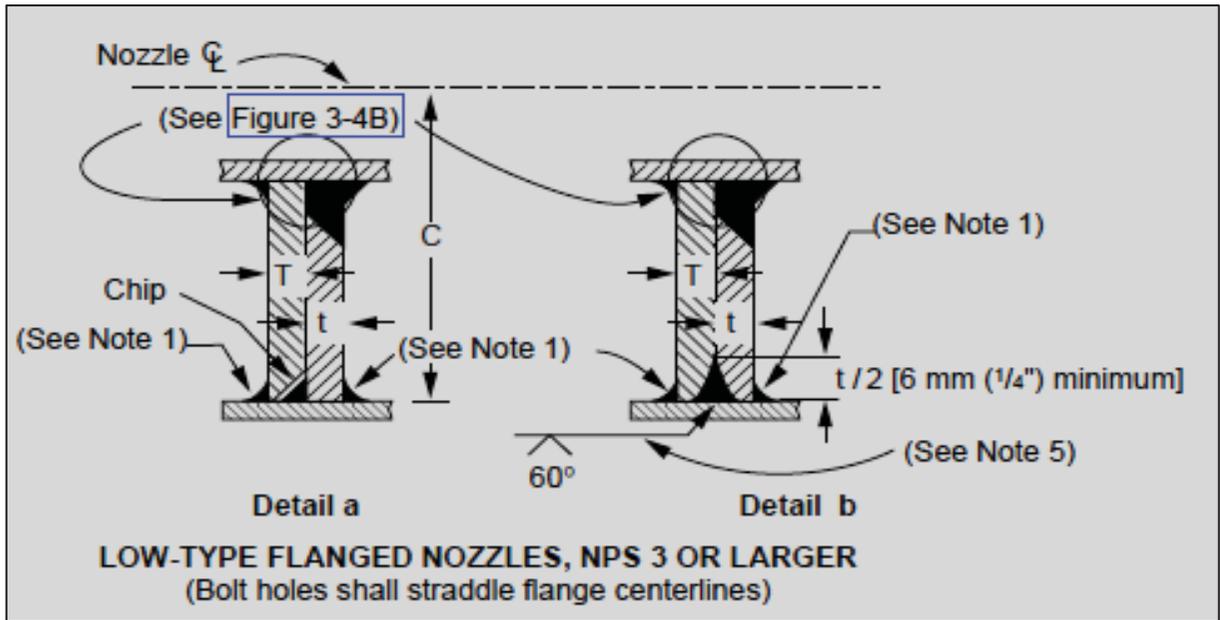


Figura 4.18: Detalle de boquillas en el manto del estanque [19] Figura 3-5.

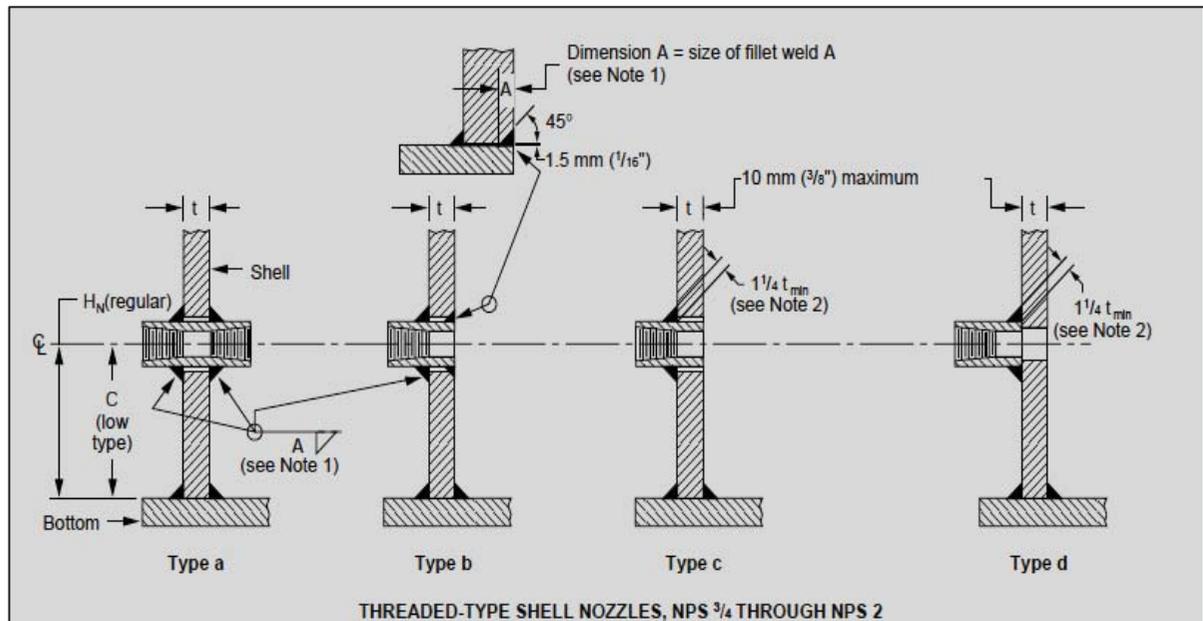


Figura 4.19: Detalle de boquillas en el manto del estanque [19] Figura 3-5.

4.7.2 Manhole o entrada de hombre

El estanque contará, por lo menos con una entrada hombre en el cuerpo de poder realizar limpieza, revisiones o reparaciones en el estanque. Los registros que se coloquen en la pared del estanque deberán estar acorde con la figura 4.20 y 4.21.

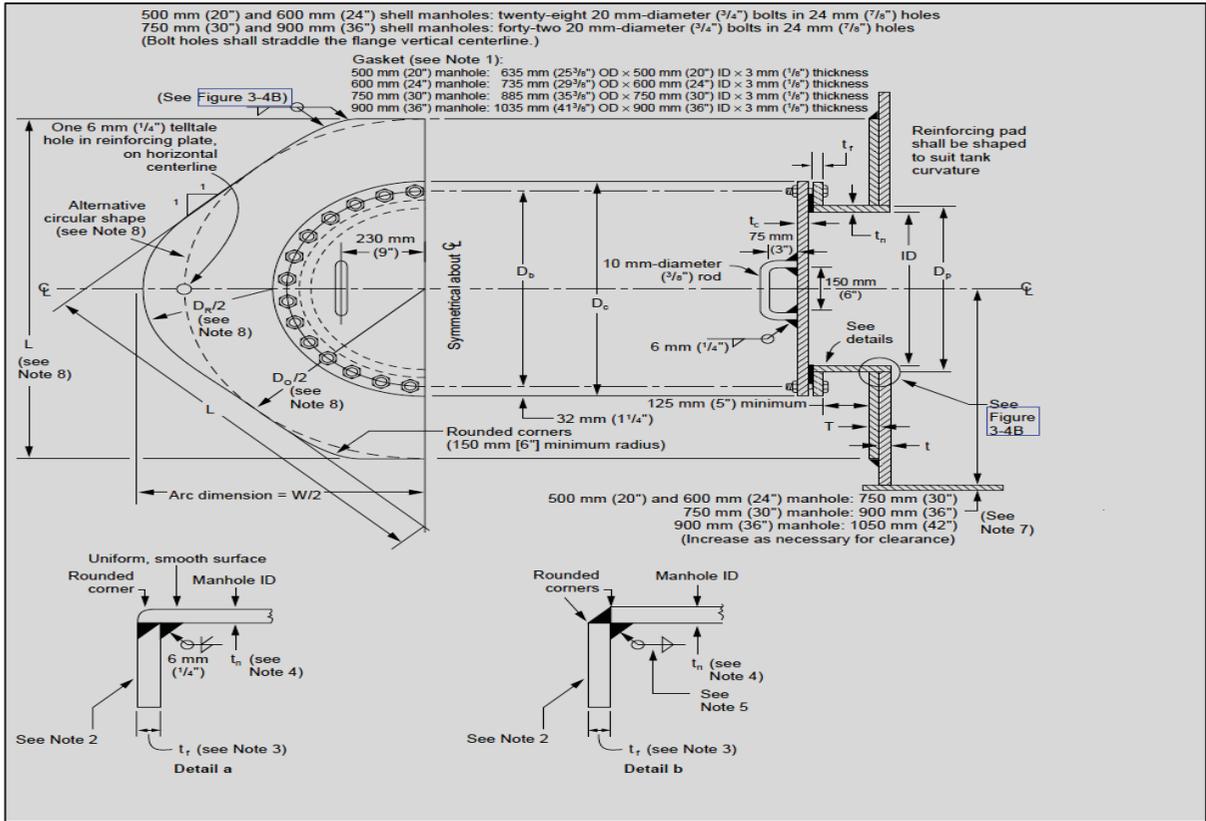


Figura 4.20: Detalle Manhole pared del estanque. [19] Figura 3-4A.

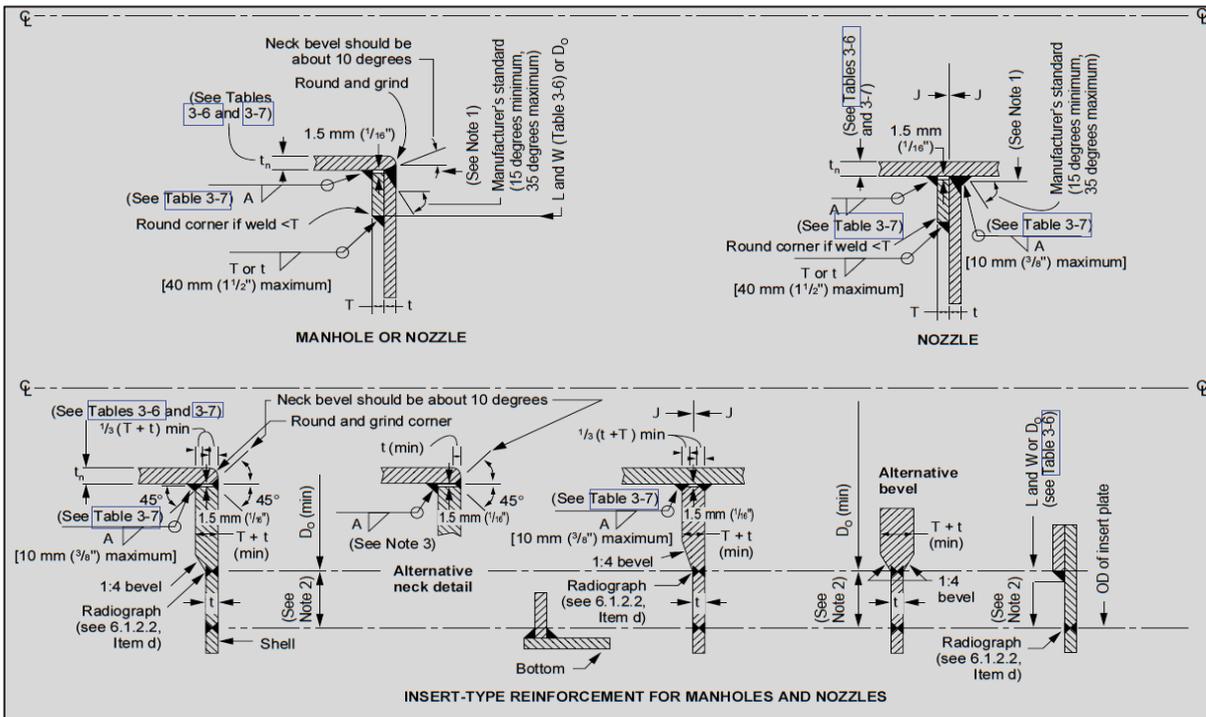


Figura 4.21: Detalle Manhole pared del estanque. [19] Figura 3-4B

4.7.3 Conexiones en el techo del estanque

Las conexiones en el techo tienen las mismas aplicaciones que las boquillas en el cuerpo del estanque, esto es entrada y salida del producto, además, de conexiones para instrumentación. Estas conexiones serán dispuestas según lo descrito en la figura 4.22.

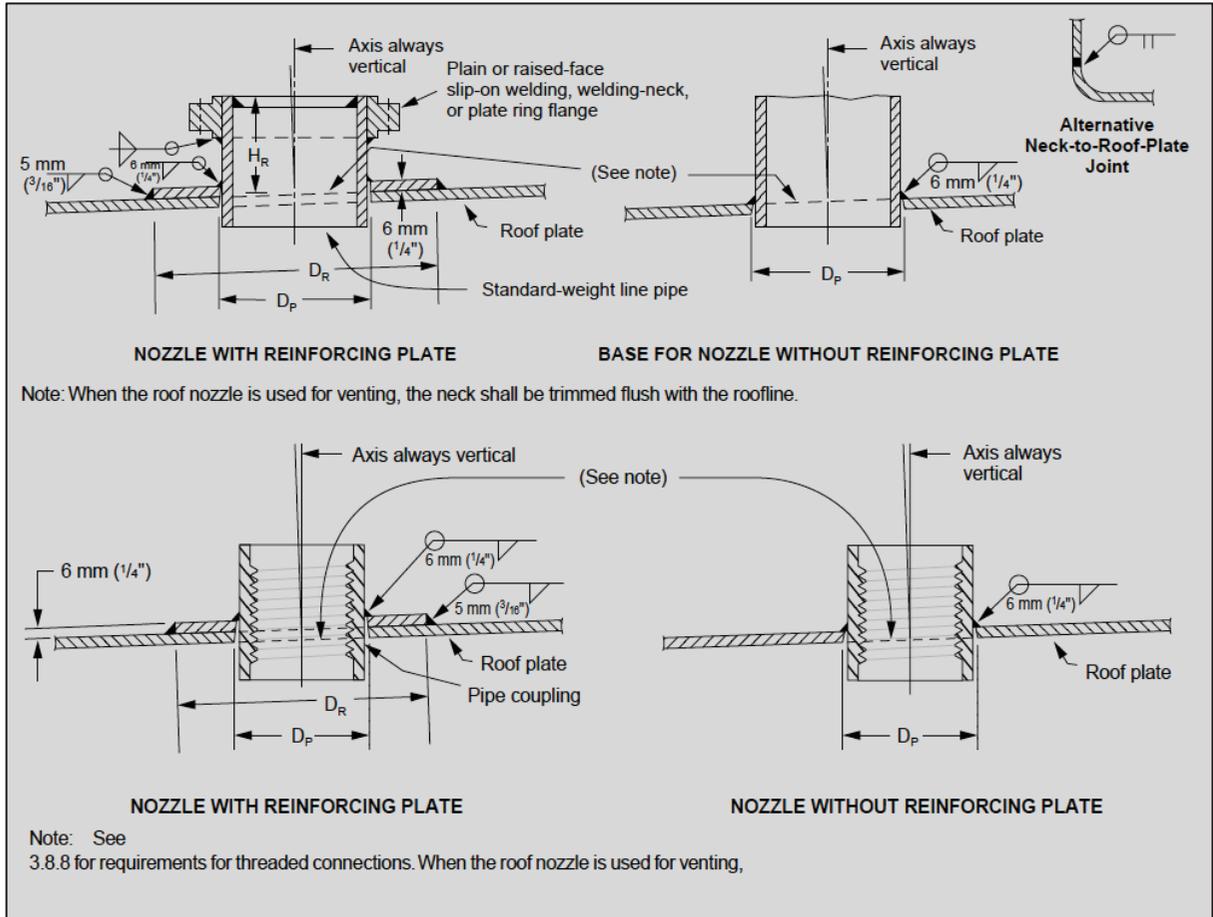


Figura 4.22: Detalle de conexiones del techo del estanque [19] Figura 3-16 y 3-17.

4.7.4 Venteo

Los estanques de almacenamiento contarán con una boquilla exclusiva para venteo, la cual tendrá que ser diseñada y calculada, para que dentro del estanque no se genere presión interna al ser llenado o vaciado, el cual debe colocarse de ser posible, en la parte más alta del estanque. A modo de ejemplo, un venteo típico se muestra en la figura 4.23.

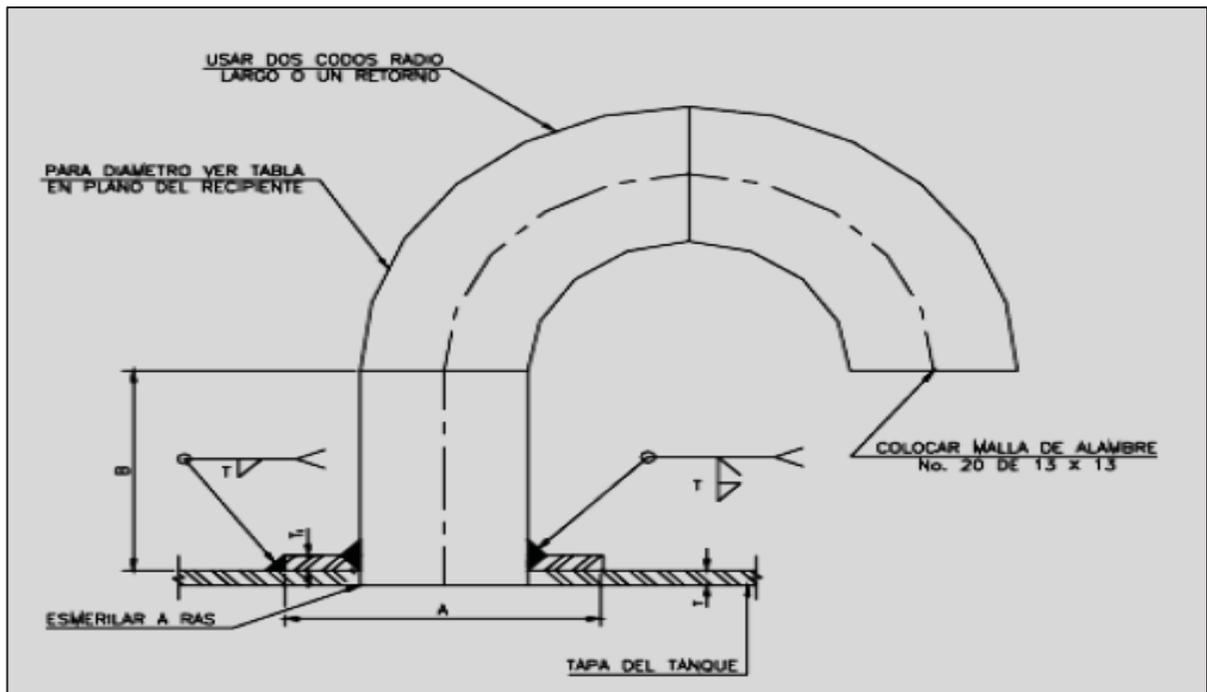


Figura 4.23: Venteo típico [19].

CAPÍTULO V: Diseño de la planta y selección de tecnología de cogeneración

5.1 Etapa de ingreso del afluente al biodigestor

En esta etapa, la biomasa proveniente del pozo purinero de sacrificio es obligada a fluir por acción de la bomba hidráulica por medio de la línea de afluente hacia el biodigestor, tal como se muestra en la figura 5.1.

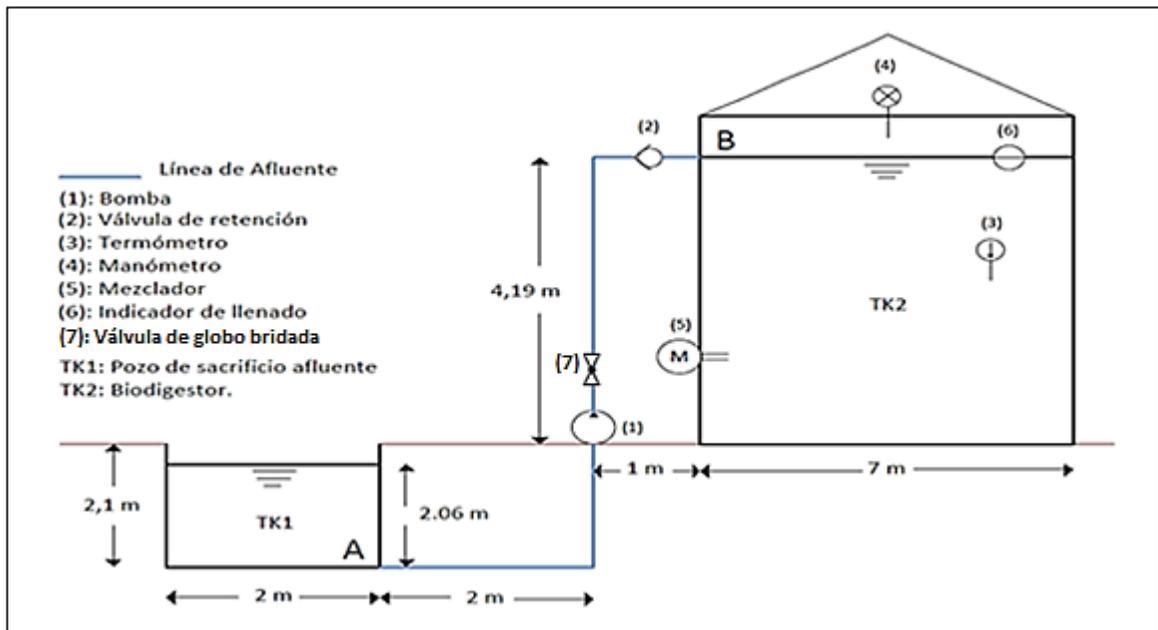


Figura 5.1: Etapa de ingreso del afluente al biodigestor.

Se ha considerado que el pozo de sacrificio del afluente es abastecido tres veces al día con un volumen de $2,15 \text{ (m}^3\text{)}$ en cada llenado. La suma diaria de purín, entrega un volumen total de $6,45 \text{ (m}^3\text{)}$ los que son trasegados al biodigestor en media hora de operación, representando un caudal volumétrico igual a $3,58 \times 10^{-3} \text{ (m}^3\text{/s)}$.

Si se fija una velocidad de diseño del fluido dentro de la tubería constante e igual a $2,73 \text{ (m/s)}$, entonces, es posible determinar el diámetro de la tubería a partir de la siguiente ecuación [23]:

$$V = \frac{Q}{A} \text{ (m/s)} \quad [\text{Ec. 5.1}]$$

Donde:

V = Velocidad del fluido (m/s).

Q= Caudal volumétrico por unidad de tiempo (m³/s).

A = $\pi \cdot r^2$ = área de la tubería (m²).

Reemplazando valores en la ecuación 5.1 resulta:

$$2,73 = \frac{3,58 \cdot 10^{-3}}{\pi \cdot r^2}$$

De lo anterior, se obtiene que el diámetro interno de la tubería es igual a **4,09 (cm)** o **40,9 (mm)**.

La tubería utilizada en la línea de afluente estará construida en base a hierro galvanizado, de medida nominal y comercial igual a 1 ½ (in), siendo sus características detalladas en la tabla 5.1.

Cédula	Medida Nominal (in)	Diámetro exterior (mm)	Espesor (mm)	Diámetro interior (mm)
40	1 ½	48,3	3,68	40,9

Tabla 5.1: Tubería comercial de hierro galvanizado cédula 40.

El diseño de la salida desde el depósito a la tubería será sin abocinar o de borde agudo, implicando que el coeficiente de fricción (k) sea igual a 0,5. Del mismo modo, la entrada de la tubería al biodigestor se considerará como una expansión brusca al depósito cuyo coeficiente de fricción (k) es igual a 1 [22].

El circuito hidráulico constará, además, de dos codos bridados y regulares de 90°, una bomba hidráulica, una válvula de globo bridada y una válvula de retención, cuya finalidad será la de evitar la fuga de gas u otro remanente.

A partir de la tabla 5.1 se puede determinar que el tipo de tubería, de hierro galvanizado de diámetro nominal (DN) a utilizar será de 1 ½ (in) de cédula 40 para el proceso, cuyo diámetro interno es igual a 4,09 (cm) o 1,61 (in).

En función de la figura 5.2, se puede determinar que el factor de fricción para un codo bridado y regular de 90° toma un valor aproximado a 0,38, a su vez, para una válvula de retención, el factor de fricción es constante e igual a 2. Estas pérdidas menores, son resumidas en la tabla 5.2.

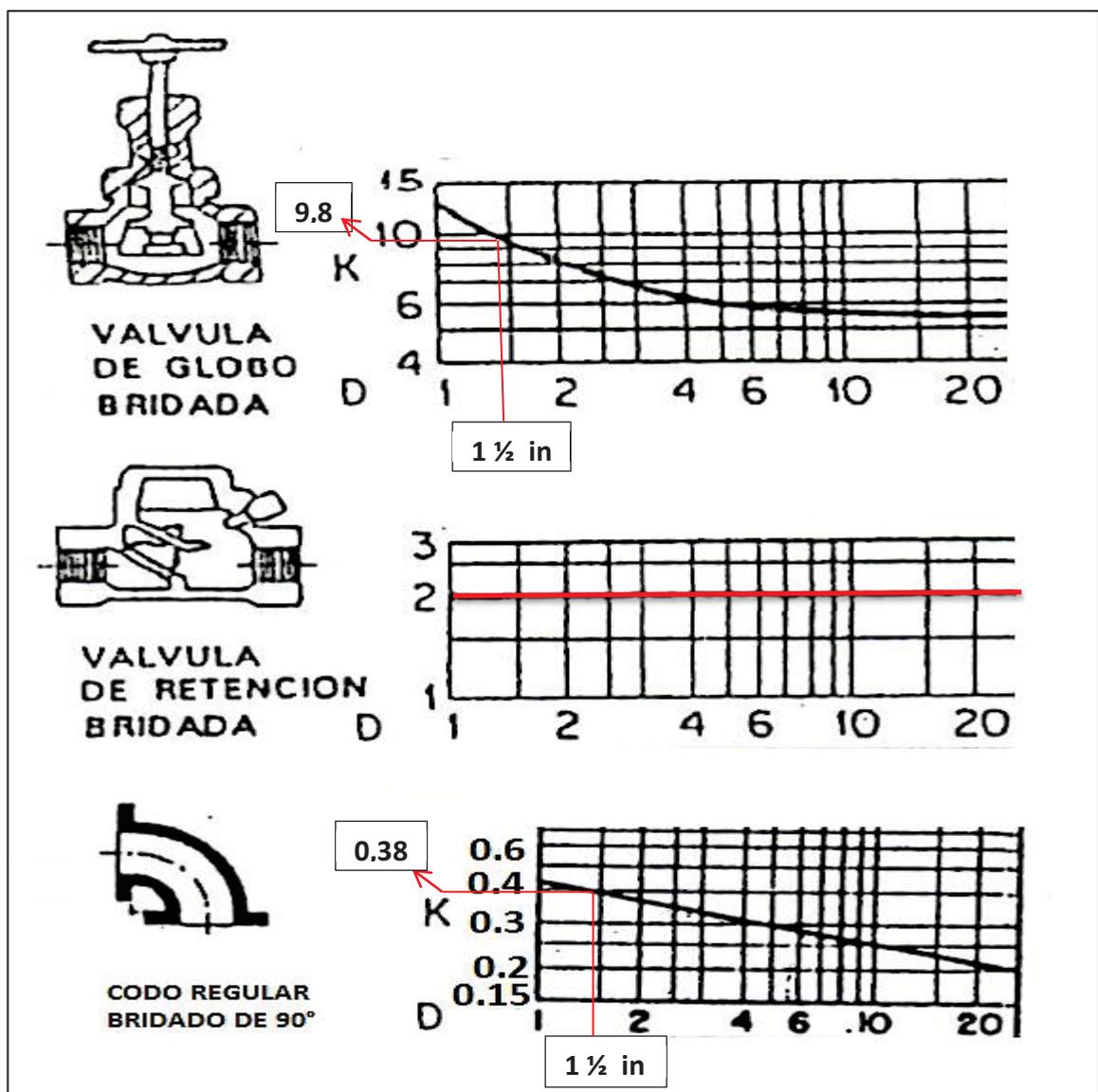


Figura 5.2: Coeficiente de fricción para distintos accesorios [22].

Accesorio	Coefficiente de fricción (k)
2 codos regulares, bridados y de 90°	0,38 x 2
Válvula de globo bridada	9,8
Válvula de retención	2
Salida del depósito sin abocinar	0,5
Entrada brusca conducto depósito	1
∑ Pérdidas menores (PM)	14,06

Tabla 5.2: Valores de coeficientes de fricción por accesorios [22].

El sustrato será considerado como agua sucia de proceso con bajo contenido de sólidos, su temperatura será igual a la temperatura promedio anual para la Región Metropolitana cuyo valor es de **13,9 (°C)** obtenido desde la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. La viscosidad cinemática del fluido se puede obtener a partir de la siguiente ecuación, obtenida desde la bibliografía entregada en el curso “ICM-871 Diseño de Equipos de Procesos”.

$$v = \frac{40}{T + 20} \cdot 10^{-6} \left(\frac{m^2}{s} \right) \quad T; [10 \leq T \leq 40] \text{ °C} \quad [\text{Ec. 5.2}]$$

Donde:

v= Viscosidad cinemática (m²/s).

T= Temperatura (°C).

Por lo tanto, la viscosidad cinemática a 13,9 (°C) es igual a **1,18 x 10⁻⁶ (m²/s)**.

Una vez obtenido el valor de la viscosidad cinemática, el diámetro interno de la tubería y la velocidad del fluido, se procede a calcular el número de Reynolds utilizando la siguiente ecuación [22]:

$$R_e = \frac{V \cdot D}{\nu} \quad [\text{Ec. 5.3}]$$

Donde:

R_e = Número de Reynolds.

V = Velocidad del fluido (m/s).

D = Diámetro interno de la tubería (m).

ν = Viscosidad cinemática del fluido (m^2/s).

Reemplazando valores en la ecuación 5.3 resulta:

$$R_e = \frac{2,73 \cdot 0,0409}{1,18 \cdot 10^{-6}}$$

Por lo tanto, el número de Reynolds, toma un valor igual a **$9,46 \times 10^4$** , valor mayor a 4.000 lo que sitúa al flujo dentro del rango turbulento [22].

Desde la figura 5.3, se obtiene el valor de la rugosidad típica para el material hierro galvanizado. La rugosidad relativa, se obtiene del cociente entre la rugosidad y el diámetro interno de la tubería. Los valores antes mencionados son resumidos en la tabla 5.3

Rugosidad	Rugosidad relativa	Número de Reynolds	Factor de fricción de Darcy
(mm)	Adimensional	Adimensional	Adimensional
0,15	0,004	$9,46 \times 10^4$	0,029

Tabla 5.3: Rugosidad típica y relativa, número de Reynolds y Factor de Darcy implicados en el proceso [22].

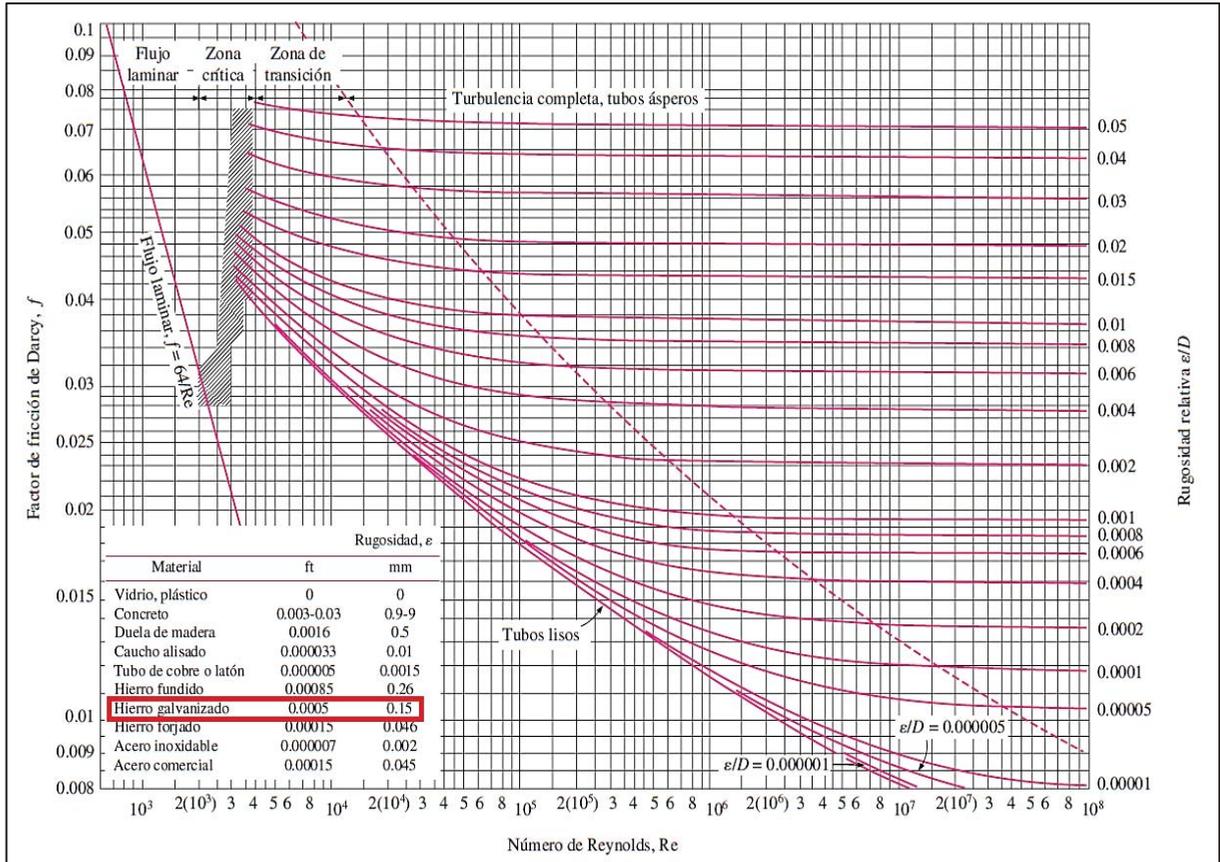


Figura 5.3: Diagrama de Moody [22].

El cálculo de las pérdidas producidas entre los puntos A y B de la figura 5.1, se obtiene según la ecuación de Darcy-Weisbach detallada a continuación [22]:

$$H_{per_{A-B}} = \left(\sum_A^B PM + \frac{fL}{D} \right) \cdot \frac{V^2}{2} \left(N \cdot \frac{m}{kg} \right) \quad [\text{Ec. 5.4}]$$

Donde:

$H_{per_{A-B}}$ = Pérdidas generadas entre los puntos A y B ($N \cdot m/kg$).

PM= Pérdidas menores generada por los accesorios.

f = Factor de fricción de Darcy.

L = Largo del tramo de la tubería (m).

D = Diámetro interno de la tubería (m).

V = Velocidad del fluido (m/s).

Reemplazando valores en la ecuación 5.4 resulta:

$$H_{per_{A-B}} = \left(14,06 + \frac{0,029 \cdot 9,29}{0,0409} \right) \cdot \frac{2,73^2}{2} \text{ (N} \cdot \text{m/kg)}$$

Por lo tanto, se puede argumentar que las pérdidas energéticas por unidad de masa generadas en el circuito hidráulico son iguales a **76,94** (N · m/kg).

Se hace necesario calcular las presiones presentes en el sistema. A partir de la ecuación de Bernoulli, es posible calcular la presión generada en la entrada de la tubería abocinada en el depósito TK1 (Punto A) de la figura 5.1.

La ecuación se detalla a continuación [22]:

$$\frac{P_1}{d \cdot g} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + h_1 = \frac{P_2}{d \cdot g} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + h_2 = \text{cte.} \quad [\text{Ec. 5.5}]$$

Donde:

$P_{1,2}$ = Presión manométrica (Pa).

d = Densidad del fluido, constante en todo el proceso (kg/m³).

g = Aceleración de gravedad (m/s²).

h = Altura geométrica desde el punto de referencia (m).

$V_{1,2}$ = Velocidad del fluido (m/s).

Desde la figura 5.1 se analiza el punto A (referencial) con la superficie libre del estanque TK1. De este análisis se tiene que tanto la presión como la velocidad superficial son nulas para fines de cálculo, así como también, la altura geométrica en el punto A. Reemplazando valores en la ecuación 5.5 resulta:

$$\frac{0}{1.020 \cdot 9,81} + \frac{0^2}{2 \cdot 9,81} + 2,06 = \frac{P_A}{d \cdot 9,81} + \frac{2,73^2}{2 \cdot 9,81} + 0$$

Luego, se establece que la relación entre la presión generada en el punto A y la densidad del fluido es igual a **16,48 (N · m/kg)**. Ahora es posible obtener la altura total desarrollada por la bomba, la que representa la energía mecánica total desarrollada por la bomba por unidad de peso de fluido. Para obtener la energía mecánica total por unidad de masa de fluido basta con multiplicar por g [22].

La ecuación se detalla a continuación [22]:

$$\frac{P_1}{d \cdot g} + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + h_1 + \Delta H_D = \frac{P_2}{d \cdot g} + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + h_2 + \frac{H_{per}}{g} \quad [\text{Ec. 5.6}]$$

Donde:

$P_{1,2}$ = Presión manométrica (Pa).

d = Densidad del fluido (kg/m^3).

g = Aceleración de gravedad (m/s^2).

$h_{1,2}$ = Altura geométrica desde el punto de referencia (m).

$V_{1,2}$ = Velocidad del fluido (m/s).

ΔH_D = Altura total desarrollada por la bomba (m).

H_{per} = Pérdidas generadas entre los puntos analizados (A-B) ($\text{N} \cdot \text{m/kg}$).

Si consideramos que la velocidad del fluido dentro de la tubería es constante, entonces estos valores se anulan cuando el análisis está comprendido entre los puntos A y B de la figura 5.1. La altura geométrica (h_A) al estar al mismo nivel que la línea referencial toma un valor nulo. La presión de diseño al interior del estanque es la establecida por la norma API 650, la cual es igual a 2,5 (PSI) o 17,24 (kPa) manométricos.

Reemplazando valores en la ecuación 5.6 resulta:

$$\frac{16,48}{9,81} + \frac{2,73^2}{2 \cdot 9,81} + 0 + \Delta H_D = \frac{17.236,89}{1.020 \cdot 9,81} + \frac{2,73^2}{2 \cdot 9,81} + 6,29 + \frac{76,94}{9,81}$$

Por lo tanto, se puede establecer que la altura total desarrollada por la bomba es igual a **14,18 (m)** valor que representa la energía mecánica total desarrollada por la bomba por unidad de peso de fluido. Al multiplicar este valor por la aceleración de gravedad igual a $9,81 \text{ (m/s}^2\text{)}$ entonces se obtiene la energía mecánica total por unidad de masa de fluido con un valor igual a **139,11 (N · m/kg)**.

Desde ya, se puede obtener el punto de operación de la bomba, esto a partir de la altura total desarrollada por la bomba y el caudal. De lo anterior se establece que el punto de operación tiene coordenadas **(14,18 : 12,90)** en el gráfico de curvas características de bombas con variables de altura total desarrollada por la bomba y caudal (ver figura 5.14).

El cálculo de la potencia de la bomba se logra según la siguiente ecuación [22]:

$$P = \frac{w \cdot Q \cdot d}{\eta} \text{ (W)} \quad [\text{Ec. 5.7}]$$

Donde:

P= Potencia que entrega la bomba (W).

w= Energía mecánica total por unidad de masa de fluido (N · m/kg).

Q= Caudal volumétrico (m³/s).

d= Densidad del fluido (kg/m³).

η= Eficiencia de la bomba.

5.2 Etapa de egreso del efluente desde el biodigestor

En esta etapa, la biomasa contenida en el biodigestor debe ser extraída hacia el pozo purinero a igual razón de cómo es incluida, es decir, a $6,45 \text{ (m}^3\text{/día)}$ en un intervalo de tiempo a definir.

Mediante la propia acción del peso del contenido y la diferencia de presiones generada entre los puntos A y B de la tubería, se logra hacer fluir el contenido sin la

necesidad de un mecanismo externo de extracción, tal como es representado en la figura 5.4. Lo anterior permite mantener en equilibrio el proceso, logrando evitar sobrepasar la altura máxima de llenado.

En esta ocasión, se presenta como incógnita la velocidad y el caudal que toma el fluido una vez que la válvula de globo bridada en la tubería de vaciado es abierta, con la finalidad de mantener un caudal volumétrico de ingreso y egreso constante en el proceso.

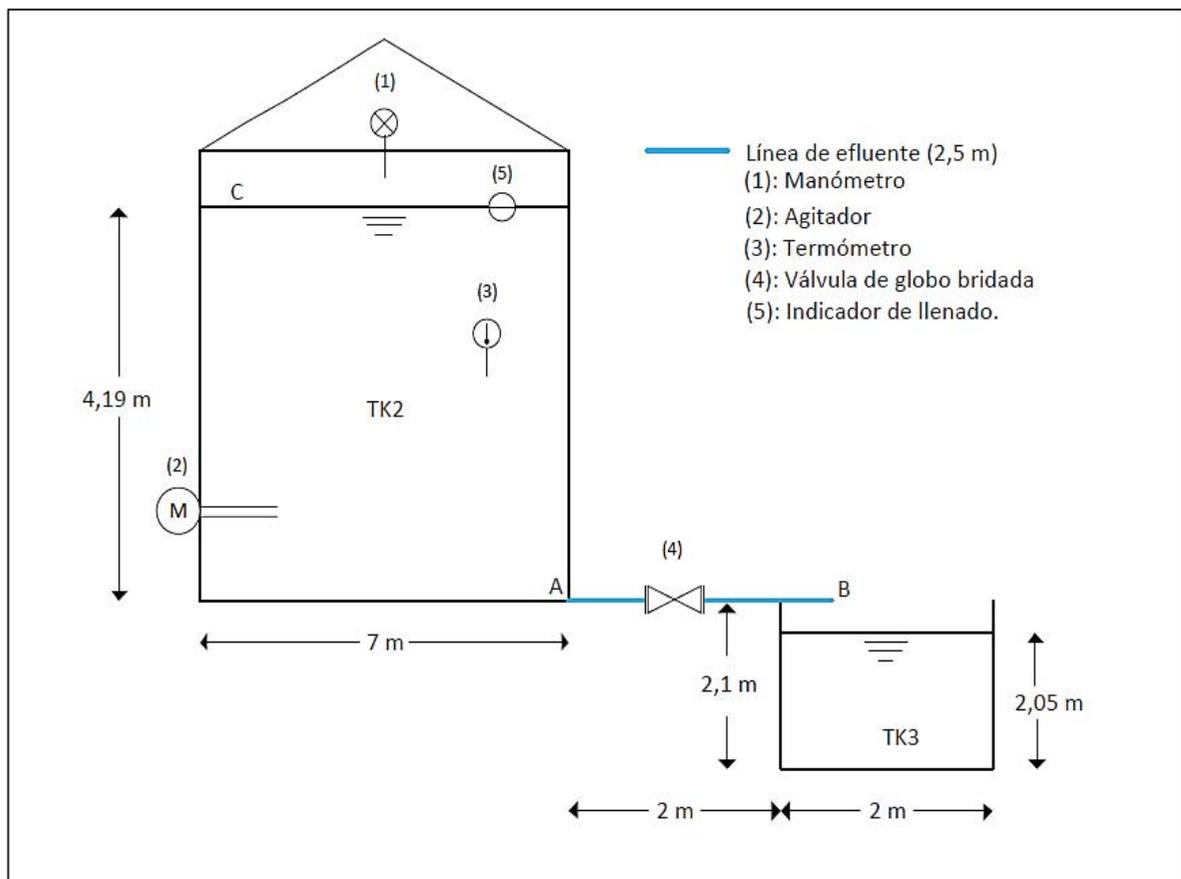


Figura 5.4: Etapa de egreso del efluente desde el biodigestor.

Para fines prácticos, se fijará una tubería para la etapa de egreso del efluente igual al de la etapa de ingreso del afluente al biodigestor, es decir, una tubería de hierro galvanizado de diámetro nominal y comercial de 1 ½ (in) de cédula 40, cuyo diámetro interno es igual a 4,09 (cm).

Una vez determinado el diámetro, se establece que la salida desde el biodigestor a la tubería de descarga es sin abocinar o de borde agudo, con un coeficiente de fricción (k) igual a 0,5. De igual forma, el coeficiente de fricción para pérdidas menores de una válvula de globo bridada para un diámetro de 1,61 (in) es de 9,8 aproximadamente, tal como se muestra en la figura 5.2.

Los valores anteriormente considerados para la pérdida de carga menor en el circuito se resumen en la tabla 5.4.

Accesorio	Coeficiente de fricción (k)
Válvula de globo bridada	9,8
Salida del depósito sin abocinar	0,5
∑ Pérdidas menores (PM)	10,3

Tabla 5.4: Valores de pérdidas de carga menores por accesorios [22].

Antes de continuar, se hace necesario calcular la velocidad del fluido en el punto A (ver figura 5.4) el cual es constante en la tubería e igual a la velocidad en el punto B. Aplicando la ecuación 5.5 de Bernoulli entre los puntos A y C y tomando como referencia el punto A resulta:

$$\frac{P_A}{d} + \frac{V_A^2}{2} + 9,81 \cdot 0 = \frac{17.236,89}{994} + \frac{0^2}{2} + 9,81 \cdot 4,19$$

La expresión anterior se reduce a:

$$\frac{P_A}{d} = 58,44 - \frac{V_A^2}{2} \quad (1)$$

Se hace necesario utilizar una expresión que relacione tanto los puntos A y B como las pérdidas generadas en la red. Esta expresión se conoce como ecuación de Bernoulli modificada y se detalla a continuación [22]:

$$\frac{P_1}{d} + \frac{V_1^2}{2} + g \cdot h_1 = \frac{P_2}{d} + \frac{V_2^2}{2} + g \cdot h_2 + H_{per} \quad [\text{Ec. 5.8}]$$

Donde:

$P_{1,2}$ = Presión manométrica (Pa).

d = Densidad del fluido (kgf/m^3).

g = Aceleración de gravedad (m/s^2).

$h_{1,2}$ = Altura geométrica desde el punto de referencia (m).

$V_{1,2}$ = Velocidad del fluido (m/s).

H_{per} = Pérdidas generadas entre los puntos analizados ($\text{N} \cdot \text{m/kg}$).

Considerando que la velocidad en A y B son iguales, además, que tanto la altura geométrica de los puntos A y B (considerando A como referencia) como la presión en B son nulas para fines de cálculo, entonces, la ecuación 5.8 se reduce a:

$$\frac{P_A}{d} = H_{per} \quad (2)$$

Si se reemplazan las ecuaciones (1) y 5.4 en (2) resulta:

$$58,44 - \frac{V_A^2}{2} = \left(\sum_A^B PM + \frac{fL}{D} \right) \cdot \frac{V^2}{2} \quad (3)$$

Reemplazando valores en (3) se tiene:

$$58,44 - \frac{V_A^2}{2} = \left(10,3 + \frac{f \cdot 2,5}{0,0409} \right) \cdot \frac{V^2}{2} \quad (4)$$

Como $V_A=V$ y dando un valor arbitrario al factor de Darcy (f) igual a **0,029** se tiene de (4) que el valor de la velocidad es igual a **2,98 (m/s)**.

Se considerará la viscosidad cinemática del efluente, igual al del agua sucia con un bajo contenido de sólidos a temperatura mesofílica de 35 (°C). Para este caso, la viscosidad cinemática se puede obtener a partir de la ecuación 5.2.

Reemplazando valores desde la ecuación 5.2 resulta:

$$v = \frac{40}{35 + 20} \cdot 10^{-6} \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}} \right)$$

De lo anterior, se tiene que para una temperatura de 35 (°C) la viscosidad cinemática del purín es aproximadamente igual a **0,73 x 10⁻⁶ (m²/s)**. Este valor junto a la ecuación 5.3, permite calcular el número de Reynolds.

Reemplazando valores en la ecuación 5.3 resulta:

$$R_e = \frac{2,98 \cdot 0,0409}{0,73 \times 10^{-6}}$$

Por lo tanto, el número de Reynolds es igual a **1,67 x 10⁵**, valor mayor a 4.000 lo que sitúa al flujo dentro del rango turbulento [22].

A partir de la figura 5.3, se tiene que el factor de Darcy para una rugosidad relativa igual a **0,004** y un valor de Reynolds igual a **1,67 x 10⁵** es aproximadamente igual a **0,0289** valor muy cercano al factor de Darcy de **0,029** tomado de forma arbitraria, por lo tanto, la velocidad generada entre los puntos A y B cuyo valor es de **2,98 (m/s)** es considerada aceptable.

A partir de la ecuación 5.1 se puede obtener el valor del caudal generado.

Reemplazando valores en la ecuación 5.1 resulta:

$$Q = 2,98 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0,0409}{2}\right)^2 (\text{m}^3/\text{s})$$

Por lo tanto, el valor del caudal volumétrico generado es aproximadamente igual a **$3,92 \times 10^{-3} \text{ (m}^3/\text{s)}$** de efluente. A partir del valor obtenido como caudal, para trasegar $6,45 \text{ (m}^3)$ es necesario mantener abierta la válvula durante **27 minutos y 25,41 segundos**.

5.3 Etapa de conducción del biogás

En la etapa de conducción, los $171,48 \text{ (m}^3/\text{día)}$ de biogás fluyen a una razón constante de $1,98 \times 10^{-3} \text{ (m}^3/\text{s)}$, etapa detallada en la figura 5.5.

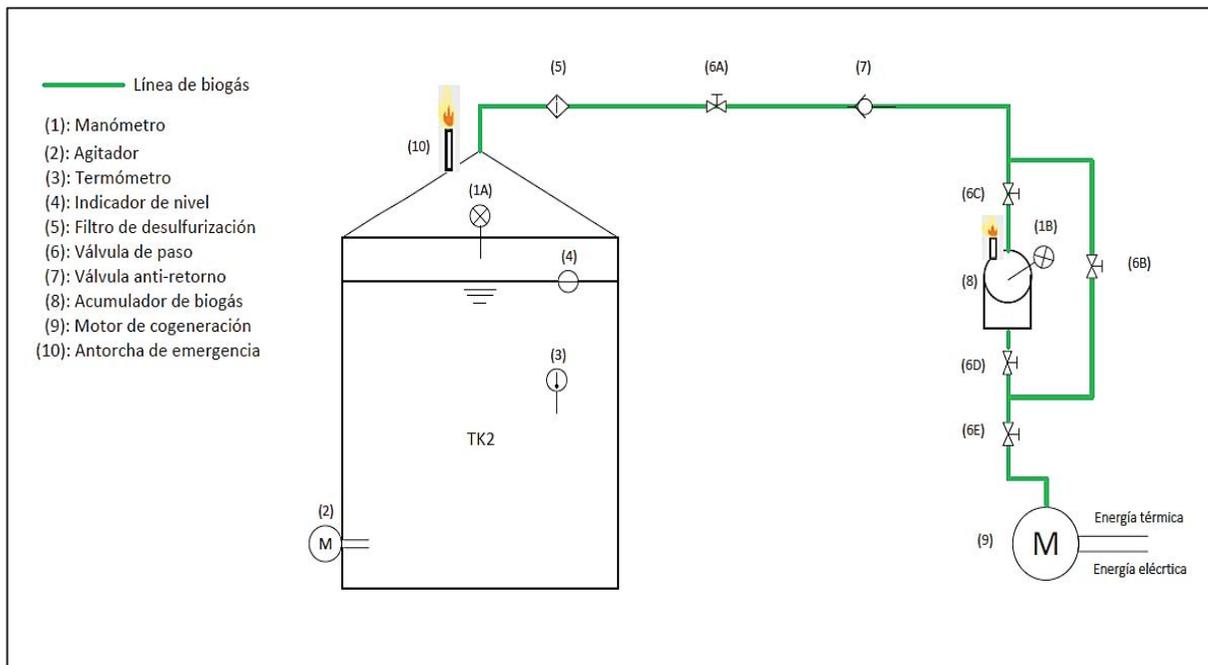


Figura 5.5: Etapa de conducción del biogás desde el biodigestor al motor de cogeneración.

Considerando la figura 5.5, cuando el manómetro (1A) del biodigestor marca una presión igual a 2,5 (PSI) el flujo de biogás se producirá desde el biodigestor al

acumulador esférico de biogás (8) siempre y cuando el manómetro (1B) del acumulador esférico marque una presión manométrica menor a 2,5 (PSI). Para lograr lo anterior, las llaves de paso (6B y 6D) deben permanecer cerradas. Una vez que ambas presiones (1A y 1B) se igualan, entonces la llave de paso (6C) se cierra y la llave de paso (6B) se abre para el flujo normal de biogás hacia el motor de cogeneración.

La llave de paso (6E) permanece siempre abierta, a menos que se requiera anular el paso de biogás al motor de cogeneración, en este caso, el biogás producido se quemará en la antorcha ubicada en el biodigestor, lo que permitirá que la presión dentro del reactor sea siempre igual a 2,5 (PSI) manométricos.

La antorcha tendrá la capacidad de quemar la misma cantidad de biogás producido en cada segundo es decir $1,98 \times 10^{-3}$ (m³/s), y esta se activará cuando la presión marcada por el manómetro (1A) supere la presión de diseño.

El acumulador o almacenador de biogás, es de tipo externo, debido a que está ubicado en un lugar separado del estanque de digestión y su función es la de mantener un respaldo suficiente de biogás para la operación del motor de cogeneración cuando la producción de biogás no sea la adecuada o no se realice.

En general, se recomienda que la capacidad de almacenamiento del acumulador sea de entre un 25 a un 50% de la producción diaria de biogás. Su capacidad de almacenamiento permite volúmenes de hasta 2.000 (m³) de biogás y son construidos con materiales como el PVC, goma sintética (PIB), mezcla de polietileno y polipropileno, etc. Su aplicabilidad está diseñada para todo tipo de biodigestores y todo tipo de biogás [16].

Se diseña el acumulador tipo esfera, con una capacidad de almacenamiento igual al 50% de la producción diaria de biogás, es decir un acumulador de 85,74 (m³) con una presión de diseño de 2,5 (PSI) manométricos equivalentes a 0,17 (atm).

A partir de datos de la Dirección Meteorológica de Chile, se considera una presión atmosférica para la Región Metropolitana de valor aproximadamente igual a **0,96 (atm)**, entonces, el valor de la presión absoluta será igual a **1,13 (atm)** a una temperatura ambiente de **13,9 (°C)**.

Aplicando la llamada Ley General de los Gases Ideales representada y detallada a continuación [23]:

$$P = \frac{n \cdot R \cdot T}{V} \text{ (atm)} \quad [\text{Ec. 5.9}]$$

Donde:

P= Presión absoluta (atm).

n= Número de moles (masa molar biogás = 0,016043 kg/mol).

R= Constante universal de los gases ideales (0,0821 atm·L/moles·K).

T= Temperatura (K).

V= Volumen del contenedor (L).

Luego, reemplazando valores en la ecuación 5.9 resulta:

$$n = \frac{1,13 \cdot 85,74 \cdot 1000}{0,0821 \cdot (13,9 + 273,15)} \text{ (moles)}$$

De lo anterior se puede afirmar que cuando se alcanza una presión manométrica de **2,5 (PSI)** en **85,74 (m³)** de acumulador a **13,9 (°C)** se tienen **4.111,13** moles, los que representan **65,95 (kg)** de biogás cuando la masa molar del biogás sea igual a **0,016043 (kg/mol)**.

Para mantener una presión de 2,5 (PSI) manométricos al interior del biodigestor, se debe considerar un contenido de masa de biogás constante al interior del espacio remanente del biodigestor.

A partir de la tabla 4.4 del capítulo IV, se sabe que el volumen neto de trabajo del cilindro del biodigestor corresponde a 161,25 (m³), siendo el volumen total del cilindro igual a 187,80 (m³) por lo tanto, la diferencia de 26,55 (m³) sumado al volumen del techo tipo cono de 7,70 (m³) entrega en espacio total de **34,25 (m³)** para el almacenamiento de biogás al interior del biodigestor.

En función a la ecuación 5.9 se puede obtener el número de moles contenidos a una presión de 2,5 (PSI) manométricos y a una temperatura de 35 (°C).

Reemplazando valores en la ecuación 5.9 resulta:

$$n = \frac{1,13 \cdot 34,25 \cdot 1000}{0,0821 \cdot (35 + 273,15)}$$

De lo anterior, se puede afirmar que cuando se tiene una presión manométrica de 2,5 (PSI) en 34,25 (m³) a 35 (°C) se tienen **1.529,80 moles**, los que representan **24,54 (kg)** de biogás, permitiendo un flujo diario de **171,48 (m³/día)** de biogás.

5.4 Etapa de cogeneración

En la etapa de cogeneración (CHP), se obtiene de forma simultánea energía eléctrica y térmica. En la cogeneración, el equipo de combustión interna es operado para la producción de energía mediante las técnicas termoeléctricas de producción energética. Se puede incorporar intercambiadores de calor al sistema para aprovechar el calor remanente de los gases de combustión que no son transformados en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica para procesos de uso térmico.

Existen otras alternativas para la cogeneración a partir del biogás como lo son el motor Stirling, micro-turbinas de gas o celdas combustibles las cuales no han tenido un desarrollo comercial mayor debido principalmente a sus altos costos de inversión y menores eficiencias eléctricas.

Los equipos de cogeneración más utilizados corresponden a motores de combustión interna con generador eléctrico y termo-recuperadores incorporados en un módulo comercializado y que incorpora tanto al motor de combustión interna, el generador eléctrico, compresor de gas, termo-recuperadores, etc.

Las variantes de generación de energía termoeléctrica están marcadas en dos tipos, las que utilizan motores a gas de combustión en ciclo Otto y motores con encendido diesel. En el caso de los primeros, la combustión se origina mediante la ignición del gas producto de bujías eléctricas. En el caso de un motor Diesel, la cámara de combustión utiliza un aproximado de 10% de combustible diesel que al comprimirse origina la combustión de la mezcla. En ambos casos, el motor acciona un generador eléctrico y entrega energía térmica a través de intercambiadores de calor en los circuitos de refrigeración del motor y de la evacuación de los gases [16].

Tal como se estudió en el capítulo III, a partir de la tabla 3.8 y considerando una estabulación del 100% del ganado, es posible generar una potencia nominal de 39,14 (kW) en un día de operación. Si se considera la figura 5.6 se logra obtener la eficiencia eléctrica de un grupo generador. Considerando la correlación obtenida desde la figura 5.6 se logra obtener el rendimiento exacto del grupo generador detallado a continuación [16]:

$$R_e = 0,0306 \cdot \ln(P_n) + 0,1828 \quad [\text{Ec. 5.10}]$$

Donde:

R_e = Rendimiento eléctrico del equipo generador.

P_n = Potencia nominal de la instalación (kW).

Reemplazando valores en la ecuación 5.10 resulta:

$$R_e = 0,0306 \cdot \ln(39,14) + 0,1828$$

Por lo tanto, el rendimiento eléctrico es aproximadamente igual a un **30%**. La potencia eléctrica que se puede obtener desde la instalación será función del rendimiento y la potencia nominal tal como se detalla a continuación [16]:

$$P_e = P_n \cdot R_e \quad [\text{Ec. 5.11}]$$

Donde:

P_e = Potencia eléctrica de la instalación.

P_n = Potencia nominal de la instalación (kW).

R_e = Rendimiento eléctrico del equipo generador.

Considerando el valor obtenido en el rendimiento eléctrico y reemplazando en la ecuación 5.11 resulta:

$$P_e = 39,14 \cdot 0,30 \quad (\text{kW})$$

Por lo tanto, la potencia eléctrica de la instalación es igual a **11,74 (kW)** eléctricos.

La potencia térmica que se puede obtener de la instalación será función del rendimiento y la potencia nominal. Para la estimación de la potencia térmica de un sistema de cogeneración se recomienda considerar una eficiencia térmica de entre 40 a un 45%, tomando en cuenta que para eficiencias eléctricas más altas, el valor correspondiente a la eficiencia térmica será menor. La ecuación para obtener la potencia térmica se detalla a continuación [16]:

$$P_t = P_n \cdot R_t \quad [\text{Ec. 5.12}]$$

Donde:

P_t = Potencia térmica de la instalación.

P_n = Potencia nominal de la instalación (kW).

R_t = Rendimiento térmico del equipo generador.

Considerando un 45% en el rendimiento térmico y reemplazando en la ecuación 5.12 resulta:

$$P_t = 39,14 \cdot 0,45 \quad (\text{kW})$$

Por lo tanto, la potencia térmica de la instalación es igual a **17,61 (kW)** térmicos.

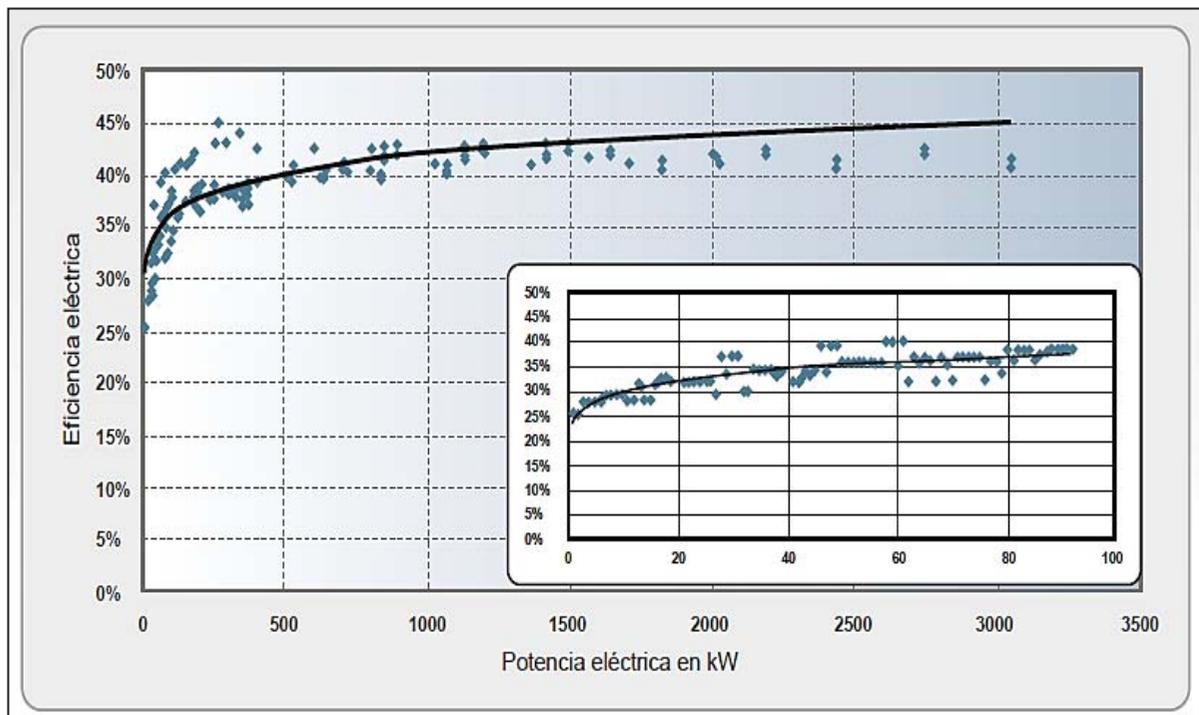


Figura 5.6: Eficiencia eléctrica de grupos generadores en base a biogás [16].

Si se considera un factor de planta de un 93% para la instalación (según literatura especializada [16]), entonces la energía eléctrica generada puede ser obtenida según la siguiente ecuación [16]:

$$E_e = P_e \cdot 0,93 \cdot 8.760 \quad (\text{kWh}) \quad [\text{Ec. 5.13}]$$

Reemplazando valores en la ecuación 5.13 resulta:

$$E_e = 11,74 \cdot 0,93 \cdot 8.760 \quad (\text{kWh})$$

Por lo tanto, la energía eléctrica de la instalación es igual a **95.643,43 (kWh)** al año.

De igual forma, si se considera un factor de planta de un 93% (según literatura especializada [16]) para la instalación, entonces la energía térmica generada puede ser obtenida según la siguiente ecuación [16]:

$$E_t = P_t \cdot 0,93 \cdot 8.760 \quad (\text{kWh}) \quad [\text{Ec. 5.14}]$$

Reemplazando valores en la ecuación 5.14 resulta:

$$E_t = 17,61 \cdot 0,93 \cdot 8.760 \quad (\text{kWh})$$

Por lo tanto, la energía térmica de la instalación es igual a **143.465,15 (kWh)** al año.

5.5 Sistemas de agitación

Es de mayor importancia mantener una mezcla del sustrato al interior del biodigestor lo más uniforme y homogéneamente posible. De igual forma, es importante mantener la mezcla a una temperatura uniforme en todo el biodigestor para así mantener un proceso estable de producción de biogás. Dependiendo del tipo de mezcla, se pueden utilizar distintos tipos de agitadores en el biodigestor tal como son detallados a continuación.

5.5.1 Tipos de agitadores

5.5.1.1 Agitador de hélice sumergible, características

- Este tipo de agitador de alta velocidad de mezcla (hasta 1.500 rpm) posee un motor hermético construido en material resistente a la corrosión lo que permite ser sumergido de forma permanente durante la operación sin sufrir un deterioro producto de las condiciones de trabajo
- Posee una posición ajustable a través de rieles o guías con un funcionamiento discontinuo en intervalos

- El enfoque de este tipo de agitador esta dado para sustratos bombeables, con contenido de solidos bajos de hasta un 10%
- Es especial para operar bajo rangos mesofílicos de temperatura dentro del estanque reactor
- Los diámetros de hélice varían desde los 50 a los 70 (cm) con
- La potencia de trabajo del motor varia en intervalos de entre 7 a 22 (kW)
- Una de las ventajas es que posee una muy buena mezcla para sustratos líquidos, pero para estanques de gran volumen se requieren varios aparatos lo que se traduce en un mayor número de perforaciones en el biodigestor
- Tiende a producir capas duras superficiales en intervalos no operativos
- La mantención del motor u otro elemento constructivo exige la apertura del biodigestor por medio del manhole o entrada-hombre [16].

5.5.1.2 Agitador axial de rotación lenta, características

- Este tipo de agitador, permite operaciones en torno a las 8 a 14 rpm ubicándose en el centro del biodigestor pero su motor se ubica fuera de este
- Las paletas de agitación varían hasta los 22 (cm)
- La potencia de trabajo del motor varia en intervalos de entre 15 a 18 (kW)
- Las áreas de aplicación están enfocadas para estanques con cubierta soportante (hormigón) con sustratos bombeables con contenido de solidos mayores al 10% [16].

5.5.1.3 Agitador excéntrico, características

- Este tipo de agitador es de velocidad semi-rápida a lento con intervalos que varían de 100 a 300 rpm hasta 10 a 50 rpm
- Su disposición espacial es oblicua al biodigestor a través de las paredes de este, dejando el motor fuera del reactor. Los diámetros de las hélices varían de 0,7 a los 2,5 (m) con potencias de funcionamiento en torno a los 15 (W)
- Las áreas de aplicación de este tipo de agitador están enfocadas para estanques verticales con contenido de sólidos mayores al 10%.

5.5.2 Selección del agitador para el proceso

Para fines del diseño, el tipo de agitador más adecuado a las características de la planta es el agitador de hélice sumergible axial paso cuadrado de tres palas con entrada lateral, es decir con el eje del motor posicionado de forma horizontal en la pared del biodigestor, tal como se muestra en la figura 5.7.

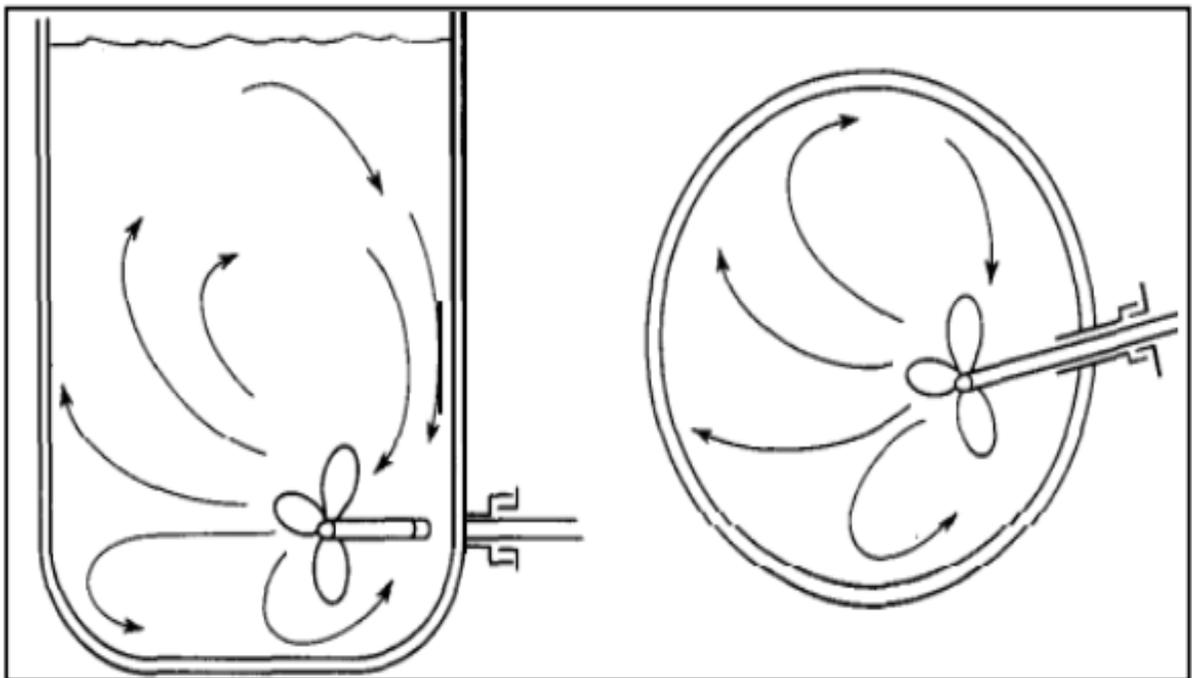


Figura 5.7: Agitador con entrada lateral.

5.5.3 Potencia del agitador

Para el cálculo de la potencia del agitador, se fijan tanto la velocidad de giro y el diámetro de la hélice en 50 rpm y 1,6 (m) respectivamente. Con lo anterior, se procede a calcular el número de Reynolds según la siguiente ecuación [23]:

$$Re = \frac{N \cdot D^2}{\nu} \quad [\text{Ec. 5.15}]$$

Donde:

N= Velocidad de rotación (rps).

D= Diámetro del agitador (m).

ν = Viscosidad cinemática del fluido (m^2/s).

Reemplazando valores en la ecuación 5.15 resulta:

$$Re = \frac{(50/60) \cdot (1,6)^2}{0,73 \times 10^{-6}}$$

De lo anterior se tiene que el número de Reynolds es igual a **2,92 x10⁶** valor comprendido en el rango turbulento. Al ser, en este caso un número de Reynolds tipo turbulento, la potencia requerida por el agitador se calcula según la siguiente ecuación [23]:

$$P = K_T \cdot N^3 \cdot D^5 \cdot d \quad (\text{W}) \quad [\text{Ec. 5.16}]$$

Donde:

P= Potencia requerida (W).

K_T = Constante para hélice paso cuadrado, tres palas.

N= Velocidad de rotación (rps).

D= Diámetro de la hélice (m).

d= Densidad del sustrato (kg/m^3).

La tabla 5.5, indica las constantes KL y KT, para estanques con cuatro placas deflectoras con un ancho de 1/10 del diámetro del estanque.

Tipo de impulsor	KL	KT
Hélice paso cuadrado, 3 palas	41,00	0,32
Hélice paso 2, tres palas	43,50	1,00

Tabla 5.5: Valores de KL y KT para distintos tipo de impulsores [23].

Para fines prácticos, la densidad del purín a 35 (°C) se considerará como la del agua sucia de procesos.

Reemplazando valores en la ecuación 5.16 resulta:

$$P = 0,32 \cdot (50/60)^3 \cdot (1,6)^5 \cdot 994 \text{ (W)}$$

De lo anterior se tiene que la potencia requerida por el agitador bajo las condiciones planteadas es igual a **1,93 (kW)**.

5.6 Determinación de los requerimientos de potencia calorífica

5.6.1 Calor aportado a los purines

Para mantener el purín que ingresa a una temperatura mesofílica de 35°C al interior del biodigestor se hace necesario el aporte energético proveniente desde el motor de cogeneración, mediante un serpentín sumergido en el interior del biodigestor.

La temperatura de ingreso del purín al biodigestor es igual a la temperatura promedio anual para la Región Metropolitana cuyo valor es igual a 13,90 (°C) obteniendo una temperatura final de 35 (°C). Se debe considerar que para aumentar

la energía del sistema y elevar la temperatura del sustrato incorporado al biodigestor desde los 13,9 (°C) hasta los 35(°C) se debe realizar una transferencia de calor.

Cuando un sistema cerrado estacionario comprende sólo transferencia de calor y no interacciones de trabajo a través de su frontera, además, en condiciones de estado estacionario y en ausencia de cualesquiera interacciones de trabajo, la relación de conservación de la energía para un volumen de control con una admisión y una salida y con cambios despreciables en las energías cinética y potencial, se puede expresar como [25]:

$$Q_1 = m \cdot c_p \cdot \Delta T \text{ (W)} \quad [\text{Ec. 5.17}]$$

Donde:

Q_1 = Potencia calorífica (W).

m = Flujo de biomasa diario de $7,67 \times 10^{-2}$ (kg/s).

c_p = calor específico purín $\cong 4.187,76$ (J/K·kg) a 13,90 (°C).

ΔT = Diferencia temperatura generada por el purín (K).

Reemplazando valores en la ecuación 5.17 resulta:

$$Q_1 = 7,67 \cdot 10^{-2} \cdot 4.187,76 \cdot [35 + 273,15 - (13,90 + 273,15)] \text{ (W)}$$

Por lo tanto, se puede concluir que para elevar desde una temperatura de **13,90 (°C)** hasta **35 (°C)** la temperatura de un flujo de **6.629,40 (kg)** de purín al día o bien **7,67 x 10⁻² (kg/s)** se requiere aportar **6,78 (kW)** de potencia al sistema.

5.6.2 Pérdida de potencia calorífica del biodigestor aislado

Para el cálculo de la pérdida de calor, se considerará que la transferencia de calor es estacionaria, dado a que las temperaturas superficiales permanecen constantes en los valores especificados. La transferencia de calor es unidireccional, es decir, el gradiente generado va desde el interior al exterior del biodigestor a su vez que la

conductividad térmica es constante para todo el estanque reactor. Para estimar las pérdidas de calor superficiales se supondrá un estanque metálico, cilíndrico, vertical y provisto de lana de vidrio como aislante térmico posicionado en la intemperie tal como es representado en la figura 5.8.

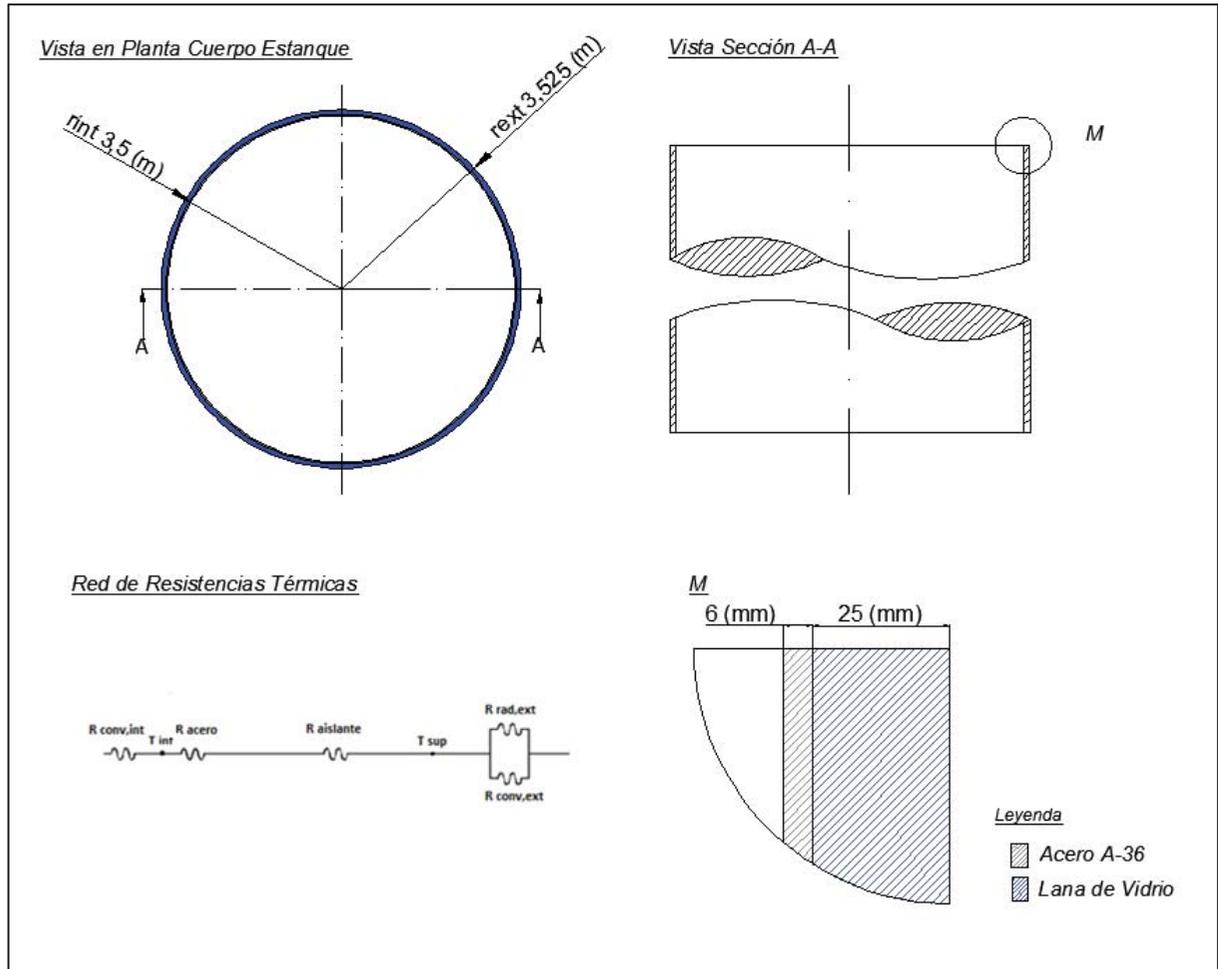


Figura 5.8: Configuración del sistema y de los principales parámetros en análisis.

En este caso, la resistencia convectiva interior es despreciable, ya que se almacena agua (o algún tipo de salmuera) con coeficientes de convección muy grandes en comparación con el exterior, por lo cual puede ser despreciada en los cálculos. Para obtener el valor de la resistencia térmica tanto del acero como del aislante se debe resolver la siguiente ecuación [24]:

$$R_1 = \frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_i} \left(\frac{m \cdot K}{W}\right) \quad [\text{Ec. 5.18}]$$

Donde:

R_1 = Resistencia térmica cilindro acero y aislante ($m \cdot K/W$).

r_{ext} = Radio exterior del biodigestor considerando el aislante (m).

r_{int} = Radio del biodigestor sin considerar aislante (m).

k_i = Conductividad térmica de la capa del biodigestor en análisis ($W/m \cdot K$).

Desarrollando la ecuación 5.18 para el acero resulta:

$$R_{Acero} = \frac{\ln\left(\frac{3,506}{3,500}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 40} \left(\frac{m \cdot K}{W}\right)$$

Por lo tanto, la resistencia térmica del acero toma un valor igual a **$6,82 \times 10^{-6}$ ($m \cdot K/W$)**.

Luego, se calcula en base a la ecuación 5.18 la resistencia térmica para la lana de vidrio resultando:

$$R_{Lana \text{ de vidrio}} = \frac{\ln\left(\frac{3,525}{3,500}\right)}{2 \cdot \pi \cdot 0,04} \left(\frac{m \cdot K}{W}\right)$$

Consiguiente, la resistencia térmica del aislante, en este caso lana de vidrio, toma un valor igual a **$0,0283$ ($m \cdot K/W$)** luego, la resistencia térmica por conducción total (R_1) será la suma de la resistencia térmica del acero y la resistencia térmica de la lana de vidrio, dando una resistencia térmica por conducción total igual a **$0,0283$ ($m \cdot K/W$)**. La tabla 5.6 representa las propiedades físicas de interés de la lana de vidrio.

	Lana de vidrio, panel Sonoglass de tela ignífuga	Unidades
Coefficiente conductividad térmica	0,04	(W/m· K)
Densidad media aparente	16	(kg/m ³)
Espesor comercial	25	(mm)

Tabla 5.6: Propiedades de la lana de vidrio. Sonoglass ®.

En consideración a la figura 5.8 y en el orden de la red de resistencias térmicas, se calcula el valor del coeficiente convectivo exterior del aire. Para lograr tal objetivo, se hace necesario obtener el régimen en el cual está operando el entorno del sistema, para aquello es necesario conocer la velocidad promedio con la cual el viento interactúa con el exterior del estanque reactor. Con tal finalidad, se obtienen los datos aportados por el explorador eólico de la Universidad de Chile desde la página web <http://walker.dgf.uchile.cl/> cuyo informe final para el sector de Peñaflo, Región Metropolitana se resume en la tabla 5.7.

Mes	Medio Diario	Mínimo Diario	Máximo Diario	Variabilidad
	m/s	m/s	m/s	m/s
Enero	1.5 ± 0.3	0.3 ± 0.1	3.4 ± 0.6	0.2 ± 0.1
Febrero	1.4 ± 0.3	0.3 ± 0.0	3.2 ± 0.6	0.2 ± 0.1
Marzo	1.3 ± 0.2	0.3 ± 0.0	2.8 ± 0.5	0.2 ± 0.1
Abril	1.1 ± 0.2	0.3 ± 0.1	2.4 ± 0.4	0.2 ± 0.1
Mayo	1.3 ± 0.2	0.3 ± 0.1	2.5 ± 0.5	0.2 ± 0.1
Junio	1.5 ± 0.3	0.4 ± 0.1	3.1 ± 0.6	0.6 ± 0.2
Julio	1.4 ± 0.3	0.3 ± 0.1	2.9 ± 0.5	0.4 ± 0.1
Agosto	1.3 ± 0.2	0.4 ± 0.1	2.6 ± 0.5	0.3 ± 0.1
Septiembre	1.4 ± 0.2	0.3 ± 0.1	2.6 ± 0.5	0.2 ± 0.1
Octubre	1.6 ± 0.3	0.3 ± 0.1	3.4 ± 0.6	0.3 ± 0.1
Noviembre	1.5 ± 0.3	0.3 ± 0.0	3.4 ± 0.6	0.2 ± 0.1
Diciembre	1.6 ± 0.3	0.3 ± 0.0	3.5 ± 0.6	0.2 ± 0.1
TODOS	1.4 ± 0.1	0.3 ± 0.0	3.0 ± 0.2	0.3 ± 0.1

Tabla 5.7: Velocidad del viento registrada a 5 metros de altura, año 2010.

Luego, desde la tabla 5.7 se obtiene que la velocidad es igual a **1,4 (m/s)** valor promedio registrado durante los meses del año 2010 a una altura de 5 metros. Para obtener el coeficiente convectivo del aire exterior se procede según las siguientes expresiones [24]:

$$h_{\text{conv}} = 3,96 \cdot \sqrt[4]{\frac{v}{H}} \left(\frac{W}{m^2} \cdot K \right) \quad [\text{Ec. 5.19}]$$

$$h_{\text{conv}} = 5,76 \cdot \sqrt[5]{\frac{v^4}{H}} \left(\frac{W}{m^2} \cdot K \right) \quad [\text{Ec. 5.20}]$$

Donde:

h_{conv} = Coeficiente convectivo externo del aire ($W/m^2 \cdot K$).

v = Velocidad del viento (m/s).

H = Altura del estanque (m).

La ecuación 5.19 es válida siempre y cuando el producto de la velocidad del viento y altura del depósito sea inferior o igual a 8 (m^2/s) mientras que la ecuación 5.20 es válida siempre y cuando el producto de la velocidad del viento y la altura del depósito sea mayor a 8 (m^2/s) [24]. Como el producto entre la altura del estanque de 4,88(m) y la velocidad del viento con valor de 1,4 (m/s) es igual a **6,83 (m^2/s)**, valor inferior a **8 (m^2/s)** entonces, utilizando y reemplazando valores en la ecuación 5.19 resulta:

$$h_{\text{conv}} = 3,96 \cdot \sqrt[4]{\frac{1,4}{4,88}} \left(W/m^2 \cdot K \right)$$

Por lo tanto, la constante numérica del coeficiente convectivo externo del aire en este caso, toma un valor igual a **2,898 ($W/m^2 \cdot K$)**.

Para obtener el coeficiente de transferencia de calor por radiación exterior se procede según la siguiente expresión [24]:

$$h_{\text{rad}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{\text{sup}} + T_{\text{ext}}) \cdot (T_{\text{sup}}^2 + T_{\text{ext}}^2) \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \text{K} \right) \quad [\text{Ec. 5.21}]$$

Donde:

h_{rad} = Coeficiente de transferencia de calor por radiación ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$).

ε = Emisividad del sistema (0,9).

σ = Constante de Stefan-Boltzmann $5,67 \times 10^{-8}$ ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4$).

T_{sup} = Temperatura superficial (K).

T_{ext} = Temperatura externa (K).

La suma entre el coeficiente de transferencia de calor por radiación y el coeficiente convectivo exterior del aire se denomina coeficiente de radiación y convección exterior combinado, esto según la siguiente ecuación [24]:

$$h_{\text{conv+rad,ext}} = 2,898 + \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{\text{sup}} + T_{\text{ext}}) \cdot (T_{\text{sup}}^2 + T_{\text{ext}}^2) \left(\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \text{K} \right) \quad [\text{Ec. 5.22}]$$

Se define como resistencia total exterior por convección y radiación (R_2) al valor recíproco entre el producto del área y el coeficiente de radiación y convección exterior combinado, por lo tanto utilizando la siguiente expresión se tiene [24]:

$$R_2 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{\text{ext}} \cdot h_{\text{conv+rad,ext}}} \left(\frac{\text{m} \cdot \text{K}}{\text{W}} \right) \quad [\text{Ec. 5.23}]$$

Donde:

R_2 = Resistencia total exterior por convección y radiación ($\text{m} \cdot \text{K}/\text{W}$).

R_{ext} = Radio exterior (m).

$h_{\text{conv+rad,ext}}$ = coeficiente de radiación y convección exterior combinado ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$).

En este caso se presenta como incógnita la temperatura superficial, por lo cual su valor se debe calcular utilizando la siguiente ecuación [24]:

$$\frac{T_{\text{sup}} - T_{\text{ext}}}{R_2} = \frac{T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}}{\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot r_{\text{int}} \cdot h_{\text{conv,int}}} + R_1 + R_2} \quad [\text{Ec. 5.24}]$$

Donde:

T_{sup} = Temperatura superficial (K).

T_{ext} = Temperatura externa (K).

T_{int} = Temperatura interna del biodigestor (K).

r_{int} = Radio del biodigestor sin considerar aislante (m).

$h_{\text{conv,int}}$ = Coeficiente convectivo interno ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$).

R_1 = Resistencia térmica por conducción total ($\text{m} \cdot \text{K}/\text{W}$).

R_2 = Resistencia total exterior por convección y radiación ($\text{m} \cdot \text{K}/\text{W}$).

Reemplazando valores en la ecuación 5.24 resulta:

$$\frac{(T_{\text{sup}}) - 287,05}{\left\{ \frac{1}{22,15 \cdot \left\{ 2,898 + \left[5,1 \cdot 10^{-8} \cdot (T_{\text{sup}} + 287,05) \cdot \left((T_{\text{sup}})^2 + (287,05)^2 \right) \right] \right\}} \right\}} = \frac{21,1}{\left\{ 0 + 0,0283 + \frac{1}{22,15 \cdot \left\{ 2,898 + \left[5,1 \cdot 10^{-8} \cdot (T_{\text{sup}} + 287,05) \cdot \left((T_{\text{sup}})^2 + (287,05)^2 \right) \right] \right\}} \right\}}$$

Resolviendo la ecuación se tiene que el valor solución es igual a **290,63 (K)** correspondiente a **17,48 (°C)**. Con el valor de la temperatura superficial ya calculado, se procede a obtener el valor del coeficiente de radiación y convección exterior combinado, reemplazando en la ecuación 5.22 resulta:

$$h_{\text{conv+rad,ext}} = 2,898 + 5,1 \cdot 10^{-8} \cdot (290,63 + 287,05) \cdot (290,63^2 + 287,05^2) \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$$

Consecuentemente, el coeficiente de radiación y convección exterior combinado es igual a **7,81 (W/m² · K)**.

Reemplazando valores en la ecuación 5.23 se tiene:

$$R_2 = \frac{1}{22,15 \cdot 7,81} \left(\frac{\text{m} \cdot \text{K}}{\text{W}} \right)$$

Por lo tanto, la resistencia total exterior por convección y radiación es igual a **5,78x10⁻³ (m · K/W)**. Es necesario ahora calcular la resistencia total del sistema que vendría siendo la suma de R1 y R2 el que toma un valor igual a:

$$R_T = (0,0283 + 5,78 \times 10^{-3}) \left(\frac{\text{m} \cdot \text{K}}{\text{W}} \right)$$

Luego, la resistencia total del sistema es equivalente a **0,0341 (m · K/W)**.

Con los datos anteriores ya calculados, es posible obtener la pérdida de calor por metro lineal del estanque según la siguiente ecuación [24]:

$$\frac{q}{H_{\text{cilindro}}} = \frac{T_{\text{int}} - T_{\text{ext}}}{R_T} \left(\frac{\text{W}}{\text{m}} \right) \quad [\text{Ec. 5.25}]$$

Donde:

q= Flujo de calor por metro (W/m).

H_{cilindro} = Altura del cilindro (m).

T_{int} = Temperatura interior (K).

T_{ext}= Temperatura exterior (K).

R_T= Resistencia total del sistema (m·K/W).

Reemplazando valores en la ecuación 5.25 resulta:

$$\frac{q}{H_{\text{cilindro}}} = \frac{308,15 - 287,05}{0,0341} \left(\frac{W}{m} \right)$$

Entonces, la pérdida de calor por metro es igual a **618,77 (W/m)**. El flujo de calor por el depósito se obtiene (debido al gran diámetro del depósito y a la incertidumbre de cómo se produce la convección en la parte inferior del depósito) considerando que la resistencia térmica por metro cuadrado es la misma independientemente de la superficie que consideremos (lateral, superior, inferior), e igual a la que se produce en el lateral del depósito expresada en la siguiente ecuación [24]:

$$Q_2 = \frac{\left(\frac{q}{H_{\text{cilindro}}} \right)}{2 \cdot \pi \cdot r_{\text{int}}} \cdot (A_t + A_c + A_f) \text{ (W)} \quad [\text{Ec. 5.26}]$$

Donde:

Q_2 = Flujo de calor (W).

r_{int} = Radio interno (m).

A_t = Área del techo (m^2).

A_c = Área del cilindro (m^2).

A_f = Área del fondo (m^2).

Considerando el resultado de la ecuación 4.5 representado en la tabla 4.11, se tiene que el área del techo es igual a 39,05 (m^2). El área para el cuerpo y fondo del estanque, considerando la geometría expuesta por la figura 4.4 son respectivamente 107,32 (m^2) y 38,48 (m^2).

Reemplazando valores en la ecuación 5.26 se tiene:

$$Q_2 = \frac{618,77}{2 \cdot \pi \cdot 3,5} \cdot (39,05 + 107,32 + 38,48) \text{ (W)}$$

En consecuencia, las pérdidas por flujo de calor son iguales a **5,2 (kW)**. Si se requieren aportar **6,78 (kW)** de potencia al sistema, además de las pérdidas por flujo de calor de **5,2 (kW)** se tiene, finalmente, que los requerimientos de potencia del sistema total son equivalentes a **11,98 (kW)**.

5.6.3 Flujo másico de agua para el proceso

Se requiere que el agua del proceso que fluye dentro del intercambiador de calor tipo serpentín, pierda calor a razón de 11,98 (kW) de potencia, a medida que fluye dentro de este. En consideración de las prestaciones del motor de cogeneración (ver anexo 1), se fija una temperatura de ingreso del agua al serpentín de 60 (°C) saliendo de este a 35 (°C) generando una temperatura media de 47,5 (°C). A esta temperatura, el calor específico del agua toma un valor de 4.180,5 (J/kg · °C).

Considerando la ecuación 5.17 para agua a 47,5 (°C) resulta:

$$m = 11,98 / [4,18 \cdot (60 - 35)] \text{ (kg/s)}$$

Por lo tanto, el flujo másico de agua es igual a **0,12 (kg/s)**. Lo anterior se resume en la figura 5.9.

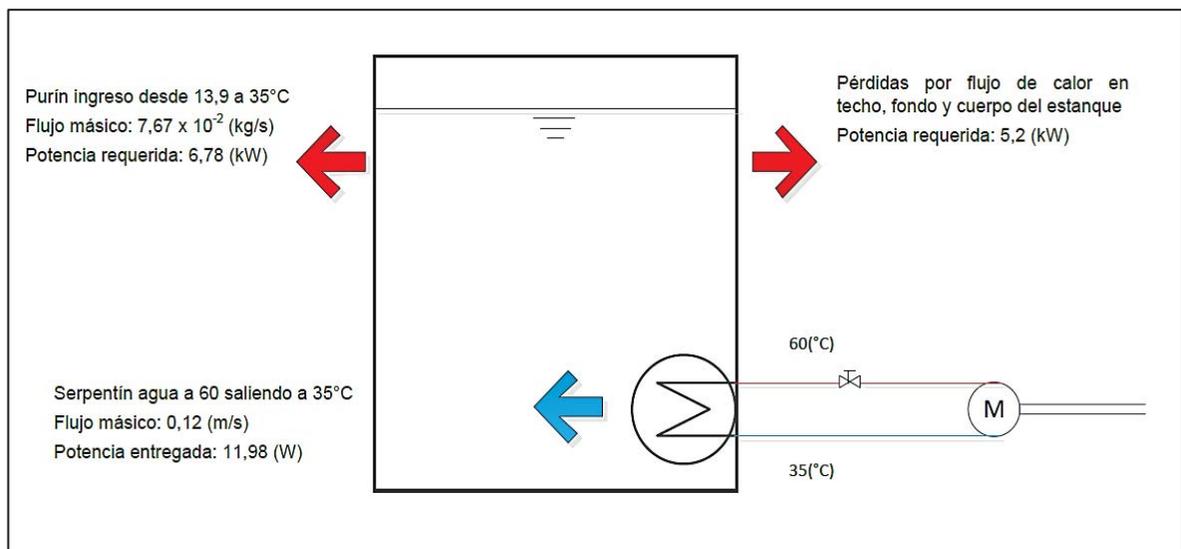


Figura 5.9: Balance de energía del sistema.

5.6.4 Sistema reactor, serpentín y agitación mecánica

Un sistema reactor, serpentín y agitación mecánica, permite generar una mezcla uniforme a una temperatura de proceso constante que permita el buen desarrollo de las bacterias productoras de biogás. Mediante el uso de un serpentín sumergido dentro del biodigestor, se logra transferir el aporte energético proveniente del motor de cogeneración, lo que permite revertir la pérdida de 11,98 (kW) de potencia calórica, permitiendo así, mantener el biodigestor a una temperatura de 35 (°C).

Se hace necesario obtener el área de transferencia de calor para el dimensionamiento de los tubos del serpentín que aportarán esa potencia calorífica al purín. Para lograr lo anterior, se debe calcular el valor del coeficiente global de transferencia de calor, de esta forma y mediante el método de la diferencia de temperatura media logarítmica, obtener el área de transferencia de calor.

Para el diseño del serpentín, se considerará su conformación en base a hierro galvanizado, siendo sus características detalladas en la tabla 5.8.

Cédula	Medida Nominal (in)	Diámetro exterior (mm)	Espesor (mm)	Diámetro interior (mm)
40	1	33,4	3,38	26,6

Tabla 5.8: Tuberías comerciales de hierro galvanizado cédula 40.

Para fines de cálculo, el diámetro del serpentín doblado se fijará en 0,5 (m). El valor del coeficiente global de transferencia de calor del sistema se obtiene desarrollando la siguiente ecuación [26]:

$$\frac{1}{U_0} = \frac{1}{h_0} + \frac{x_w \cdot d_0}{k_w \cdot d_w} + \frac{d_0}{h_i \cdot d} + R_0 + \frac{R_i \cdot d_0}{d} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{°C}/\text{W}) \quad [\text{Ec. 5.27}]$$

Donde

U_0 = Coeficiente global de transferencia de calor ($W/m^2 \cdot ^\circ C$).

h_0 = Coeficiente de película exterior ($W/m^2 \cdot ^\circ C$).

x_w = Espesor de la pared del tubo (m).

d_0 = Diámetro exterior (m).

k_w = Coeficiente de conductividad .

d_w = Diámetro medio de la tubería (m) = $(d_0/2+d/2)$.

h_i = Coeficiente de película interior ($W/m^2 \cdot ^\circ C$).

d = Diámetro interior (m).

R_0 = Coeficiente por incrustaciones ($m^2 \cdot ^\circ C / W$).

R_i = Coeficiente por incrustaciones ($m^2 \cdot ^\circ C / W$).

El coeficiente de película interior, se obtiene a partir de la siguiente ecuación [26]:

$$h_i = \frac{k}{d} \cdot \left(1 + \frac{3,5 \cdot d}{d_c}\right) \cdot 0,023 \cdot (Re)^{0,8} \cdot (Pr)^{0,4} \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right) \quad [\text{Ec. 5.28}]$$

Donde:

h_i = Coeficiente de película interior ($W/m^2 \cdot ^\circ C$).

k = Coeficiente de conductividad térmica ($W/m \cdot ^\circ C$).

d = Diámetro interior del tubo (m).

d_c = Diámetro del serpentín doblado (m).

Re = Número de Reynolds.

Pr = Número de Prandtl.

La temperatura media dentro del serpentín es igual a 47,5 ($^\circ C$) cuyos valores característicos son detallados en la tabla 5.9.

Agua a 47,5 (°C)	Unidades	Valor
Densidad	(kg/m ³)	989,1
Conductividad térmica	(W/m · °C)	0,641
Viscosidad dinámica	(Kg/m · s)	0,572 x 10 ⁻³
Viscosidad cinemática	(m ² /s)	0,58 x 10 ⁻⁶
Número de Prandtl	(-)	3,73

Tabla 5.9: Características físico-química del agua a 47,5 (°C) [25].

La velocidad del fluido en el serpentín se calcula en base a la siguiente expresión matemática [26]:

$$v = \frac{m}{d \cdot A} \text{ (m/s)} \quad [\text{Ec. 5.29}]$$

Donde:

m= Flujo másico de agua por el serpentín (kg/s).

d= Densidad del fluido (kg/m³).

A= Área transversal del tubo (m²).

Reemplazando valores en la ecuación 5.29 resulta:

$$v = \frac{0,12}{989,1 \cdot \pi \cdot (0,0266/2)^2} \text{ (m/s)}$$

Por lo tanto, la velocidad toma un valor igual a **0,22 (m/s)**.

Utilizando la ecuación 5.3 se obtiene el valor para el número de Reynolds.

Remplazando valores en la ecuación 5.3 resulta:

$$Re = \frac{0,22 \cdot 0,0266}{0,58 \cdot 10^{-6}}$$

Por lo tanto, el número de Reynolds toma un valor igual a **10.089,66**. Este número se encuentra comprendido dentro del rango turbulento.

Con este valor y reemplazando en la ecuación 5.28 resulta:

$$h_i = \frac{0,641}{0,0266} \cdot \left(1 + \frac{3,5 \cdot 0,0266}{0,5}\right) \cdot 0,023 \cdot (10.089,66)^{0,8} \cdot (3,73)^{0,4} \left(\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C}\right)$$

Por lo tanto, el valor del coeficiente de película interior toma es igual a **1.776,83 (W/m² · °C)**.

También se hace necesario analizar el coeficiente de película exterior. El valor está determinado por las propiedades físicas del líquido además, del grado de agitación alcanzado durante el proceso de mezcla. El coeficiente de película exterior se obtiene utilizando la ecuación de Chilton, Drew y Jebens detallada a continuación [26]:

$$\frac{h_0 \cdot d_v}{k} \cdot \left(\frac{\mu_s}{\mu}\right)^{0,14} = 0,87 \cdot \left(\frac{c_p \cdot \mu}{k}\right)^{1/3} \cdot \left(\frac{L^2 \cdot N \cdot d}{\mu}\right)^{0,62} \quad [\text{Ec. 5.30}]$$

Donde:

h_0 = Coeficiente de película exterior (W/m² · °C).

d_v = Diámetro del biodigestor (m).

k = Coeficiente de conductividad térmica (W/m · °C).

μ_s = Viscosidad dinámica del agua cercana al serpentín (Kg/m · s).

μ = Viscosidad dinámica del agua (Kg/m · s).

c_p = Calor específico (J/kg · °C).

L= Diámetro del agitador (m).

N= Revoluciones por segundo del agitador.

d= Densidad del purín al interior del biodigestor (kg/m³).

La temperatura del purín dentro del biodigestor es igual a 35 (°C). Se asume que las características del purín son iguales al del agua sucia de proceso con bajo contenido de sólidos a 35 (°C).

Las características del purín a 35 (°C) son detalladas en la tabla 5.10.

Agua a 35 (°C)	Valor	Unidades
Densidad	994,0	(kg/m ³)
Conductividad térmica	0,623	(W/m · °C)
Viscosidad dinámica	0,72 x 10 ⁻³	(Kg/m · s)
Calor específico	4.178	(J/kg · °C)

Tabla 5.10: Características físico-química del agua a 35 (°C) [25].

Reemplazando valores en la ecuación 5.30 resulta:

$$\frac{h_0 \cdot 7}{0,623} \cdot \left(\frac{0,798 \cdot 10^{-3}}{0,720 \cdot 10^{-3}} \right)^{0,14} = 0,87 \cdot \left(\frac{4.178 \cdot 0,72 \times 10^{-3}}{0,623} \right)^{1/3} \cdot \left(\frac{1,6^2 \cdot 0,83 \cdot 994}{0,72 \times 10^{-3}} \right)^{0,62}$$

Por lo tanto, el coeficiente de película exterior es igual a **1.319,36 (W /m² · °C)**.

Si no se considera el valor de las incrustaciones, entonces reemplazando valores en la ecuación 5.27 resulta:

$$\frac{1}{U_0} = \frac{1}{1.319,36} + \frac{0,00338 \cdot 0,0334}{47 \cdot 0,03} + \frac{0,0334}{1.776,83 \cdot 0,0266}$$

Por lo tanto, el coeficiente global de transferencia de calor toma un valor igual a **647,38 (W/m² · °C)**.

El área expuesta del serpentín al interior del biodigestor, se calcula según la siguiente ecuación [23]:

$$Q = U_0 \cdot A_S \cdot \Delta T_m \quad (\text{W}) \quad [\text{Ec. 5.31}]$$

Donde:

Q= Potencia (W).

U₀= Coeficiente global de transferencia de calor (W/ m² · °C).

A_S= Área expuesta del serpentín sumergido (m²).

ΔT_m = Diferencia de temperatura media logarítmica.

La diferencia de temperatura media se obtiene según la siguiente ecuación [23]:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1/\Delta T_2)} \quad [\text{Ec. 5.32}]$$

Donde:

$$\frac{\Delta T_1 = T_{h, \text{ent}} - T_{c, \text{sal}}}{\Delta T_2 = T_{h, \text{sal}} - T_{c, \text{ent}}} \quad [\text{Ec. 5.33}]$$

Reemplazando valores en la ecuación 5.33 resulta:

$$\Delta T_1 = (60 - 35)^\circ\text{C} = 25^\circ\text{C}$$

$$\Delta T_2 = (35 - 13,9)^\circ\text{C} = 21,1^\circ\text{C}$$

Reemplazando valores en la ecuación 5.32 se obtiene:

$$\Delta T_m = \frac{25 - 21,1}{\ln(25/21,1)}$$

Por lo tanto el valor de la temperatura media logarítmica es igual a **22,99 (°C)**.

Reemplazando valores en la ecuación 5.31 resulta:

$$A_s = \frac{11.980}{22,99 \cdot 647,38} \text{ (m}^2\text{)}$$

En consecuencia, el valor del área expuesta del serpentín para lograr la transferencia de calor es igual a **0,81 (m²)**.

Si se considera el serpentín como un tubo de diámetro nominal de 1 (in) de cédula 40 entonces se puede obtener el largo según la siguiente igualdad geométrica [23]:

$$A_s = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot L \text{ (m}^2\text{)} \quad [\text{Ec. 5.34}]$$

Donde:

A_s = Área expuesta del serpentín sumergido (m²).

r = Radio exterior del serpentín (m).

L = Largo del serpentín (m).

Reemplazando valores en la ecuación 5.34 resulta:

$$L = 0,81 / [2 \cdot \pi \cdot (0,0334/2)] \text{ (m)}$$

Por lo tanto, para realizar la transferencia de calor, el serpentín debe tener un largo igual a **7,72 (m)**. La figura 5.10 representa la disposición del proceso en análisis.

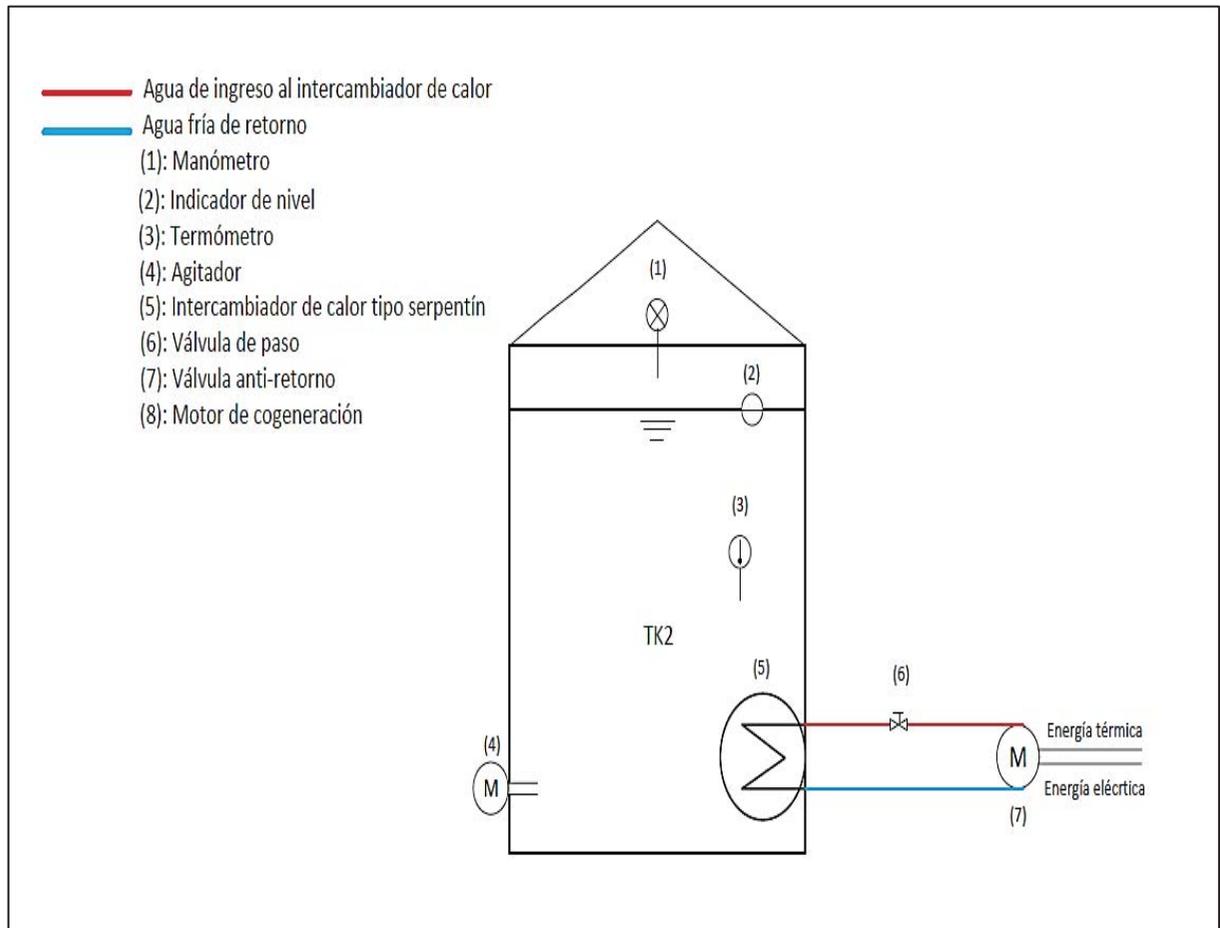


Figura 5.10: Disposición para el intercambiador de calor.

5.7 Selección de equipamiento

5.7.1 Selección de la bomba centrífuga

Tal como se detalló en el apartado 5.1 los requerimientos de la bomba centrífuga necesarios estarán en función del caudal requerido a trasegar y la altura total desarrollada por la bomba en el sistema en metros. Al contar con estos valores se puede intersectar el punto de operación de la bomba en la curva característica de la misma. El valor de la potencia de la bomba está en función del rendimiento de la máquina, por lo tanto, se pueden obtener distintos valores de potencia según sea el rendimiento. Para obtener la bomba hidráulica que más se ajuste a los

requerimientos del sistema, se procederá a efectuar su selección utilizando el programa informático “Inoxpa Pump Selector” de descarga y uso libre de tiempo limitado. Este programa es entregado por la empresa española INOXPA y la descarga del programa se puede realizar directamente desde la siguiente dirección de internet (<http://www.inoxpa.es/servicios/servicio/selectores-de-bombas/selectores-de-bombas>). Se elige este software por la simplicidad en su uso, la variedad de modelos de bombas y por el respaldo de INOXPA la que permite la fabricación de una bomba a solicitud del cliente. A continuación se detalla el paso a paso para seleccionar la bomba según los requerimientos impuestos por el sistema.

1) Primero se selecciona el botón “Búsqueda Punto de Diseño” de la columna tal como se muestra en la figura 5.11.

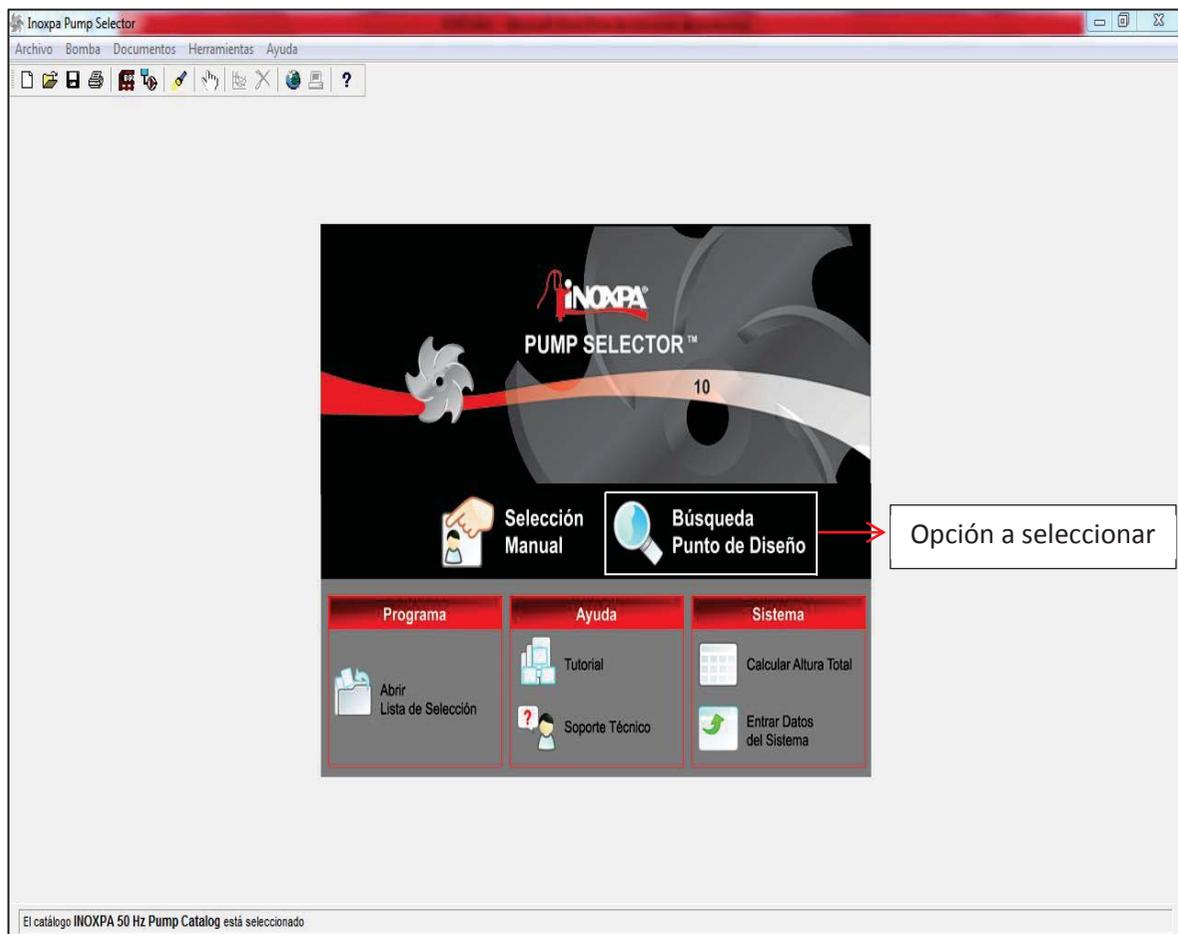


Figura 5.11: Uso del software “Inoxpa Pump Selector”. INOXPA ®.

2) En segundo lugar, se procede a ingresar la altura total desarrollada por la bomba y el caudal a generar, datos obtenidos desde el apartado 5.1 cuyos valores son 14,18 (m) y 12,9 (m³/h) respectivamente. También se seleccionan los tipos de bombas a considerar para lograr el “match” al momento de hacer “click en el botón “aceptar” tal como se muestra en la figura 5.12.

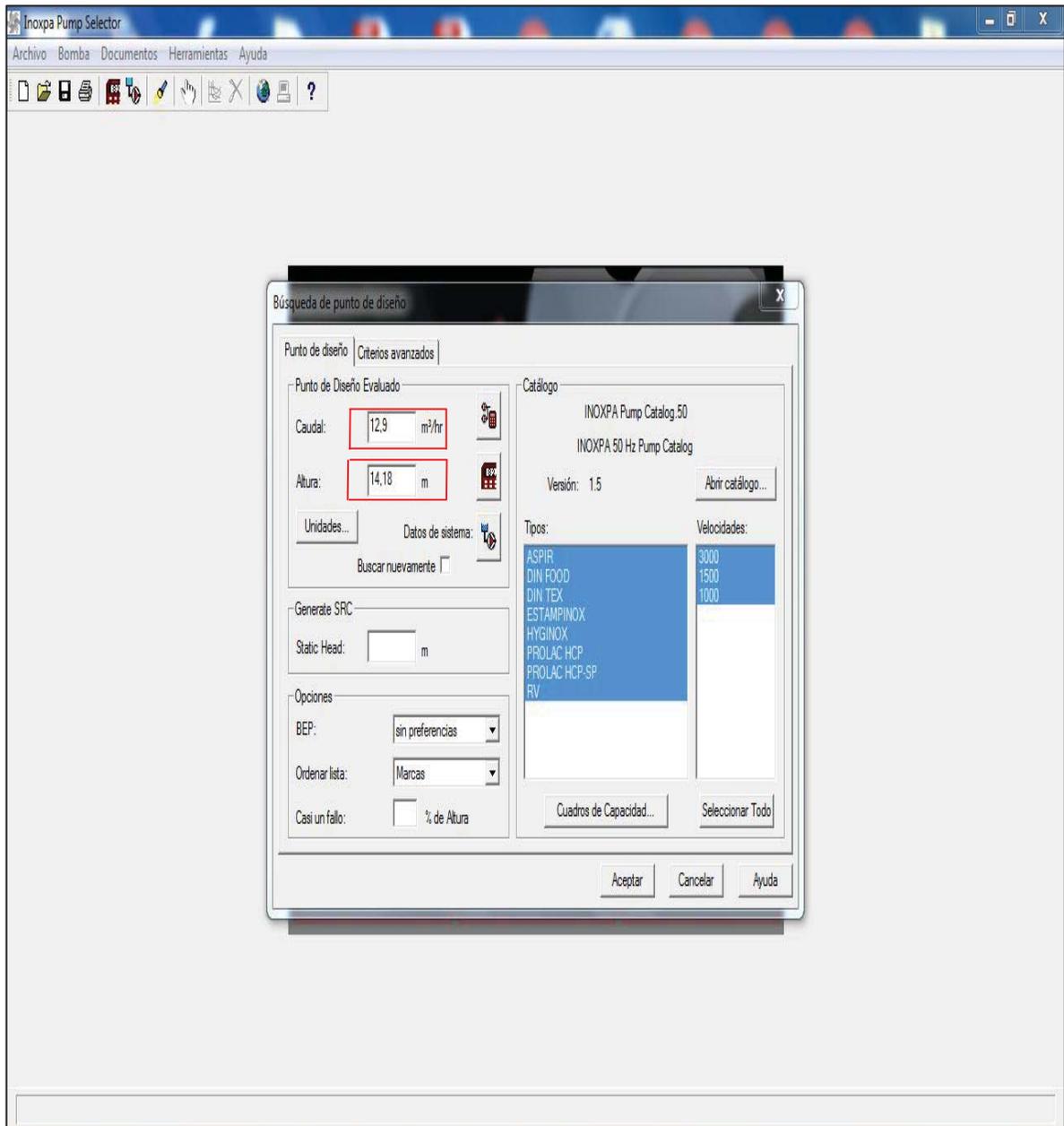


Figura 5.12: Uso del software Inoxpa Pump Selector, etapa de búsqueda del punto de diseño. INOXPA®.

3) Luego, se despliega una ventana con los distintos modelos de bombas compatibles con los valores ingresados, tal como es representado a partir de la figura 5.13.

Vista previa del gráfico	Marc	Tipo	Tamaño	Curva	Velocida	Díametr	Altura	Rend	BEP	NPSHr	Potencia	Potencia NOL	Motor	Tamaño	Energía	Caudal mínimo	Esfera	nc
	—	PROLAC HCP	40-150	01.030.12.0009	2900	120	14,7	52	52	1,06	0,985	1,22	1,1	80B	—	—	—	—
	—	PROLAC HCP	50-150	01.030.12.0017	2900	115	14,5	46	54	0,956	1,1	1,52	1,1	80B	—	—	—	—
	—	PROLAC HCP-SP	50-150	01.031.12.0006	2900	120	15,2	34	47	0,93	1,56	1,88	2,2	90LN	—	—	—	—
	—	PROLAC HCP	50-260	01.030.12.0023	1450	210	14,5	48	49	0,946	1,06	1,4	1,1	90SN	—	—	—	—
	—	PROLAC HCP	65-215	01.030.12.0031	1450	215	14,3	47	64	0,737	1,07	2,06	1,1	90SN	—	—	—	—
	—	PROLAC HCP	65-250	01.030.12.0035	1450	205	14,3	44	59	0,711	1,15	1,72	1,5	90LN	—	—	—	—
	—	PROLAC HCP	80-240	01.030.12.0047	1450	205	14,5	38	65	0,599	1,33	2,95	1,5	90LN	—	—	—	—
	—	ASPIR	A-150	01.400.12.0005	1450	By-pass: 43,3		21	31	6,39	7,09	7,5	7,5	132M	—	—	—	—
	—	ESTAMPINOX	E-2222	4050183	2900	125	18,1	47	50	—	1,34	2,25	1,5	80C HighOx	—	—	—	—

14 bombas seleccionadas de INOXPA 50 Hz Pump Catalog [Punto de diseño: 12,9 m³/hr, 14,18 m] [NPSH disponible no se ha especificado]

Figura 5.13: Uso del software Inoxpa Pump Selector, modelos de bombas compatibles. INOXPA®.

4) En este caso, se selecciona la bomba **PROLAC HCP 50-150 2900**, de **120 (mm)** de diámetro de impulsor, la cual posee un rendimiento de un **52,2%** con una potencia igual a **1,01 (kW)** en el eje de la bomba lo que supone una potencia eléctrica del motor igual a **1,10 (kW)**.

Es difícil conseguir una curva característica de bomba que contenga de forma exacta el punto calculado para el sistema en el que ésta se emplazará, teniendo que aceptar las variaciones referidas a juicio de quien diseña. Por lo tanto, se mantiene fija la altura total de **14,18 (m)** haciendo variar el caudal a un valor de **13,7 (m³/h)** el que puede ser reducido mediante la válvula de globo bridada hasta un caudal de **12,9 (m³/h)** tal como es representado a partir de la figura 5.14.

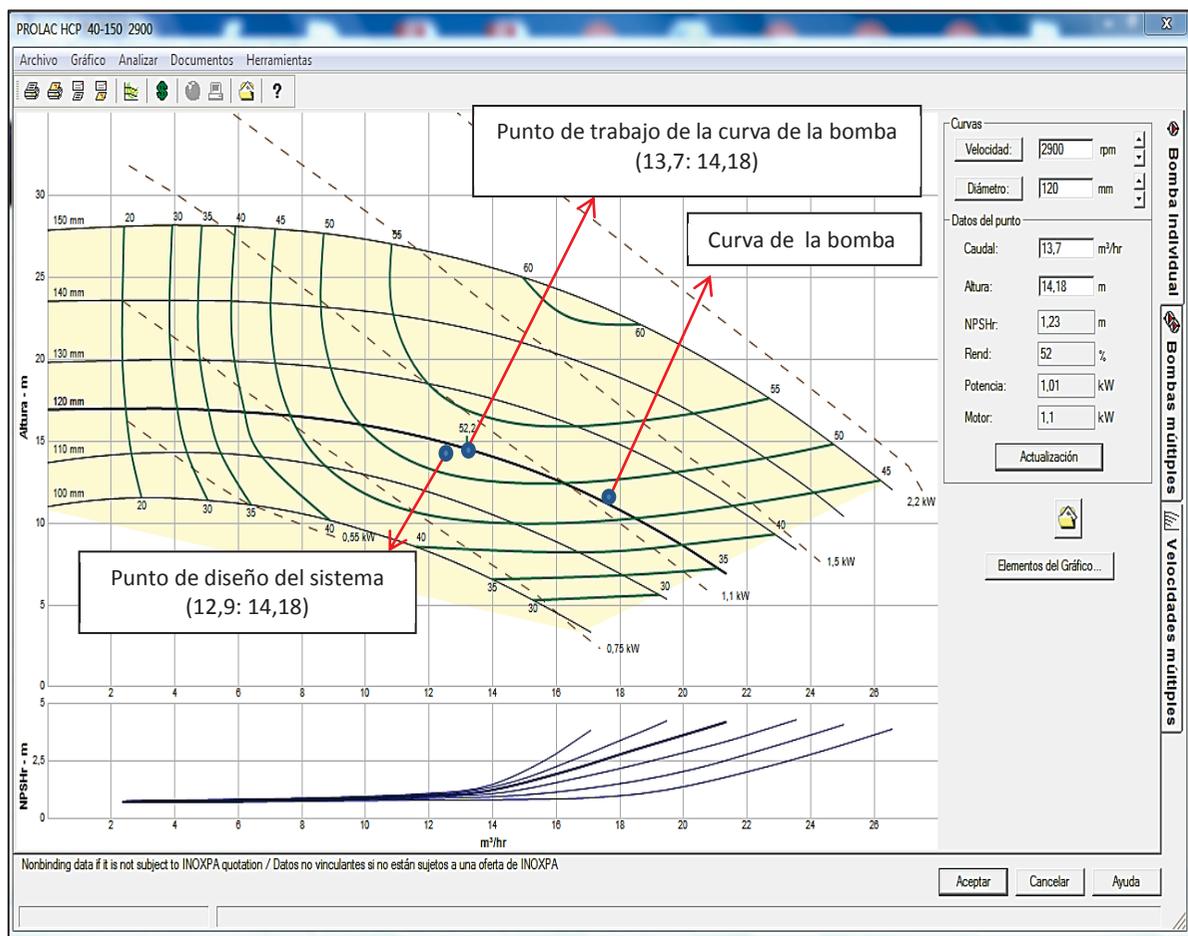


Figura 5.14: Uso del software Inoxpa Pump Selector, curva del sistema, punto de diseño y curvas características de la bomba. INOXPA®.

5.7.2 Selección del agitador

Tal como se detalló en el apartado 5.5, los requerimientos del agitador necesarios para la selección se detallan en la tabla 5.11

Característica	Valor	Unidad
Potencia	1,93	(kW)
Diámetro hélice	1,60	(m)
Velocidad de giro	50	(rpm)

Tabla 5.11: Requerimientos del agitador del proceso.

Según los requerimientos, el elemento seleccionado es un agitador sumergible WILO-EMU serie MegaProp (baja velocidad, hélice 3 palas). Las características del agitador se detallan en la figura 5.10.

Los agitadores sumergibles WILO EMU MegaProp, se utilizan en plantas de tratamiento de aguas residuales para la suspensión de sólidos y/o generación de flujo, así como también en tanques de activación, anaeróbicos y de desnitrificación.

Los agitadores de baja velocidad evitan la sedimentación de flóculos de lodos activos.

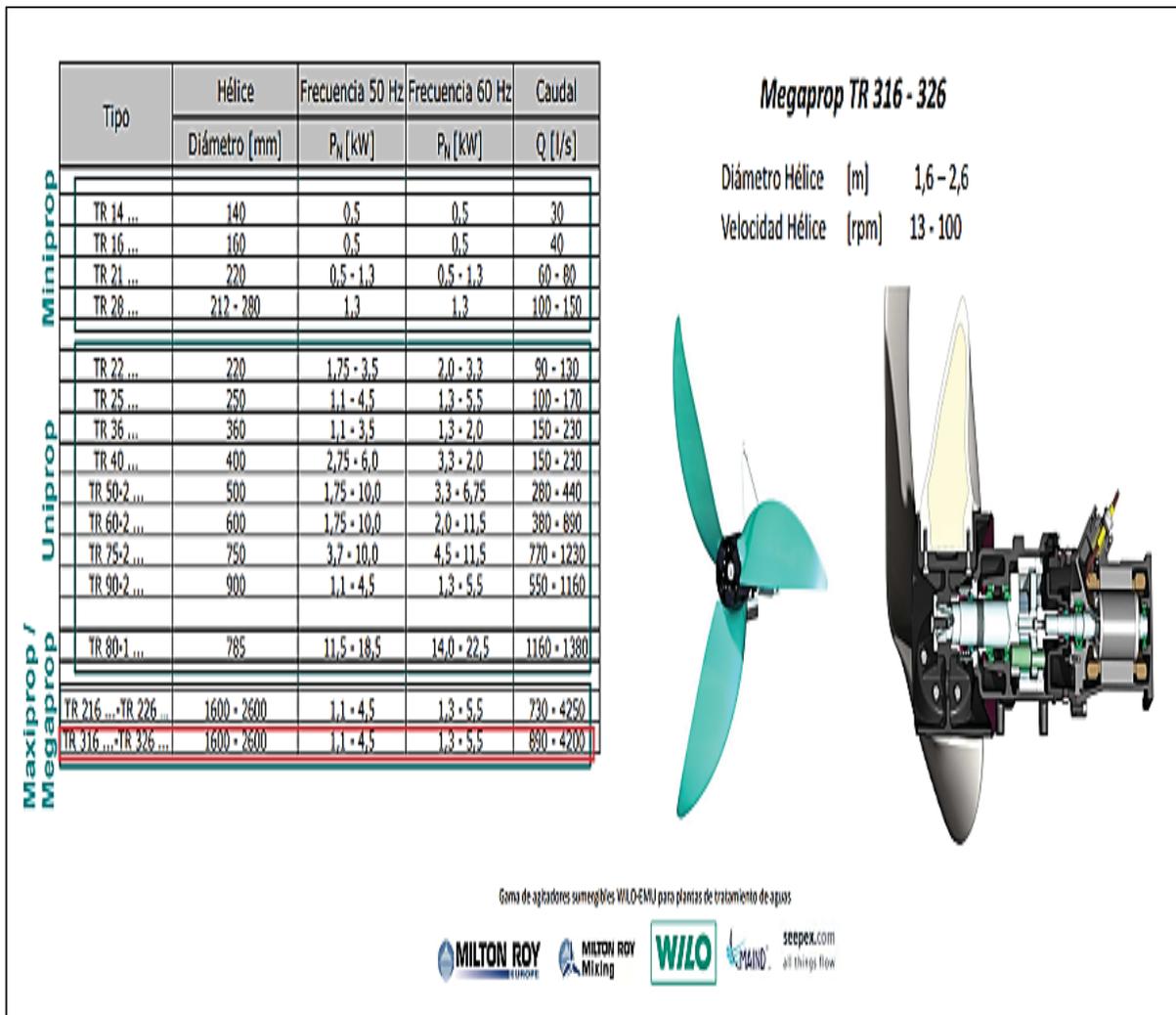


Figura 5.15: Características del agitador sumergible WILO-EMU serie MegaProp (baja velocidad, hélice 3 palas).

5.7.3 Selección del equipo de cogeneración

El motor de cogeneración seleccionado, es un motor de módulo integrado en dimensiones compactas. Presenta un motor endotérmico 100GL alimentado a gas y dotado de encendido electrónico y perno movable de la válvula del motor hidráulico proporcionando una gran flexibilidad y fiabilidad.

Posee un generador eléctrico asíncrono trifásico con rotor con protección de ardilla en aluminio extorsionado y con chapa protectora en hierro fundido para el enfriamiento.

El circuito hidráulico, es un circuito cerrado con líquido refrigerante, que intercambia calor a diversas temperaturas y lugares sobre la cubeta del motor. Si el calor producido no se utiliza, el circuito primario cede calor a un radiador externo para el vaciado del exceso térmico.

El motor puede ser alimentado con distintos gases (metano, gas líquido, biogás, etc.) con esta finalidad en la junta elástica hay montado una placa de asiento que permite la variación anticipada en función del gas utilizado. Los requerimientos técnicos para la elección del motor de cogeneración se detallan en la tabla 5.12.

Característica	Valor	Unidad
Potencia de entrada	39,14	(kW)
Rendimiento eléctrico	30	%
Potencia eléctrica	11,74	(kW) eléctricos
Rendimiento térmico	45	%
Potencia térmica	17,61	(kW) térmicos
Consumo biogás	7,14	(m ³ /h)
Temperatura agua ingreso	35	(°C)
Temperatura agua de egreso	60	(°C)
Caudal normal de agua	509,55	(L/h)

Tabla 5.12: Requerimientos técnicos para la elección del motor de cogeneración.

Las características del motor TeamEnergy modelo SB 15K son detalladas en la tabla 5.13 (Rendimiento térmico 45% Rendimiento eléctrico 30%) [16].

Característica	Valor	Unidad
Potencia de entrada	15 - 56,2	(kW)
Potencia eléctrica	0 - 14,5	(kW) eléctricos
Potencia térmica	13 - 39	(kW) térmicos
Consumo biogás	3 - 8,4	(m ³ /h)
Temperatura Max. agua ingreso	70	(°C)
Temperatura Max. agua de egreso	86	(°C)
Caudal normal de agua	3.000	(L/h)

Tabla 5.13: características del motor TemEnergy modelo SB 15K. Anexo 1.

5.8 Balance energético

A partir de la tabla 5.14 se puede concluir que si se considera la obtención de energía térmica y eléctrica, el rendimiento global de la planta es igual a un **74,99%** es decir de los **39,14 (kW)** nominal de potencia diaria generados, tan sólo **29,35 (kW)** de potencia son posibles de ser utilizados. Esto representa la suma de la potencia térmica y eléctrica.

El proceso requiere de **11,98 (kW)** térmicos de potencia para su funcionamiento, lo que representa el **68,03%** del total de la generación térmica de la planta, por consiguiente, tan sólo el **31,97%** de la potencia térmica generada son susceptibles de ser utilizados en otros procesos como por ejemplo calefacción de establos o pasteurización es decir se cuentan con **5,63 (kW)** térmicos al día para uso libre.

Análogamente, el proceso requiere de **3,03 (kW)** eléctricos de potencia para su funcionamiento, lo que representa el **25,81%** del total de la generación eléctrica de la planta, por consiguiente, tan sólo el **74,19%** de la potencia eléctrica generada son susceptibles de ser utilizados en otros procesos, como por ejemplo la iluminación de establos, es decir se cuentan con **8,71 (kW)** eléctricos al día para uso libre.

Pérdidas por consumo eléctrico	(kW)
Bomba	1,10
Agitador	1,93
Pérdidas por consumo térmico	(kW)
Calor aportado al purín	6,78
Flujo de calor por el biodigestor	5,20
Total pérdidas térmicas (kW)	11,98
Total pérdidas eléctricas (kW)	3,03
Potencia térmica de generación de la planta (kW)	17,61
Potencia eléctrica de generación de la planta (kW)	11,74

Tabla 5.14: Balance energético del proceso.

5.9 Aplicaciones

5.9.1 Aplicaciones eléctricas

Tal como se detalló en el apartado anterior, se disponen de 8,71 (kW) de potencia eléctrica para utilizar en otros procesos ajenos al funcionamiento del biodigestor. Si esa potencia es utilizada de forma continua durante el día (24 horas) estará entregando una energía total igual a 209,04 (kWh) al día, siempre y cuando el proceso de formación de biogás sea constante en la operación y generación en el volumen indicado.

Múltiples son los procesos en que la energía eléctrica es fundamental para su funcionamiento, por ejemplo, el proceso de iluminación de los establos, equipos de ordeña de bovinos, etc.

5.9.1.1 Aplicación para iluminación del predio lechero

Si se cuenta con una potencia disponible de 8,71 (kW) entonces es posible destinar ese recurso para iluminar las instalaciones con 57 proyectores tipo halógeno de 150 (W) con sensor HALUX® más dos bombillas de 100 y 60 (W).

5.9.1.2 Aplicación para el enjuague del equipo de ordeña

Considerando las recomendaciones entregadas por el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA) dependiente del Ministerio de Agricultura a través de su boletín Inia N° 148 del Centro Regional de Investigación Remehue, el enjuague del equipo de ordeña se debe realizar a partir del uso de agua fría o tibia a una temperatura de 30 (°C) sin recirculación. Si se dispone de una potencia eléctrica de 8,71(kW) entonces es posible disponer de dos hervidores eléctricos marca MAIGAS modelo 6EI123 los que cuentan con un consumo de 3 (kW), con una alimentación de 220 (V), una frecuencia de 50 (Hz) y una capacidad de 23 (L) por cada uno, lo que da un volumen total de 46 (L) y un consumo total de 6 (kW) de potencia eléctrica. Para alcanzar y mantener la temperatura adecuada se hace necesario el uso del termostato regulable con el que el equipo cuenta tal como se muestra y detalla en la figura 5.20.



Hervidor 23 Lts.

Descripción

- Cuerpo de Acero Inoxidable.
- Termostato Regulable.
- Llave Dispensadora con Tubo de Nivel.
- Luz Piloto.
- Las Resistencias no tienen Contacto con el Agua.

Especificaciones Técnicas

MODELO	6EI123
CAPACIDAD	23 LT.
DIMENSIONES	d: 350 x 450 mm.
CONSUMO ELÉCTRICO	3 Kw.
ALIMENTACIÓN ELÉCTRICA	220V/50Hz.
PESO	4,5 Kg.

 Descargar ficha

Figura 5.16: Hervidor eléctrico modelo 6EI123. MAIGAS®.

5.9.1.3 Aplicación para el uso de equipo de ordeña

Una de las actividades más cotidianas y de mayor importancia dentro de una lechería es la extracción de la leche. Si se considera una potencia eléctrica de 8,71 (kW) entonces, a partir del equipamiento de extracción lechera modelo “BS MINI X” se puede determinar que es posible utilizar 11 equipos de ordeña de 1 (HP) de potencia, tal como se muestra en la figura 5.21, más 3 proyectores halógenos de 150 (W) con sensor HALUX® y una bombilla de 60 (W).

DATOS TÉCNICOS	BS MINI X (VACAS)	BS MINI KCX (CABRAS)
Motor	Eléctrico	Eléctrico
Potencia	1 Hp (220 V)	1 Hp (220 V)
Capacidad de vacío	180 lt/min	180 lt/min
Cubeta para leche	Capacidad 30 lts	Capacidad 30 lts
Material de cubeta	Acero Inoxidable	Acero Inoxidable
Pezoneras	4	2
Pulsador	1	1
Dimensiones (Ancho x Largo x Alto)	620 x 1200 x 850 cms	620 x 1200 x 850 cms
Peso	50 Kg	50 Kg



BS MINI X (VACAS)



BS MINI KCX (CABRAS)

Figura 5.17: Datos técnicos de un equipo de ordeña de vacas lecheras.

5.9.1.4 Aplicaciones domésticas

Un producto final de la potencia eléctrica que puede ser generada es la del uso casero a través del funcionamiento de los electrodomésticos de la casa principal en donde la energía es generada. Se estableció por medio de la literatura especializada [16] que el factor de planta máximo que se puede lograr es de un 93% por lo tanto, utilizando la ecuación 5.13 y una potencia eléctrica de 8,71 (kW) resulta:

$$E_e = 8,71 \cdot 0,93 \cdot 8.760 \text{ (Kwh/año)}$$

Por lo tanto, se dispone de una energía útil de **70.958,63 (kWh)** por año o **5.913,22 (kWh)** por mes. A partir de la página http://www.chilectra-digital.cl/calculadores/fla_efi/simulador.html se utiliza el simulador de consumo eléctrico cuyo resultado final se detalla en la figura 5.18.

Consumo Eléctrico Mensual de tu Hogar				
Artefacto	Cantidad	Horas uso mensual	Consumo KWh mensual	Consumo \$ mensual
AA 9.000	3	90	270KWh	\$23.760
Computador	1	240	25.6KWh	\$2.253
Equipo Música	1	240	1.92KWh	\$169
Televisor	3	180	59.4KWh	\$5.227
Amp. Efi. 20W	11	300	66KWh	\$5.808
Cocina Eléc.	1	30	43.5KWh	\$3.828
Hervidor Eléc.	1	9.3	18.7KWh	\$1.646
H. Microondas	1	14	11.2KWh	\$986
Refrigerador	1	30*	49.57KWh	\$4.362
Lavadora	1	12	3.96KWh	\$348
Plancha	1	12	14.4KWh	\$1.267
			Consumo en KWh Mensual:	564.25 KWh
			Referencia del costo mensual en pesos:	\$49.654

(*) Uso en días

Figura 5.18: Simulador de consumo eléctrico para un hogar. Chilectra.

Considerando el consumo obtenido por el simulador y la energía disponible desde la instalación del biodigestor, se puede determinar que al menos 10 casas pueden ser alimentadas eléctricamente mediante la instalación en estudio, generando un ahorro de **\$49.654** pesos chilenos por cada hogar.

5.9.2 Aplicaciones térmicas

Como se mencionó anteriormente, se dispone tan sólo del 31,97% de la potencia térmica generada lo que corresponde a 5,63 (kW) térmicos para uso libre. Dentro de las aplicaciones con que se puede utilizar esta energía, se encuentran los procesos de pasteurización de la leche, calentamiento de agua y de espacios físicos entre otros.

5.9.2.1 Aplicación para pasteurización de la leche

El proceso de pasteurización de la leche, consiste en la destrucción de los microorganismos de la leche mediante el uso de tratamientos térmicos. Una forma de pasteurización es la conocida como pasteurización lenta en la cual, la leche es calentada a temperaturas de entre 62 (°C) y 64 (°C) manteniéndose a esta temperatura durante 30 minutos. Luego de los 30 minutos, la leche es enfriada a temperaturas entre 4 y 10 (°C) según la conveniencia. La leche es calentada en recipientes o estanques de capacidad variable (generalmente de 200 a 1.500 litros); esos estanques son de acero inoxidable preferentemente y están encamisados (doble pared); la leche se calienta por medio de vapor o agua caliente que circula entre las paredes del estanque, provisto este de un agitador para hacer más homogéneo el tratamiento. El uso de la pasteurización lenta es adecuada para procesar pequeñas cantidades de leche hasta aproximadamente 2.000 litros diarios, de lo contrario no es aconsejable.

Si se dispone de una potencia térmica igual a 5,63 (kW) para elevar la temperatura de la leche desde los 13,9 (°C) a 62 (°C) (considerando que el calor específico de la leche es aproximadamente igual al del agua) entonces, utilizando la ecuación 5.17 resulta:

$$5.630 = m \cdot 4.187,76 \cdot (62 - 13,90) \text{ (W)}$$

Por lo tanto, a partir de una potencia térmica de 5,63 (kW) es posible aumentar desde los 13,9 (°C) hasta 62 (°C) una masa de **0,028 (kg)** de leche cada segundo.

Considerando la figura 5.17 se determina que la capacidad de la cubeta de cada equipo de ordeña es igual a 30 litros, entonces, para once equipos con una cubeta cada uno se obtiene una cantidad total de **330 litros** de leche. Si se considera un volumen de 330 litros de leche a pasteurizar y considerando que la densidad de la leche es igual a 1,032 (kg/L) se tiene, por lo tanto, una masa de **340,56 (kg)** en un volumen de 330 litros. Considerando el flujo másico de 0,028 (kg/s) de leche, entonces, una masa de 340,56 (kg) de leche de vaca, requerirá de un tiempo de **3,38 horas** en alcanzar una temperatura de 62 (°C). Si el proceso toma 30 minutos adicionales una vez ya alcanzado los 62 (°C) entonces, pasteurizar 330 litros de leche de vaca tarda **3,88 horas**, lo que permite procesar hasta seis estanques de 330 litros al día constituyendo un volumen total diario de **1.980 litros de leche**.

5.9.2.2 Aplicación para la climatización de un edificio de concreto

Considerando una instalación construida completamente de concreto cuya conductividad térmica es igual a 0,8 (W/m·°C) [25] y de espesor igual a 0,25 (m) tanto para el techo, paredes y suelo, además, de que la temperatura de las superficies internas y externas registran 25 (°C) y 13,9 (°C) respectivamente (esta última a partir de la temperatura media para la Región Metropolitana) se requiere obtener el área total con la cual es posible calefaccionar hasta una temperatura de 25 (°C) a partir de una potencia disponible de 5,63 (kW) tal como se muestra en la figura 5.19.

El área se obtiene utilizando la siguiente ecuación [25]:

$$Q = \frac{k \cdot A (T_i - T_e)}{L} \text{ (W)} \quad [\text{Ec. 5.35}]$$

Donde:

Q= Flujo de calor (W).

k= Conductividad térmica (W/m· °C).

T_i= Temperatura interna (°C).

T_e= Temperatura externa (°C).

L = Espesor (m).

A= Área (m²).

Reemplazando valores en la ecuación 5.35 considerando la figura 5.19 resulta:

$$5.630 = \frac{2 \cdot 0,8 \cdot (25 - 13,9)}{0,25} \cdot (A \cdot B + C \cdot B + C \cdot A)$$

Por lo tanto, una instalación con dimensiones de **3,52 (m)** para A; **2,15 (m)** para B y **12,64 (m)** para C, logra mantener una temperatura interna cercana a los **25 (°C)** cuando existe una transferencia de calor igual a los **5,63 (kW)**.

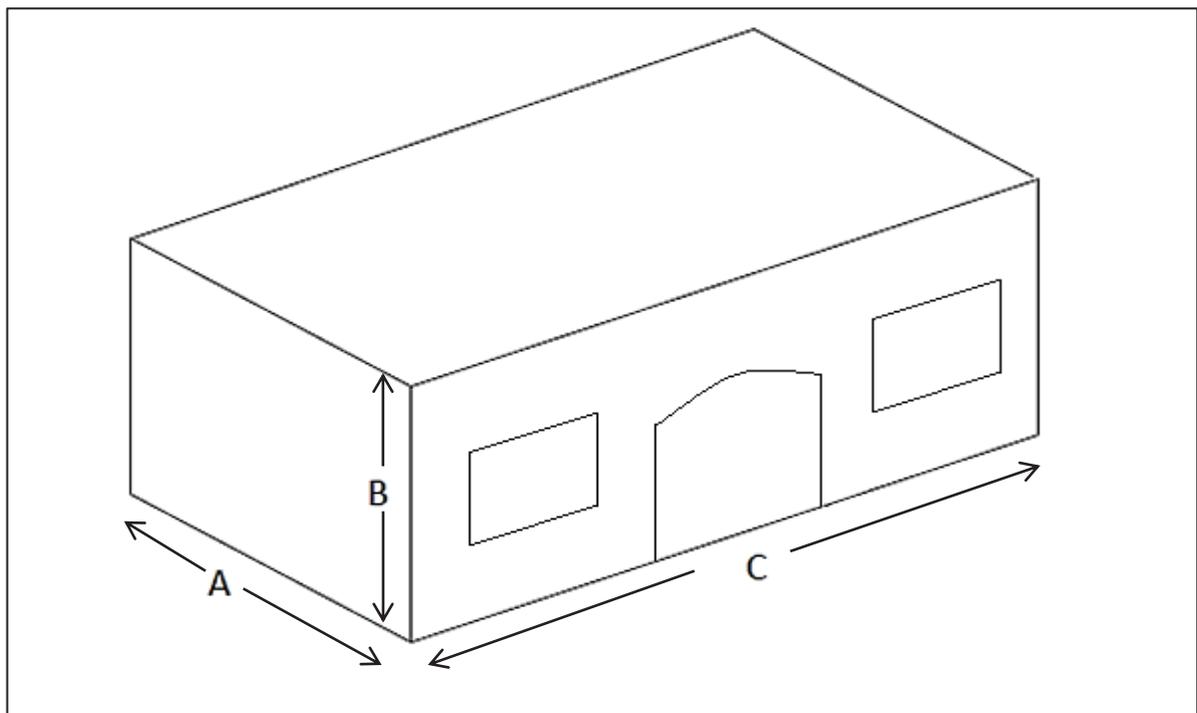


Figura 5.19: Dimensiones de la instalación.

5.9.2.3 Aplicación para la deshidratación de forraje

Dentro de la deshidratación industrial se pueden emplear dos procedimientos en función de la temperatura del aire del espacio destinado como acopio y deshidratado del forraje. Si se aplica una temperatura de entre los 200 (°C) y 300 (°C) entonces el proceso se considera de baja temperatura, mientras que si la temperatura varía entre los 800 (°C) y 1.000 (°C) entonces se considera un proceso de alta temperatura. El primer sistema, es el que se empleaba al principio de conocerse las ventajas del secado, comenzando por poner el forraje sobre una parrilla, por debajo de la cual se introducía una masa de aire caliente proveniente de una fuente de calor. El segundo sistema corresponde a las metodologías actuales de secado de forraje [27].

Considerando la ecuación 5.35 se desea calcular el área posible de calefaccionar de una instalación de concreto para el secado de forraje para alimentación de ganado, hasta una temperatura de 200 (°C). Utilizando la ecuación 5.36 se tiene:

$$5.630 = \frac{0,8 \cdot A (200 - 13,9)}{0,25} \text{ (W)}$$

Por lo tanto, es posible calefaccionar un cuarto de área total de **9,45 (m²)** dimensionado según la figura 5.20.

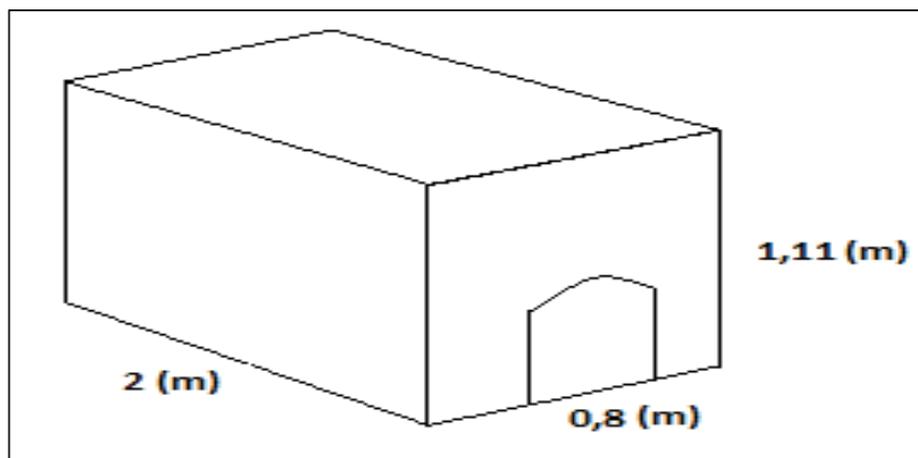


Figura 5.20: Dimensiones centro deshidratado de forraje.

CAPÍTULO VI: Análisis económico

6.1 Modelo de negocio

Los proyectos de producción de biogás y energía presentan elevados costos de inversión en equipamiento y obras civiles, además, requieren de presupuesto para la operación, mantención y adquisición de insumos.

Lo anterior, aumenta en forma considerable cuando la intención es la generación de electricidad, por lo cual, proyectos pequeños podrían tener mayores dificultades para ser rentables.

Es recomendable que el productor mantenga un suministro de materia prima constante y asegurada a largo plazo, de esta forma, se cerciora la continuidad del proceso. En el caso en que los volúmenes a tratar no sean suficientes para un tamaño de planta rentable, se recomienda asociarse con vecinos o buscar en la zona otros residuos orgánicos que puedan ser combinados con los propios.

Según la experiencia europea, el radio de suministro de los sustratos no debe sobrepasar los 30 (km) y se debe evitar transportar sustratos con un alto contenido de humedad evitando, de esta forma, transportar agua.

Para proyectos menores, a nivel de productor agropecuario, según la experiencia, el límite de inversión es cercano a los 100 millones (CLP).

El auto consumo de un productor agropecuario no supera los 100 (kW), incluso para alcanzar esos niveles de potencia, el productor debería tener maquinaria adicional, con la cual poder producir otros productos de mayor valor agregado.

Según el tipo de producción de sustrato planteado, el modelo de negocio es del tipo auto-productor, el cual es aplicable para pequeños productores individuales de energía, basado en tecnologías de inversiones menores.

Este tipo de modelo de negocio, considera que el producto final no es comercializado, sino, utilizado en el autoconsumo, por lo cual los ingresos corresponden a los ahorros en uso de energía eléctrica y térmica.

Este tipo de modelo corresponde a medianos productores agropecuarios que tengan sustratos suficientes para producir desde 38 mil (m³) hasta los 380 mil (m³) de biogás al año, (con un 60% de metano) suficientes para la generación de entre 80 y 800 (MWh) al año de energía.

En la evaluación de económica se considera que el productor es dueño del sustrato y es quien, además, realiza la inversión [28].

6.2 Costos

6.2.1 Costos asociados a la construcción del biodigestor

A partir del anexo 2, se establece que el precio de mercado para el acero A-36 con el cual está diseñado el biodigestor, tiene un valor de 550 pesos chilenos (CLP) por (kg) de acero. La tabla 6.1 se construye a partir del peso del biodigestor.

Elemento	Peso	Unidad
Techo	3.065,13	(kg)
Manto	5.054,62	(kg)
Fondo	2.416,83	(kg)
Total	10.536,58	(kg)
Precio acero	550	(CLP / kg)
Precio Neto	5.795.119	(CLP)
IVA	19	(%)
Precio total	6.896.191	(CLP)

Tabla 6.1: Costos asociados a la construcción del biodigestor.

6.2.2 Costo asociado a la adquisición del motor de cogeneración

El costo de inversión del equipo de cogeneración de biogás, se estima a partir de los precios de motores generadores de energía disponibles en el mercado.

La ecuación a utilizar, para estimar el costo de inversión debido al motor de cogeneración, se detalla a continuación [6]:

$$C_{MC} = 4,639 \cdot \frac{C^{-0,333}}{T} \left(\frac{\text{US\$}}{\text{kW}} \right) \quad [\text{Ec. 6.1}]$$

Donde:

C_{MC} = Costo del motor de cogeneración (US\$/kW).

C= Potencia de entrada (kW).

T= Tasa de cambio (1 US\$=673 CLP).

Reemplazando valores en la ecuación 6.1 resulta:

$$C_{MC} = 4,639 \cdot \frac{39,14^{-0,333}}{1,49 \cdot 10^{-3}} \left(\frac{\text{US\$}}{\text{kW}} \right)$$

Por lo tanto, se estima el costo del motor de cogeneración igual a **918,11 (US\$/kW)** es decir, para una potencia de 39,14 (kW) se requieren **24.184.137,49 CLP**.

6.2.3 Costos asociados a la adquisición del equipamiento auxiliar

El costo del digestor, mezclador y otros equipos de planta se calculan de acuerdo a un valor unitario, correspondiente a 2.000 (US\$/kW) [6].

Para una capacidad de 39,14 (kW) se estima una inversión de **52.682.440 CLP**. Este valor incluye la inversión del digestor, por lo tanto, se debe restar el valor obtenido en el punto 6.2.1 entregando, finalmente un costo estimado de inversión en equipamiento de **45.786.249 CLP**.

6.2.4 Costos de mantenimiento y operación

Los costos de mantenimiento y operación se estimarán en un 6% de la inversión inicial [28].

6.3 Ahorros asociados a la producción de energía

Se sabe que es factible producir 39,14 (kW) de potencia nominal mediante el uso de biogás con un 55% de gas metano (CH₄), pero el siguiente análisis se plantea la interrogante sobre ¿cuál es el costo de generar igual potencia nominal operando igual motor de cogeneración, pero esta vez utilizando gas natural? y ¿cuál es el ahorro al suplir el gas natural y usar biogás autogenerado?

Para obtener el costo por operar con gas natural, se procede a calcular la masa de gas natural contenida para la generación de 39,14 (kW) de potencia nominal utilizando la siguiente ecuación:

$$E = v \cdot PCI \quad [\text{Ec. 6.1}]$$

Donde:

E= Energía bruta generada (kWh).

v= Volumen de gas natural (m³).

PCI= Poder calorífico inferior del gas natural [10,81 (kWh/m³)].

Reemplazando valores en la ecuación 6.1 resulta:

$$v = \frac{39,14 \cdot 24}{10,81} \left(\frac{\text{m}^3}{\text{día}} \right)$$

Por lo tanto, el motor de cogeneración operando con gas natural requerirá de un volumen de **86,897 (m³)** de gas natural al día para producir una potencia nominal de 39,14 (kW) considerando que la planta funciona 24 horas al día. Tomando como valor promedio igual a 551 (CLP) para 1 (m³) de gas natural, (valor obtenido de la

empresa Metrogás) luego, el **ahorro** por utilizar biogás (costo cero) en lugar de gas natural (costo \$551/m³) sería igual a **16.231.463 (CLP)** con un factor de planta de 93% es decir, operando a plena carga durante 339 días al año.

6.4 Flujo de caja

Para la realización del flujo de caja se considerará lo siguiente:

- 1) La tasa de retorno asociada al proyecto es de un 12%
- 2) Se fija un horizonte de 10 años
- 3) Se fijará un aumento del 5% anual en el precio del gas natural
- 4) Se considera como ingresos, los ahorros producidos al cambiar el combustible desde gas natural a biogás
- 5) Los costos de mantenimiento y operación tendrán un ajuste del 4,25% anual
- 6) Se considerará sólo el flujo de caja puro.

A partir de la figura 6.1 y según los indicadores, es conveniente, en términos económicos, invertir en una planta de generación de biogás. Se puede observar que la tasa interna de retorno (TIR) es conveniente y generará un recuperación de un 13% según el análisis.

Aunque el costo por inversión está comprendida dentro de un rango predicho por la literatura usada en este análisis, y aun siendo este valor muy elevado, el tiempo de recuperación de lo invertido (Pay-Back) es un tiempo bastante razonable, tomando 5 años y fracción en recuperar la suma invertida. Se puede concluir, por lo tanto, que el proyecto es recomendable desde un punto de vista económico ya que supone un beneficio tanto económico como medio-ambiental.

Ingresos		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	
Valor gas natural	\$/m3	\$ 551	\$ 579	\$ 607	\$ 638	\$ 670	\$ 703	\$ 738	\$ 775	\$ 814	\$ 855	
Consumo de gas natural	m3/año	29458	29458	29458	29458	29458	29458	29458	29458	29458	29458	
Total ahorro esperado	\$/año	\$ 16,231,463	\$ 17,043,036	\$ 17,895,188	\$ 18,789,947	\$ 19,729,445	\$ 20,715,917	\$ 21,751,713	\$ 22,839,298	\$ 23,981,263	\$ 25,180,327	
Costos												
Costos por Mantenimiento y operación	\$/año	\$ 4,611,995	\$ 4,807,543	\$ 5,011,383	\$ 5,223,866	\$ 5,445,358	\$ 5,676,241	\$ 5,916,913	\$ 6,167,791	\$ 6,429,305	\$ 6,701,907	
Valor del agua	\$/m3	\$ 358,58	\$ 358,58	\$ 358,58	\$ 358,58	\$ 358,58	\$ 358,58	\$ 358,58	\$ 358,58	\$ 358,58	\$ 358,58	
Consumo de agua	m3/año	477,99	477,99	477,99	477,99	477,99	477,99	477,99	477,99	477,99	477,99	
Costo por uso de agua	\$/año	\$ 171,398	\$ 171,398	\$ 171,398	\$ 171,398	\$ 171,398	\$ 171,398	\$ 171,398	\$ 171,398	\$ 171,398	\$ 171,398	
Total costos	\$/año	\$ 4,783,392	\$ 4,978,941	\$ 5,182,781	\$ 5,395,263	\$ 5,616,755	\$ 5,847,638	\$ 6,088,311	\$ 6,339,188	\$ 6,600,702	\$ 6,873,305	
Inversión												
Biodigestor		\$ 6,896,191										
Motor de cogeneración		\$ 24,184,137										
Equipamiento auxiliar		\$ 45,786,249										
Total inversión		\$ 76,866,577										
Flujo de caja		-\$ 76,866,577	\$ 11,448,071	\$ 12,064,095	\$ 12,712,407	\$ 13,394,684	\$ 14,112,689	\$ 14,868,279	\$ 15,663,402	\$ 16,500,110	\$ 17,380,561	\$ 18,307,022
Flujo de caja acumulado		-\$ 76,866,577	-\$ 65,418,507	-\$ 53,354,412	-\$ 40,642,004	-\$ 27,247,320	-\$ 13,134,631	\$ 1,733,648	\$ 17,397,050	\$ 33,897,160	\$ 51,277,721	\$ 69,584,742
VAN		\$ 1,985,413,75										
TRR		13%										
Payback		5,88										

Figura 6.1: Flujo de caja puro del proyecto.

Capítulo VII: Conclusiones y comentarios

7.1 Conclusiones

Se logró establecer un estudio breve acerca de la realidad energética del país concluyéndose que Chile presenta una alta dependencia por importar recursos extranjeros para la generación energética, lo que ha provocado el encarecimiento en el valor de la energía aun cuando se podría suplir la necesidad energética del país mediante proyectos de generación limpios y amigables con el medio ambiente mediante el uso de recursos naturales. Es necesario, por lo tanto, diversificar la matriz energética en favor del cumplimiento de las metas establecidas por el gobierno al año 2024 y alcanzar un 10% de generación energética mediante energías renovables no convencionales.

Se logró establecer un marco teórico en función de la biomasa y biogás, en este último, se concluye que es necesario controlar ciertos parámetros como el contenido de dióxido de carbono, el cual disminuye el poder calorífico del metano contenido en el biogás así como también el contenido de ácido sulfhídrico, el cual es altamente corrosivo y dañino para los equipos de procesos.

Es importante mantener un proceso de generación de biogás libre de oxígeno, el que permita la proliferación de bacterias metanogénicas y otros grupos de bacterias metabólicamente activos, bajo parámetros controlados de temperatura, pH y nutrientes que permitan la formación de metano en la mayor proporción posible. Es recomendable establecer niveles de sólidos totales no superiores al 10% para permitir el libre movimiento de las bacterias del proceso de biodigestión anaeróbico.

Un parámetro importante es el de generar un tratamiento previo en la alimentación del ganado, que permita la formación de un sustrato rico en sólidos volátiles que permitan la formación de altos volúmenes de biogás. Se estableció un estudio del potencial energético contenido en los desechos de la industria lechera de la Región Metropolitana. En este, se concluyó que mediante el uso del total de los desechos

generados por la existencia bovina lechera es posible generar un volumen de 9.069.350 (m³/año) donde cerca del 67% del total es aportado por vacas destinadas para la ordeña, lo que permite una capacidad de generación energética de un poco más de 58 (GWh) por año de energía bruta a pleno funcionamiento, es decir, las 24 horas del día y los 365 días del año lo que representa el 0,09% del total de energía bruta generada en Chile.

Se concluye, además, que la población bovina a nivel nacional, ha disminuido un 17,2% donde la región que más ha mermado su población bovina es la Región del Maule, cuyo porcentaje de retroceso fue de un 37% disminuyendo, por lo tanto, la cantidad de biomasa de purín generado y consecuentemente, el potencial energético posible de ser generado.

De igual forma, para un plantel de 100 bovinos lecheros, es posible generar una potencia nominal de 39,14 (kW) considerando una estabulación del 100%, es decir, que la totalidad de los desechos generados en el plantel son aprovechados. Aunque la realidad dicta mucho de este valor, la estabulación puede tomar valores que van desde el 4 al 30% dependiendo de la capacidad de recuperación de los desechos en el plantel lechero.

Se logró un diseño de un biodigestor utilizando la normativa API-650 del tipo vertical, según las características de recolección del sustrato este fue diseñado bajo un modelo de biodigestor del tipo mezcla competa sin recirculación de carga continua. A partir de los análisis del tipo sísmico y de viento se concluyó que el estanque era resistente tanto a la acción sísmica y del viento por lo cual no era necesario ser anclado.

Se logró determinar los tipos de accesorios necesarios para la operatividad de la planta de biodigestión, se logró determinar los requerimientos técnicos de los principales componentes de la planta tales como: bomba, motor de cogeneración, mezclador, tuberías, etc.

Finalmente, se logró establecer una evaluación del tipo económica fijando tres indicadores concluyentes para la toma de decisión acerca de la aplicabilidad del proyecto como también de la conveniencia de invertir en este.

7.2 Comentarios

Es factible generar proyectos de biomasa centrados en la utilización de purines de bovinos de lechería confinados, siendo necesario lograr niveles de estabulación altos para permitir un mayor aprovechamiento de los desechos generados por el plantel.

Se hace necesario contar con mediciones que entreguen parámetros químicos y biológicos en la conformación y calidad del purín por el plantel, con el objeto de contar con valores óptimos que permitan un máximo de rendimiento de generación de biogás, de lo contrario, tomar las medidas necesarias para corregir, por medio de la alimentación aquellos valores que limiten un sustrato adecuado para un máximo rendimiento, como por ejemplo, la cantidad de sólidos volátiles presentes en el purín.

La planta cuenta con un rendimiento global igual a un 74,99% es decir de los 39,14 (kW) nominal de potencia diaria generados, tan sólo 29,35 (kW) de potencia son posibles de ser utilizados. Esto representa la suma de la potencia térmica y eléctrica. El proceso requiere de 11,98 (kW) térmicos de potencia para su funcionamiento, lo que representa el 68,03% del total de la generación térmica de la planta, por consiguiente, tan sólo el 31,97% de la potencia térmica generada son susceptibles de ser utilizados en otros procesos como por ejemplo calefacción de establos o pasteurización, es decir, se cuentan con 5,63 (kW) térmicos al día para uso libre. El proceso requiere de 3,03 (kW) eléctricos de potencia para su funcionamiento, lo que representa el 25,81% del total de la generación eléctrica de la planta, por consiguiente, tan sólo el 74,19% de la potencia eléctrica generada son susceptibles de ser utilizados en otros procesos, es decir, se cuentan con 8,71 (kW) eléctricos al día para uso libre.

En función de lo anterior, es importante, a la vez, contar con la tecnología adecuada que entregue las prestaciones de mayor eficiencia que permita el máximo de aprovechamiento de la potencia entregada, así, permitir altas eficiencias térmicas y eléctricas y que se traduzcan en mayores valores de energía útil generada.

El análisis económico, entrega indicadores que son alentadores en la conveniencia de invertir en un proyecto de estas dimensiones, aunque es importante señalar que dichos indicadores quedan susceptibles al criterio de quien invierte y a sus intereses. Según lo anterior, invertir en este proyecto genera un tasa de retorno (TIR) cercana al 14% generando una recuperación de lo invertido en más de 5 años desde la puesta en marcha del proyecto.

Por último, es menester señalar que aunque el resultado económico queda sujeto al criterio del inversionista, el invertir en el proyecto no genera tan sólo una ganancia en dinero, sino también, genera una ganancia en condiciones medioambientales tanto como en el plantel lechero como en sus alrededores ya que permite lograr una disminución considerable en los olores generados, en la manipulación del purín bovino y en la cantidad de vectores asociados a esta actividad.

Bibliografía

- [1] Seminario de energía made in Chile, sala de sesiones del senado, Santiago 17 de diciembre de 2012.
- [2] Balance nacional de energía año 2013, Ministerio de Energía, Gobierno de Chile.
- [3] Energía para el futuro, estrategia nacional de energía 2012-2013 – Ministerio de Energía, Gobierno de Chile, febrero 2012.
- [4] Serie de estudios sectoriales n°2: energía eléctrica, Santander 2014.
- [5] Manuel Rios G. 2013-Estimación de la producción de biogás a partir de purines bovinos en la Región de los Ríos Chile. Memoria de título Facultad de Ciencias Agrarias, Instituto de Ingeniería Agraria y Suelos. UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE. VALDIVIA – CHILE.
- [6] CNE Comisión Nacional De Energía, Chile, GTZ Gesellschaft Für Technische Zusammenarbeit, Alemania. 2007. Identificación y clasificación de los distintos tipos de biomasa disponibles en Chile para la generación de biogás. Comisión Nacional de Energía (CNE). Ministerio de Energía. Chile. ISBN: 978-956-7700-08-0. Anexo 5.
- [7] CNE Comisión Nacional De Energía, Chile, GTZ Gesellschaft Für Technische Zusammenarbeit, Alemania. 2007 GUÍA PARA EVALUACIÓN AMBIENTAL ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES PROYECTOS DE BIOMASA Comisión Nacional de Energía (CNE). Ministerio de Energía. Chile. ISBN: 978-956-7700-06-6 - Santiago de Chile, mayo 2007.
- [8] SALAZAR, F. 2012. Manual de Manejo y Utilización de Purines de Lechería. Consorcio Lechero. Osorno, Chile. 116 p.

- [9] SAG (SERVICIO AGRÍCOLA Y GANADERO). 2006. Diagnóstico de la Problemática Ambiental de los Residuos Generados por la Producción de Aves y Vacunos de Leche en Chile y Capacitación en la Evaluación de Planteles Pecuarios.
- [10] Deublein D, A Steinhauser. 2011. Biogas from waste and renewable resources: An introduction. Wiley-vch. GmbH & Co. KGaA, Weinheim. Alemania.
- [11] GTZ Gesellschaft Für Technische Zusammenarbeit, Alemania. 2010. Guía sobre el biogás. Desde la producción hasta el uso.
- [12] Instituto Nacional de Estadísticas – Encuesta de ganado bovino 2011- ISBN: 978-956-323-119-9.
- [13] Instituto Nacional de Estadísticas, Censo Agropecuario 2007.
- [14] Ljubo Goic, Enrique Siebalds, Mario Matzner – producción de carne con vacas de desecho de lechería – consulta online <http://www2.inia.cl/medios/biblioteca/boltec/NR03949.pdf>.
- [15] Manual de biogás – Ministerio de energía de Chile - “Chile: Remoción de Barreras para la Electrificación Rural con Energías Renovables”. ISBN 978-95-306892-0 - Santiago de Chile, 2011.
- [16] CNE Comisión Nacional De Energía, Chile, GTZ Gesellschaft Für Technische Zusammenarbeit Alemania - guía de planificación para proyectos de biogás en Chile. Comisión Nacional de Energía (CNE). Ministerio de Energía. Chile. ISBN: 978-956-8066-14-7 - Santiago de Chile, junio 2012.
- [17] UPME (Unidad de Planeación Minero Energética). 2003. Guía para la Implementación de Sistemas de Producción de Biogás. Bogotá. COLOMBIA.

- [18] Caracterización de purines producidos en explotaciones de vacunos de leche. Jesús M^a Mangado Urdániz.
- [19] Welded Steel Tanks for Oil Storage. API Estándar 650 Décima Edición. Noviembre 1998.
- [20] Código de soldaduras sobre estructuras. American Welding Society AWS, junio 2002.
- [21] Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales, Norma Chilena Oficial, NCh 2369. Of2003.
- [22] Irving H. Shames. Mecánica de Fluidos. 3ra. ed. McGraw-Hill 1995.
- [23] Warren L. McCabe, Julian C. Smith, Peter Harriot. Operaciones unitarias en Ingeniería Química. 7ma. Ed. McGraw-Hill 2007.
- [24] Instituto para la diversificación y ahorro de la energía (IDAE). Guía técnica para el diseño y cálculo del aislamiento térmico de conducciones, aparatos y equipos. ISBN: 978-84-96680-08-1. Madrid, febrero de 2007.
- [25] Yunus A. Cengel. Transferencia de calor y masa 3ra. ed. McGraw-Hill 2007.
- [26] J. M. Coulson, J. F. Richardson. Ingeniería química tomo I flujo de fluidos, transmisión de calor y transferencia de materia. 3ra. ed. Reverté S.A. 1979.
- [27] Ramón Piqueras Granell. Deshidratadoras de forraje. Hojas Divulgadoras del Ministerio de Agricultura. Madrid.
- [28] Ministerio de Energía, Chile. Modelos de negocio que rentabilicen aplicaciones de biogás y su fomento. Gama Ingenieros N° 584105-8-LE10. Abril 2011.

Anexos

Anexo 1

CARACTERISTICAS TECNICAS Y FABRICACION B 15K - SB 15K

El módulo esta completamente integrado en dimensiones extremadamente compactas y contiene todos los componentes necesarios, los principales son:

Motor

Motor endotérmico 100GL producido a gran escala, alimentado a gas, dotado de encendido electrónico y perno movable de la válvula del motor hidráulico. Proporciona gran flexibilidad y fiabilidad y su manutención no requiere tecnología específica.

Generador eléctrico

Generador eléctrico asíncrono trifásico con rotor con protección de ardilla en aluminio extorsionado y con chapa protectora en hierro fundido para el enfriamiento.

Circuito hidráulico

Es un circuito cerrado con líquido refrigerante que intercambia calor a diversas temperaturas y lugares respectivamente: sobre la cubeta del motor, sobre la base y sobre la descarga de humos. Si el calor producido no se utiliza, el circuito primario cede calor a un radiador externo para el vaciado del exceso térmico.

Alimentación a gas

El motor puede alimentarse con diversos tipos de gases (metano, gas líquido, biogás, etc.), con esta finalidad en la junta elástica hay montado una placa de asiento que permite la variación anticipada en función del gas utilizado

SISTEMA DE REGULACION Y CONTROL

Version Base

El sistema de regulación y control funciona mediante aparatos eléctricos y electromecánicos de componentes discretos. La avería se visualiza en el display del panel de control. Protección de mínima y máxima corriente y ausencia de fase, capaz de emitir una alarma (disección de un relé) si por un cierto número de periodos consecutivos la corriente de al menos de una de las tres fases sale de un campo de valores prefijados.

Version Stand By

Los controles y la regulación de las variadas funciones están sujetas a un sistema electrónico constituido por una tarjeta electrónica, convertidora A/D y transductores analógicos de señal.

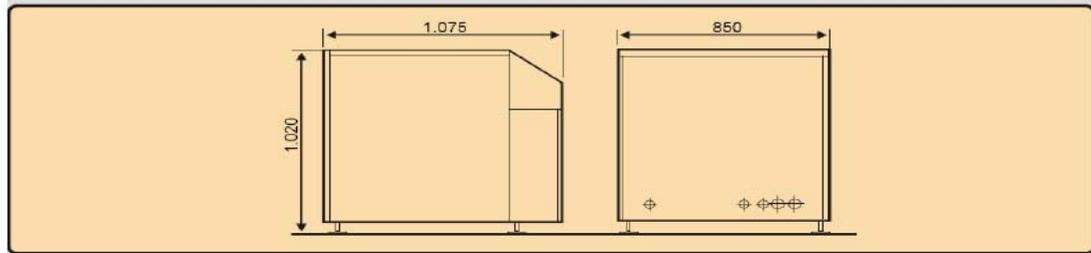
El sistema controla el correcto funcionamiento, el reglaje del grupo de regulación externo depende de la instalación y permite además parar el grupo en caso de avería. La avería se visualiza en el display del panel de control.

Bastidor

Todos los componentes del cogenerador se montan sobre un chasis aislado del exterior por paneles de revestimiento calorífugo provistos de una serie de complementos. De esta manera se evita la dispersión de calor al exterior y se reduce el ruido del motor térmico a 64.0 dB y 1 metro.

Modelo		B 15K	SB 15K
Potencia térmica	kW	39	13+39
Rendimiento a máxima potencia	%	93-97	90-97
Potencia eléctrica	kW	15 _(excit. 0.88)	0-14,5
Potencia de entrada	kW	56,2	15-56,2
Consumo de Metano	m ³ /h	5,7	2-5,7
Consumo GLP	kg/h	4,0	1,5+4,0
Consumo Biogás (60% CH ₄)	m ³ /h	8,4	3-8,4
Temp. Máx. agua de entrada	°C	70	70
Temp. Máx. agua de salida	°C	86	86
Dureza máxima del agua	g(CaCo ₂)/m ³	130	130
Caudal normal agua	l/h	3.000	3.000
Perdidas de carga nominal	kPa	30	30
Tensión trifásico de red	V/Hz	400/50	400/50
Generador eléctrico		asíncrono trifásico con excitación de red	asíncrono trifásico con excitación de red
Encendido		generador eléctrico	Motor c. c.
Conexión uso eléctrico		triángulo	Estrella + neutro
Condiciones ambientales	°C - % - U. R.	0-40/0-95	0-40/0-95
Peso módulo de cogeneración	kg	480	510
Grupo de excitación en cm			(L x P x H) 80 x 37 x 35
Grupo de excitación en kg			130

DIMENSIONES MOD. B 15K - SB 15K



Anexo 2

SALOMON SACK S.A.		C O T I Z A C I Ó N		Original	
OFERTA					
Sr.		Número oferta :	595018		
CLIENTE PORTEZUELO		Fecha oferta :	29/08/2016		
Presente		Cliente :	MPE		
		Número del RUT:	055.555.555-5		
		Vendedor :	1377		
		Ref.:			

En relacion a su solicitud, tenemos el agrado de ofrecer lo siguiente:

Articulo	Descripcion	Cantidad Un	Precio Un	Descuento	Descuento \$	Total Neto	Alm	Fec. Entrega
ANNPG0021 1 PLANCHA	P1 Gr 6x2440x12000mm ASTM-A36	1.405,44 kg	550,00 kg			772.992 CPV		29/08/2016
ANNPG0036 1 PLANCHA	P1 Gr 8x2440x6000mm ASTM-A36	936,96 kg	550,00 kg			515.328 CPV		29/08/2016
ANNPG0056 1 PLANCHA	P1 Gr 10x2440x6000mm ASTM-A36	1.171,20 kg	550,00 kg			644.160 CPV		29/08/2016

Total Neto		IVA 19,0 %	Total
1.932.480		367.171	2.299.651

Condicions. entrega:
 Condiciones pago : 5 efectivo
 Direccion Entrega :
 Esta oferta caduca el 03/09/2016
 Cantidad de Items: 3
 KILOS : 3513,6000

SALOMON SACK S.A.