



Departamento de
Ingeniería Mecánica
Universidad de Concepción

Diseño Ingeniería Básica Proyecto Biodigestor Caleta La Barra

Aylin Soto Bravo

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para optar al título profesional de Ingeniero Civil Mecánico

Profesor guía:
Dra.- Ing. Einara Blanco Machin

Enero 2026
Concepción, Chile

©2026 Aylin Noemí Soto Bravo

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

Agradecimientos

A continuación, me gustaría agradecer a todas las personas que estuvieron presentes en mi vida durante la realización de esta memoria y el transcurso de mi proceso universitario.

Para comenzar quiero agradecer a mi profesora guía, Einara Blanco Machín, quien siempre estuvo dispuesta a ayudarme y guiarme sin importar lo ocupada que estuviera, es una referencia fuerte de la clase de profesional y persona que aspiro a ser, por eso la admiro mucho.

Por otro lado, está el profesor Javier Piedra Fierro, quien me enseñó la realidad de trabajar en un proyecto, la planeación, búsqueda de soluciones y, sobre todo, el trato a las personas y la importancia de ganar la confianza del cliente.

Pasando a mi familia, gracias a mis padres, Claudio Soto Bascur y Marisol Bravo Sanhueza, quienes me apoyaron y soportaron estos 6 años de carrera, escuchando mis quejas, preocupaciones, frustraciones y penas. Ellos me dieron la fuerza y motivación para lograr completar este proceso.

También conté con el privilegio de tener a mi abuelita Encarnación Sanhueza Flores a mi lado, animándome con sus comidas y su humor negro. Estoy orgullosa de haber logrado esto con ella presente. Y no me olvido de su hermana, mi tía abuela, Lucila Sanhueza Flores, quien partió durante este año, antes de poder mostrarle este logro.

Mi hermana, Claudia Soto Bravo, quien fue mi compañera diaria por 20 años, hasta que ella misma debió emprender su camino universitario. Con ella he compartido risas y desacuerdos, siempre ha estado para mí, incluso viviendo lejos.

No puedo olvidar a mis padrinos, Julio Campos Cárcamo y Viviana Soto Bascur, quienes siempre me mostraron lo orgullosos que están de mí y lo mucho que confían en mis capacidades, hasta cuando yo misma he dudado, por eso los quiero mucho.

A mis primos, Vivian Campos Soto, Daniel Cofré Pedreros y Vicente Campos Soto. Ellos crecieron conmigo y me han apoyado toda la vida. Gracias por compartir conmigo y ayudarme a pasarla bien cuando estaba estresada y me sentía sola.

Además, conté con mis amigas de la vida, Makarena Martínez Weber y Sofía Lienlaf Sáez, ellas han estado a mi lado desde el colegio, compartiendo anécdotas, risas y chismes. Mis amigos de la universidad, Gonzalo Mella Sánchez, Emilio López Flores y Vicente Manquez Orrego, gracias a ellos la universidad fue un poco menos difícil y mucho más llevadera, estoy segura de que les espera un futuro brillante.

Kay y Kayla, mis mascotas, ellos me dan fuerzas y me animan. Siempre he pensado que me esfuerzo para poder darles una muy buena vida regalándoles con la mejor comida y juguetes, es lo mínimo que se merecen.

Por último, a mi pareja, Elson Valencia Aguayo, quien es lo mejor que me ha dado la universidad. Él me apoya, alegra y aconseja, sin él la ansiedad de escribir esta memoria me hubiera consumido. Gracias por estar siempre conmigo, te amo.

Resumen

La caleta La Barra enfrenta problemas ambientales derivados del vertido directo de residuos orgánicos de la pesca artesanal en el río Toltén, generando malos olores y aumento de carga orgánica en el ecosistema. Para abordar esta situación, la presente memoria desarrolla el diseño e ingeniería de detalle de una planta de biodigestión anaerobia destinada a valorizar los residuos orgánicos de la comunidad y producir biogás como fuente de energía renovable.

Se identificaron y cuantificaron residuos provenientes de vísceras de salmón, róbalo, restaurantes y hogares, estableciendo cuatro escenarios de disponibilidad entre 9.3 y 44.5 toneladas anuales. Estos permiten generar entre 162 y 331 *kg* equivalentes de GLP por mes, además de 28 a 76 *m*³ anuales de fertilizante orgánico.

El sistema diseñado incorpora dos digestores: un biodigestor tipo Cubo para pretratamiento del sustrato y un biodigestor Pulmón Flexible, que combina digestión y almacenamiento de biogás en una sola unidad, optimizando espacio y operación. A ello se suma un sistema de calefacción que integra colectores solares y un termo a biogás especialmente diseñado, asegurando condiciones mesofílicas estables.

La inversión inicial del proyecto es de \$20,020,000, mientras que el costo de operación anual asciende a \$869,406. El flujo de caja a diez años, basado en los ahorros por sustitución de GLP, demuestra que el sistema genera beneficios económicos netos desde el primer año de operación.

Además de su viabilidad técnica y económica, la planta reduce impactos ambientales, mejora las condiciones sanitarias de la caleta y promueve el manejo sostenible de residuos, posicionándose como una solución efectiva y replicable para comunidades costeras de pequeña escala.

Palabras clave: Digestión Anaerobia, biodigestor, manejo de residuos, residuos orgánicos, biogás, ingeniería de detalle.

Abstract

La Barra Cove faces environmental issues resulting from the direct discharge of organic waste from artisanal fishing into the Toltén River, causing unpleasant odors and increasing the organic load in the ecosystem. To address this situation, this thesis develops the design and detailed engineering of an anaerobic biodigestion plant aimed at valorizing the community's organic waste and producing biogas as a renewable energy source.

Organic residues from salmon viscera, robalo viscera, restaurants, and households were identified and quantified, establishing four availability scenarios ranging from 9.3 to 44.5 tons per year. These scenarios enable the generation of between 162 and 331 *kg* of LPG-equivalent per month, along with 28 to 76 *m*³ of organic fertilizer annually.

The proposed system incorporates two digesters: a Cube-type biodigester for substrate pretreatment and a Flexible Lung biodigester, which combines digestion and biogas storage within a single unit, optimizing both space and operation. Additionally, a heating system integrating solar collectors and a biogas-powered water heater ensures stable mesophilic conditions.

The project's initial investment amounts to CLP \$20,020,000, while annual operating costs total CLP \$869,406. The ten-year cash flow analysis, based on savings from LPG substitution, shows that the system generates net economic benefits from the first year of operation.

Beyond its technical and economic feasibility, the plant reduces environmental impacts, improves sanitary conditions in the cove, and promotes sustainable waste management, positioning it as an effective and replicable solution for small-scale coastal communities.

Keywords: Anaerobic biodigestion, digester, waste management, organic waste, biogas, detailed engineering.

Contenidos

Lista de Figuras	viii
Lista de Tablas.....	ix
Nomenclatura	x
1 Introducción	1
1.1 Contexto	1
1.2 Estado del arte.....	2
1.3 Hipótesis.....	4
1.4 Objetivos.....	4
1.4.1 Objetivo general.....	4
1.4.2 Objetivos específicos	4
2 Metodología	5
3 Desarrollo del proyecto y resultados	6
3.1 Identificación y cuantificación de residuos orgánicos en el área de influencia..	6
3.1.1 Vísceras de Salmón.....	7
3.1.2 Vísceras de Róbalo	7
3.1.3 Residuos Orgánicos de la Comunidad	8
3.1.4 Residuos de Restaurantes	9
3.1.5 Cantidad Total de Residuos en la Zona de Influencia	10
3.2 Supuestos, criterios de diseño y escenario seleccionado.....	11
3.3 Análisis del Potencial de Biogás	12
3.3.1 Ubicación de la Planta.....	16
3.4 Componentes de la Planta	18
3.4.1 Proceso de Digestión Anaeróbica.....	18
3.4.2 Descripción de componentes del Sistema	18
3.4.3 Diseño del Biodigestor Cubo.....	25
3.4.4 Diseño del Biodigestor Pulmón	26
3.4.5 Diseño del Sistema de Trituración	27
3.4.6 Diseño del Sistema de Calefacción	30
3.4.7 Balance de masa y energía	41
3.4.8 Selección de los Elementos de la Planta de biodigestión	42
3.5 Análisis Económico.....	49
3.5.1 Costos de inversión.....	49
3.5.2 Costos de Operación y Mantenimiento.....	50
3.5.3 Beneficios del Proyecto	51
3.5.4 Flujo de Caja del Proyecto	52
3.5.5 Análisis de Sensibilidad.....	55

3.6	Análisis Ambiental	56
3.6.1	Línea Base Ambiental.....	56
3.6.2	Identificación de aspectos e impactos ambientales	57
3.6.3	Evaluación de Impactos	57
3.6.4	Medidas de Mitigación.....	58
4	Conclusiones.....	59
	Referencias.....	60
	Anexo 1: Planos del biodigestor cubo	62
	Anexo 2: Balance de masa y energía	1

Lista de Figuras

Figura 1: Esquema de la metodología	6
Figura 2: Esquema del proceso de la planta	18
Figura 3: Ejemplo de Biodigestor Pulmón	19
Figura 4: Ejemplo de Biodigestor Cubo.....	20
Figura 5: Ejemplo de Bomba de Agua dilución.....	21
Figura 6: Ejemplo de Bomba de Agua calefacción	21
Figura 7: Ejemplo de Termo a biogás.....	22
Figura 8: Ejemplo de Colectores solares.....	22
Figura 9: Ejemplo de Quemador de biogás.....	24
Figura 10: Ejemplo de Invernadero	25
Figura 11: Áreas consideradas para la realización del proyecto	Error! Marcador no definido.
Figura 12: Estructura del biodigestor cubo.....	62
Figura 13: Tapa del biodigestor cubo	63
Figura 14: Excel balance de masa y energía	1

Lista de Tablas

Tabla 1: Cantidad de salmón extraído en los últimos 10 años.....	7
Tabla 2: Estimación generación residuos vísceras de róbalo	8
Tabla 3: Generación de residuos orgánicos residenciales.....	9
Tabla 4: Generación de residuos restaurantes	9
Tabla 5: Generación mensual de residuos orgánicos de los restaurantes	10
Tabla 6: Resumen generación de residuos orgánicos en el área de influencia	10
Tabla 7: HRT para cada escenario	14
Tabla 8: Indicadores de volumen y potencial energético para cada escenario	15
Tabla 9: Resumen Indicadores de volumen y potencial energético	15
Tabla 10: Valores considerados en los cálculos	31
Tabla 11: Supuestos iniciales para los cálculos.....	36
Tabla 12: Valores establecidos para el diseño.....	40
Tabla 13: Valores establecidos para el diseño del sistema de trituración	28
Tabla 14: Tabla resumen de condiciones de borde sobre potenciales lugares de implementación del proyecto	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 15: Valores para los cálculos de la bomba.....	42
Tabla 16: Parámetros de selección de bomba	43
Tabla 17: Operación de la bomba	44
Tabla 18: Datos para dimensionar la bomba de agua caliente	44
Tabla 19: Resultados para los diferentes diámetros	45
Tabla 20: Dimensiones y precios de las cisternas cotizadas.	46
Tabla 21: Datos nuevos colectores	47
Tabla 22: Costos de inversión	49
Tabla 23: Flujo de caja para cada escenario	53
Tabla 24: Indicadores económicos	54

Nomenclatura

A_c	Área interna del tubo m^2
A_{chim}	Área de la Chimenea m^2
A_{col2}	Área de colector solar modificado m^2
A_{ext}	Área exterior del tubo del módulo solar m^2
A_{esp}	Área externa de la espiral del digestor cubo m^2
A_{mod}	Área módulo solar m^2
A_{tub1}	Área de las tuberías de la bomba 1 m^2
A_{tub2}	Área de las tuberías de la bomba 2 m^2
$C_{p,agua}$	Capacidad calorífica del agua kJ/kgK
$C_{p,s}$	Capacidad calorífica del sustrato kJ/kgK
$Cos\varphi$	Factor de potencia del motor $[-]$
D	Diámetro del termo m
D_2	Diámetro del nuevo termo m
d_{ej}	Diámetro del eje de las licuadoras mm
D_c	Diámetro de las cuchillas mm
$D_{c,e}$	Diámetro externo de la tubería de la espiral del digestor mm
D_i	Diámetro interno de la tubería de la espiral del digestor in
$D_{i,e}$	Diámetro interno de la tubería de la espiral del colector mm
D_o	Diámetro interno de la chimenea m
$D_{o,e}$	Diámetro externo de la tubería de la espiral del colector mm
D_{tub1}	Diámetro de las tuberías de la bomba 1 mm
D_{tub2}	Diámetro de las tuberías de la bomba 2 mm
E_{act}	Energía para calentar el agua del nuevo termo kWh
$E_{guardado}$	Energía almacenada en el termo nuevo kWh
E_{m^3}	Energía térmica necesaria para calentar 1 m^3 de agua kJ
E_{mes}	Energía térmica por mes MJ/mes
E_{mod}	Energía diaria por módulo $kWh/día$
E_{mod2}	Energía diaria por módulo nuevo $kWh/día$
$E_{q,h}$	Energía química por hora para calentar el termo MJ/h

$E_{q,h2}$	Energía química por hora para calentar el termo nuevo MJ/h
E_s	Energía del aporte solar del 30% kWh
E_{s2}	Energía diaria objetivo del aporte solar del 15% $kWh/día$
E_{slurry}	Energía específica para triturar 1 kg de slurry J/kg
E_{termo}	Energía necesaria para calentar el termo kJ
$\%E_{s2}$	Porcentaje de energía solar almacenada $[-]$
f	Factor de fricción para el espiral del colector $[-]$
f_{bb1}	Factor de fricción para la bomba 1 $[-]$
f_{bb2}	Factor de fricción para la bomba 2 $[-]$
f_{solar}	Porcentaje de aporte solar $[-]$
g	Aceleración de gravedad m/s^2
GLP_{mes}	Energía equivalente en gas licuado kg
H	Altura del termo m
H_2	Altura del nuevo termo m
h_{acc}	Perdidas de carga por accesorio m
h_{acc2}	Perdida de carga por accesorio bomba 2 m
H_c	Altura del cubo m
h_{est}	Altura total de la tubería para la bomba 1 m
h_f	Perdida de carga por fricción de la bomba 1 m
h_{f2}	Perdida de carga por fricción de la bomba 2 m
$h_{f,e}$	Perdida de carga por fricción de la espiral del colector m
h_i	Coeficiente de transferencia de calor por convección interna en el serpentín del digestor W/m^2K
h_{in}	Coeficiente de transferencia de calor por convección interna en el serpentín del colector W/m^2K
$h_{in,e}$	Coeficiente de transferencia de calor por convección externo en el serpentín del colector W/m^2K
H_m	Irradiación solar diaria $kWh/m^2día$
H_{mes}	Horas en un mes h
h_o	Coeficiente de transferencia de calor por convección externa en el serpentín del digestor W/m^2K

h_{perd}	Perdida de carga total de la bomba 1 m
h_{perd2}	Perdida de carga total de la bomba 2 m
HRT	Tiempo de retención hidráulica $días$
h_{suc}	Altura de succión de la bomba 1 m
$h_{tot,real}$	Altura dinámica requerida de la bomba 2 m
I	Irradiancia solar instantánea W/m^2
I_0	Irradiancia solar estándar W/m^2
I_{motor}	Corriente eléctrica de un motor A
I_{total}	Corriente eléctrica de todos los motores A
k	Conductividad térmica del termo W/mK
k_{agua}	Conductividad térmica del agua W/mK
k_{PE}	Conductividad térmica del polietileno W/mk
k_i	Relación entre el diámetro de las cuchillas y el radio efectivo de la mezcla $[-]$
K_{codo}	Coefficiente de pérdida de carga por un codo $[-]$
K_{sum}	Suma de las perdidas por accesorio $[-]$
$K_{válvula}$	Coefficiente de pérdida de carga por una válvula $[-]$
L_c	Largo del cubo m
L_{chim}	Largo de la chimenea m
LHV_{biogas}	Valor calorífico inferior del biogás MJ/m^3
LHV_{GLP}	Valor calorífico inferior del gas licuado MJ/kg^3
L_{mod}	Longitud total del serpentín del colector m
$L_{separación}$	Separación radial entre vueltas concéntricas de la espiral del digestor mm
L_{to}	Longitud total de la estructura del triturador m
L_{tub}	Longitud total de la tubería de la bomba 1
L_{tub2}	Longitud total de la tubería de la bomba 12
L_{usable}	Longitud donde se pueden colocar las cuchillas m
$\dot{m}_{col}$	Caudal másico del colector kg/s
$\dot{m}_{GLP}$	Caudal másico de GLP kg/h
m_{max}	Masa máxima diaria de los residuos a procesar kg

m_s	Masa total del sustrato kg
$\dot{m}_{trit}$	Caudal másico del triturador kg/s
N	Numero de módulos $[-]$
N_2	Número de colectores nuevos necesarios $[-]$
N_o	Numero de motores/cuchillas $[-]$
Nu	Numero de Nusselt para el espiral del colector $[-]$
PCI_{CH_4}	Poder calorífico inferior del metano kWh/Nm^3
P_{el}	Potencia mínima de la bomba 1 W
P_{el2}	Potencia mínima de la bomba 2 W
$P_{el,d}$	Potencia nominal eléctrica disponible kW
P_{motor}	Potencia requerida por cada motor W
P_{net}	Potencia para calentar el termo kW
$P_{net,act}$	Potencia para calentar el termo nuevo kW
P_{nom}	Potencia nominal kW
$P_{quem,act}$	Potencia del quemador nuevo kW
Pr	Numero de Prandlt para el espiral del colector $[-]$
P_{req}	Potencia necesaria para triturar el slurry W
PSH	Horas de sol pleno h
P_{un}	Potencia de una licuadora comercial W
Q_{bb1}	Caudal de la bomba 1 m^3/h
Q_{bb2}	Caudal de la bomba 2 m^3/h
Q_{esp}	Potencia entregada por el espiral del digestor kW
Q_{loss}	Pérdida de calor del termo W
$Q_{loss,act}$	Pérdida de calor del termo nuevo W
$\dot{q}_{loss}$	Pérdidas instantáneas por temperaturas W
$\dot{q}_{opt}$	Ganancia óptica instantánea W
Q_s	Energía necesaria para calentar el sustrato kJ
$\dot{Q}_{sol}$	Potencia efectiva durante las horas de sol kW
$\dot{Q}_{u,peak}$	Potencia útil instantánea estimada W
r_1	Radio interno del termo m

$r_{1,act}$	Radio interno del nuevo termo m
r_2	Radio externo del termo m
$r_{2,act}$	Radio externo del nuevo termo m
R_{cond}	Resistencia a la conducción radial del termo K/W
$R_{cond,act}$	Resistencia a la conducción radial del nuevo termo K/W
$R_{cond,in}$	Resistencia térmica de tubo plástico K/W
Re	Número de Reynolds para la espiral del colector $[-]$
Re_{tub1}	Número de Reynolds para la tubería de la bomba 1 $[-]$
Re_{tub2}	Número de Reynolds para la tubería de la bomba 2 $[-]$
R_m	Radio efectivo de la mezcla m
R_{tot}	Resistencia total m^2K/W
R_{wall}	Resistencia por pared plástica m^2K/W
S	Separación centro-centro de las cuchillas m
S_{max}	Sustrato máximo kg
$S_{salmón,mes}$	Residuos de salmón en un mes kg
$S_{residencial}$	Residuos orgánicos residenciales al mes kg
$S_{róbalo,mes}$	Residuos de róbalo en un mes kg
T	Torque Nm
t	Espesor del termo m
T_{amb}	Temperatura del ambiente $^{\circ}C$
t_c	Tiempo de calentamiento h
TDH	Altura dinámica requerida para la bomba 1 m
$t_{máx}$	Tiempo de trituración min
T_{me}	Temperatura media del fluido dentro del colector $^{\circ}C$
t_t	Espesor del tubo del serpentín del colector m
$U_{a,g}$	Coefficiente global de transferencia de calor entre el agua y el gas W/m^2K
U_{esp}	Coefficiente global de transferencia de calor de la espiral del digestor W/m^2K
U_L	Coefficiente global de pérdidas térmicas del colector W/m^2K

U_{tube}	Coeficiente global de transferencia de calor del tubo del serpentín W/m^2K
V	Volumen seleccionado para el termo m^3
V_{al}	Voltaje de alimentación eléctrica V
v_{bba1}	Velocidad del agua en la bomba 1 m/s
v_{bba2}	Velocidad del agua en la bomba 2 m/s
$\dot{V}_{biog}$	Flujo de biogás m^3/h
$V_{CH4,mes}$	Volumen de metano por mes m^3
$\dot{V}_{col}$	Flujo volumétrico m^3/h
v_{col}	Velocidad en el espiral del colector m/s
$V_{fert,año}$	Volumen máximo de fertilizante al año m^3
$V_{geom,c}$	Volumen geométrico del cubo m^3
$\dot{V}_{GLP}$	Flujo volumétrico de GLP L/h
$V_{inóculo,c}$	Volumen de inóculo necesario en el biodigestor cubo m^3
$V_{inóculo,p}$	Volumen de inóculo necesario en el biodigestor pulmón m^3
V_{min}	Volumen mínimo de agua para almacenar la energía de los colectores m^3
V_{nuevo}	Volumen del nuevo termo m^3
$V_{útil}$	Volumen útil del reactor m^3
$V_{util,c}$	Volumen útil del digestor cubo usado para cálculos m^3
W_c	Ancho del digestor cubo m
W_m	Velocidad de giro del motor rpm
Y_{CH4}	Rendimiento del metano Nm^3/Ton

Letras griegas

α_{Tubo}	Absortancia del tubo del serpentín del colector solar $[-]$
Δp	Perdida de presión en el espiral kPa
ΔT	Variación de la temperatura del agua fría al agua caliente necesaria K
ΔT_{col}	Salto térmico del colector $^{\circ}C$
ΔT_{lm}	Variación de la temperatura entre el agua y los gases K

$\Delta T_{lm,2}$	Variación de la temperatura entre el agua y el slurry K
ΔT_s	Variación de la temperatura del sustrato K
ΔT_t	Variación de la temperatura en el termo K
ε_{pvc}	Rugosidad de la tubería de PVC m
μ_{agua}	Viscosidad dinámica del agua Pas
η_{av}	Eficiencia media diaria del módulo $[-]$
η_{bba1}	Eficiencia de la bomba 1 $[-]$
η_{bba2}	Eficiencia de la bomba 2 $[-]$
η_{con}	Eficiencia de la conversión de la energía mecánica a trituración $[-]$
η_{ist}	Eficiencia media estimada del módulo $[-]$
η_{gen}	Potencia del generador $[-]$
η_{mo}	Eficiencia del motor $[-]$
η_o	Eficiencia óptica del colector solar $[-]$
η_q	Eficiencia del quemador $[-]$
ν_{agua}	Viscosidad cinemática del agua m^2/s
π	Razón entre la circunferencia de un círculo y su diámetro $[-]$
ρ_{agua}	Densidad del agua kg/m^3
ρ_{GLP}	Densidad del gas licuado kg/L
τ_{adm}	Esfuerzo cortante admisible $[MPa]$
$\tau_{diseño}$	Esfuerzo cortante del diseño $[MPa]$
τ_{max}	Esfuerzo cortante máximo $[MPa]$
τ_{PMMA}	Transmitancia del PMMA $[-]$
ω	Velocidad angular rad/s

1 Introducción

1.1 Contexto

En Chile existen aproximadamente 467 caletas pesqueras reconocidas por la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura (Subpesca) [1], distribuidas a lo largo del territorio nacional, desde la región de Arica y Parinacota hasta la región de Magallanes. Entre ellas se encuentra la caleta La Barra, ubicada en la desembocadura del río Toltén, en la comuna de Toltén, región de La Araucanía.

Según el Censo Nacional de Población y Vivienda 2017, esta caleta cuenta con una población de 129 habitantes [2], cuya principal actividad económica es la pesca artesanal, complementada por un incipiente desarrollo turístico. Su producción se ha especializado principalmente en la captura de salmón Chinook.

En 2018, la Subpesca otorgó autorización oficial para la extracción artesanal de salmón Chinook en el estuario del río Toltén. Además, a partir de 2024, los pescadores de la caleta obtuvieron la autorización para la extracción de róbalo en la zona.

Como resultado de esta actividad económica y del inadecuado manejo de los residuos generados, se ha identificado una problemática ambiental en el río Toltén. Los desechos provenientes de las labores de limpieza y procesamiento de pescado han sido vertidos directamente en el cauce del río, lo que ha ocasionado malos olores y un aumento en la carga orgánica y viscosidad del agua. Esta situación refleja un deterioro en la calidad del recurso hídrico y un impacto negativo en el hábitat acuático, afectando potencialmente a las especies ícticas presentes en el ecosistema.

Con el fin de abordar esta problemática, se propone valorizar los residuos orgánicos generados por la actividad pesquera, incluyendo vísceras y otros subproductos del pescado, para la producción de biogás mediante procesos de digestión anaerobia. Para ello, se plantea la implementación de una planta de tratamiento equipada con los sistemas necesarios para garantizar un proceso eficiente, fácil de operar y adaptado a las capacidades técnicas de los habitantes de la caleta.

El presente proyecto se orienta al diseño e implementación de un sistema destinado a valorizar los residuos generados por la actividad pesquera, junto con los desechos orgánicos producidos diariamente por la comunidad, con el propósito de mitigar los problemas asociados a su inadecuado manejo. El sistema se estructura en torno a dos biodigestores: el primero cumple la función de pretratamiento de los residuos orgánicos, facilitando el inicio de la digestión anaeróbica, mientras que el segundo está destinado a completar la mayor parte de dicho proceso biológico.

1.2 Estado del arte

Según la literatura, la digestión anaerobia (DA) es un proceso biológico complejo en el que consorcios microbianos descomponen materia orgánica en ausencia de oxígeno, generando principalmente biogás, compuesto en su mayoría por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), y un subproducto estabilizado denominado digestato [3]. Este proceso se desarrolla a través de cuatro etapas metabólicas interdependientes: hidrólisis, donde polímeros orgánicos complejos se descomponen en monómeros; acidogénesis, que transforma dichos compuestos en ácidos grasos volátiles; acetogénesis, que convierte esos productos en acetato, CO_2 e hidrógeno; y finalmente metanogénesis, donde arqueas metanogénicas producen metano como principal componente energético del biogás [4].

La digestión anaerobia es una tecnología consolidada a nivel mundial que contribuye significativamente a la gestión de residuos orgánicos, la mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero y la generación de energía renovable [5]. Si bien su implementación requiere inversión de capital, planificación de infraestructura adecuada y marcos regulatorios claros, se reconoce como una estrategia esencial en la transición hacia sistemas energéticos sostenibles.

Una de las principales ventajas de la DA es su versatilidad en el uso de sustratos, ya que puede procesar residuos agroindustriales, estiércol, lodos de depuradora, subproductos de la industria alimentaria e incluso desechos pesqueros. Además, el digestato generado es un subproducto rico en nutrientes que puede ser utilizado como fertilizante orgánico, promoviendo así un modelo de economía circular al reincorporar los nutrientes al sistema productivo y reducir la dependencia de insumos químicos [6]. Por estas razones, la digestión anaerobia se ha posicionado como una tecnología clave para el aprovechamiento energético de residuos y la gestión integral de la biomasa.

La digestión anaerobia (DA) es un proceso biológico mediante el cual comunidades microbianas degradan residuos orgánicos en ausencia de oxígeno, produciendo biogás, una mezcla compuesta mayoritariamente por metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), que puede aprovecharse como fuente de energía renovable [3][6].

El proceso de digestión se puede realizar con distintos tipos de residuos orgánicos, como el pescado. Se han realizado ensayos de co-digestión de residuos de procesamiento de pescado con fracciones líquidas de carbonización hidrotermal de bambú, reportando que esta combinación aumentó en un 81% la producción total de biogás, aunque con una ligera disminución del rendimiento de metano respecto a los residuos de pescado digeridos de manera independiente ($133 \text{ mL CH}_4/\text{g VS}$ frente a $142 \text{ mL CH}_4/\text{g VS}$) [7].

Siguiendo con las investigaciones con residuos pesqueros, un estudio reportó que la co-digestión de pescado con jacinto de agua bajo condiciones mesofílicas incrementa significativamente la producción de metano, alcanzando valores de $254 \text{ mL CH}_4/\text{g VS}$, lo que evidencia el potencial de residuos acuícolas como materia prima para bioenergía [8].

Asimismo, se ha analizado la co-digestión de desechos pesqueros con estiércol bovino y residuos de mercado, observando mejoras en la estabilidad del proceso y en la calidad del biogás obtenido [9]. Estos hallazgos respaldan la implementación de sistemas de digestión

anaerobia adaptados a comunidades costeras, donde los residuos de la actividad pesquera representan una fuente abundante y de bajo costo para la generación de energía renovable.

Para facilitar las condiciones necesarias para lograr la DA se utiliza un sistema llamado biodigestor, el cual optimiza el proceso de obtención del biogás utilizando desechos orgánicos. Un biodigestor cuenta principalmente con un tanque de almacenamiento, puede ser un bidón rígido o una cámara plástica flexible en la cual se almacena la materia orgánica [10]. Para lograr esta función dicha sección debe contar con una abertura de entrada y una salida para realizar la carga y descarga de la materia y estas deben estar a distintos niveles de altura para que la materia pueda fluir a gravedad, colocando el punto de entrada en un punto superior a la salida [11].

Posteriormente, en el interior del tanque, la materia orgánica se somete a fermentación anaerobia, generando biogás y biol. El biol se extrae por gravedad al añadir nueva carga, mientras que el biogás se conduce por una tubería equipada con una válvula con esponjilla de hierro para eliminar compuestos tóxicos antes de su uso [12]. Luego el sistema incorpora una trampa de agua para condensar el vapor del biogás y una válvula de alivio como mecanismo de seguridad ante sobrepresiones, permitiendo que el gas tratado sea conducido de forma segura a quemadores o estufas para su aprovechamiento energético.

La digestión anaerobia puede llevarse a cabo en diversos tipos de biodigestores, cuya selección depende de las características del sustrato, las condiciones de operación y los objetivos del proceso. La literatura clasifica a los biodigestores principalmente según el contenido de sólidos, el régimen de alimentación, el rango de temperatura y la configuración constructiva [13].

En relación con el contenido de sólidos, se distinguen los digestores húmedos (wet-AD), que trabajan con concentraciones menores al 15% de sólidos totales, y los digestores secos (dry-AD o de estado sólido), que operan con contenidos superiores al 15%, llegando hasta 40% en algunos casos [14].

Según el régimen de alimentación, los digestores pueden ser de tipo batch, donde el material se carga y procesa por lotes, o de flujo continuo (continuous stirred tank reactor, CSTR), que permite una operación más estable y uniforme [13]

Respecto a la temperatura de operación, los digestores se clasifican en mesofílicos (30–40 °C), más estables y de uso extendido, y termofílicos (50–60 °C), que permiten mayores velocidades de reacción y reducción de patógenos, aunque requieren un control más estricto [14].

En cuanto a la configuración constructiva, los diseños más utilizados en zonas rurales y de pequeña escala son los biodigestores de cúpula fija (fixed-dome), de tambor flotante (floating-drum) y de tipo tubular o bolsa plástica. El modelo de cúpula fija destaca por su durabilidad y bajo costo de mantenimiento, mientras que el tambor flotante facilita la regulación del biogás a presión constante, aunque requiere mayor cuidado frente a la corrosión [15].

En aplicaciones de mayor escala se utilizan tecnologías avanzadas como los reactores de flujo pistón (plug-flow), reactores de lecho granular ascendente (UASB) y sus variantes de

alta tasa como EGSB o IC reactors, que permiten operar con mayores cargas orgánicas y una eficiencia mejorada en el tratamiento de aguas residuales industriales [13].

En este proyecto se plantea el diseño de una planta de generación de biogás a partir de la digestión anaeróbica de residuos orgánicos provenientes de una comunidad de pequeña escala. La fracción principal de estos residuos corresponde a vísceras de pescado, lo que determina en gran medida las condiciones de operación del sistema. Para el proceso se contempla la implementación de dos biodigestores: uno de cúpula fija, destinado al pretratamiento y acondicionamiento inicial del sustrato, y un biodigestor tipo “bolsa plástica”, en el cual se desarrolla la mayor parte del tiempo de residencia y, por ende, de la digestión anaeróbica.

Considerando la naturaleza estacional de la actividad pesquera, se opta por un régimen de operación tipo batch, el cual ha demostrado ser más apropiado en sistemas donde la alimentación continua no es viable y se requiere simplicidad operativa [13]. Asimismo, dado el alto contenido de humedad de los residuos, el sistema se clasifica como un digestor húmedo, configuración recomendada para sustratos con baja fracción de sólidos totales (<15%) [3]. Finalmente, se proyecta su operación en un rango de temperatura de 30 a 40 °C, correspondiente a condiciones mesofílicas, las cuales ofrecen mayor estabilidad microbiológica y robustez frente a variaciones ambientales, en comparación con la digestión termofílica [16]. Esta configuración permite equilibrar factibilidad técnica, eficiencia energética y facilidad de operación en contextos comunitarios.

1.3 Hipótesis

El desarrollo del diseño e ingeniería básica de un biodigestor de biogás adaptado a las condiciones de la Caleta La Barra permitirá establecer las bases técnicas necesarias para un futuro tratamiento eficiente de los residuos orgánicos y la generación de biogás. Este diseño, orientado a cumplir criterios de seguridad, funcionalidad y adaptabilidad, demostrará la viabilidad del biodigestor como estrategia de valorización de residuos para la comunidad.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

Diseñar y desarrollar la ingeniería básica de un biodigestor de biogás adaptado a las condiciones técnicas, ambientales y socioeconómicas de la Caleta La Barra, que sienta las bases para un futuro tratamiento eficiente de los residuos orgánicos y la generación de biogás como fuente de energía renovable.

1.4.2 Objetivos específicos

1. Evaluar el potencial de producción de biogás a partir de los residuos de salmón de la Caleta La Barra mediante análisis de composición y rendimiento energético.
2. Dimensionar el biodigestor y los sistemas asociados considerando la cantidad y características de los residuos para optimizar la producción de biogás.

3. Analizar los costos de implementación, operación y mantenimiento del sistema, determinando su viabilidad económica.
4. Evaluar la factibilidad ambiental del biodigestor, considerando impactos y beneficios para la comunidad y el entorno local.

2 Metodología

La metodología de este proyecto se estructura de manera secuencial y coherente con los objetivos planteados, de modo que cada etapa aporta insumos concretos para la siguiente. El enfoque adoptado es de carácter aplicado y descriptivo, orientado a determinar la factibilidad técnica, económica y ambiental de la implementación de un sistema de biodigestión en la Caleta La Barra.

En primer lugar, se desarrolla un proceso de recolección y caracterización de datos iniciales en la caleta. Esta etapa considera la identificación de las fuentes de residuos orgánicos disponibles y el análisis de sus principales características fisicoquímicas relevantes para el proceso de digestión anaerobia. Posteriormente, y a partir de esta información, se realiza una estimación del potencial de producción de biogás mediante la aplicación de modelos y cálculos teóricos, complementados con la evaluación de la calidad del gas obtenido y su rendimiento energético.

Con estos antecedentes, se procede al dimensionamiento de los biodigestores, lo que implica la estimación del volumen y la frecuencia de generación de residuos considerando la actividad pesquera y el comportamiento diario de la comunidad. De este modo, es posible determinar las dimensiones óptimas de cada biodigestor, necesarias para responder a la demanda de tratamiento de residuos y de producción energética.

Una vez determinadas las dimensiones, se aborda el diseño general de la planta, incorporando tanto el biodigestor como los sistemas asociados, tales como tuberías, almacenamiento y conexiones. Este diseño se ajusta a las características del terreno y a las condiciones ambientales locales, en particular la temperatura, a fin de garantizar la eficiencia del proceso de digestión anaerobia. En esta etapa también se generan los planos de la planta y de los distintos elementos que la componen, con el propósito de contar con un documento base para su futura construcción e implementación.

A continuación, se realiza el análisis económico del proyecto. Para ello se elabora un inventario detallado de los equipos y materiales requeridos, los cuales son sometidos a un proceso de cotización. Con esta información se estiman los costos de implementación, operación y mantenimiento del sistema, permitiendo elaborar un informe de viabilidad económica que sirva como respaldo técnico para la toma de decisiones.

Finalmente, se lleva a cabo la evaluación ambiental y social del proyecto. Esta etapa incluye la identificación y análisis de los impactos ambientales, tanto positivos como negativos, derivados de la implementación del biodigestor. Asimismo, se consideran los beneficios comunitarios asociados a la gestión sostenible de residuos y al acceso a una fuente alternativa de energía renovable. Los resultados de esta etapa se sistematizan en un

informe de factibilidad ambiental, que, junto con los análisis anteriores, permite presentar una visión integral de la viabilidad del proyecto.

La metodología descrita se apoya en modelos de cálculo teórico, principios de ingeniería de procesos, herramientas de análisis económico y métodos de evaluación ambiental. Su diseño documentado y sistemático asegura la validez del estudio y posibilita la replicabilidad de los procedimientos en contextos similares, constituyendo así una base sólida para futuras aplicaciones. En la Figura 1 se muestra un esquema de la metodología descrita.

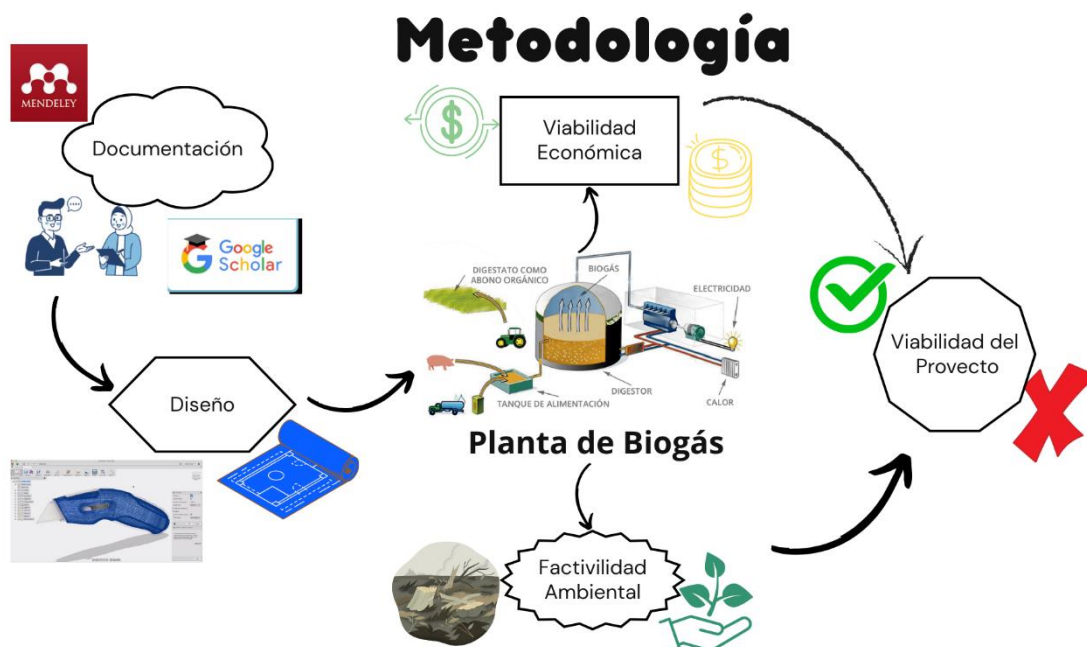


Figura 1: Esquema de la metodología

3 Desarrollo del proyecto y resultados

3.1 Identificación y cuantificación de residuos orgánicos en el área de influencia

Para la realización del proyecto es importante conocer las fuentes de residuos orgánicos en la caleta, esto ya que el dimensionamiento de los elementos de la planta, como los biodigestores, depende de la cantidad de residuos. La información fue obtenida mediante entrevistas con los actores locales, como de estudios realizados en la zona de influencia.

3.1.1 Vísceras de Salmón

Primero se analiza la actividad pesquera de la zona, comenzando con el salmón. Los valores se calculan en base a los datos entregados por el sindicato de pescadores, obtenida mediante la cuantificación de los desembarques realizados por los últimos 10 años y considerando que el salmón es extraído durante la segunda quincena del mes de diciembre y los meses de enero y febrero. La información disponible se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1: Cantidad de salmón extraído en los últimos 10 años

<i>Temporada</i>	<i>Capturas (kg)</i>	<i>Vísceras (kg)</i>
2014/15	56000	6720
2015/16	190000	22800
2016/17	36000	4320
2017/18	35000	4200
2018/19	107000	12840
2019/20	66000	7920
2020/21	61000	7320
2021/22	46000	5520
2022/23	50000	6000
2023/24	19675	2361
Promedio	66667.5	8000.10
		12.00%

A partir de entrevistas realizadas con los pescadores de la caleta, se identificó que la mayor extracción de salmón ocurre durante los meses de enero y febrero. Sin embargo, para efectos de este proyecto, los residuos se distribuyeron en función del tiempo total de actividad pesquera. Bajo este criterio, se estimó que en diciembre se generan aproximadamente 1.6 toneladas de residuos, mientras que en los meses de enero y febrero la generación alcanza las 3.2 toneladas en cada caso.

Se utilizará una estimación de 8 toneladas de residuos de vísceras de salmón, correspondiente al promedio registrado durante los últimos diez años. Además, este valor resulta representativo, ya que no ha sido superado en los últimos cinco años.

3.1.2 Vísceras de Róbalo

Además de la pesca de salmón, desde 2024 la caleta cuenta con autorización para la extracción de róbalo. Esta actividad se desarrolla en dos períodos específicos: la temporada de otoño, que abarca los meses de marzo, abril y la primera quincena de mayo; y la

temporada de primavera, correspondiente a la segunda quincena de septiembre y los meses de octubre y noviembre.

La información sobre la generación de residuos de vísceras de róbalo fue proporcionada por un comerciante local, quien indicó que durante la temporada de otoño adquirió 4350 kg de esta especie para su posterior comercialización en su restaurante. Este volumen se consideró representativo del 50% de la venta total de róbalo en la zona, dado que únicamente dos restaurantes compran el producto extraído localmente. Para estimar la cantidad de residuos, se aplicó un factor de conversión equivalente al 12% del peso total en kilogramos, correspondiente a la fracción de vísceras generada.

Si bien el sindicato de pescadores señaló que durante la temporada de primavera de 2024 no se registró extracción de róbalo, para efectos del cálculo anual de residuos se asumió que en dicho período la captura correspondió al 20% del volumen obtenido en la temporada de otoño.

Con lo anterior se estima que existe una disposición de 1252.8 kg de vísceras de róbalo en el año, la cual se distribuirán como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2: Estimación generación residuos vísceras de róbalo

<i>Mes</i>	<i>Vísceras (kg)</i>
Marzo	417.6
Abril	417.6
Mayo	208.8
Septiembre	41.76
Octubre	83.52
Noviembre	83.52
Total	1252.8

3.1.3 Residuos Orgánicos de la Comunidad

El Sindicato proporcionó un registro actualizado de los habitantes de Caleta La Barra, denominado “Nómina de usuarios de Eventual Posta de Salud Rural de Caleta La Barra”, en el cual se consigna un total de 249 pobladores. No obstante, al excluir a quienes residen fuera del área de influencia directa, es decir, fuera de la caleta propiamente tal, la cifra se reduce a 207 habitantes, valor que se utilizó para la estimación correspondiente

Para la estimación de la cantidad de residuos generados por los habitantes de la caleta, se utilizaron los datos entregados en la Estrategia de Residuos Orgánicos Chile 2040, publicada por el Ministerio del Medio Ambiente en 2020 [17]. Según este documento, la generación diaria de residuos por persona corresponde a 1.22 kg, de los cuales un 58%

corresponde a materia orgánica. De este modo, la producción diaria de residuos orgánicos por habitante se estima en 0.71 kg.

En la Tabla 3 se presenta la cantidad de residuos orgánicos disponibles en función del porcentaje de la población considerada. La disposición de los residuos orgánicos se distribuye de manera homogénea durante el año.

Tabla 3: Generación de residuos orgánicos residenciales

<i>% Población</i>	<i>Generación Mensual (kg)</i>
25% Población	1098.549
50% Población	2197.098
75% Población	3295.647
100% Población	4394.196

3.1.4 Residuos de Restaurantes

A partir de entrevistas realizadas a los tres dueños de restaurantes de la caleta, se obtuvo información estimativa sobre la generación de residuos en cada establecimiento. Todos coincidieron en señalar una diferencia significativa entre la temporada comprendida entre diciembre y marzo, y la correspondiente a abril–noviembre, reportando volúmenes distintos de generación en cada período.

El indicador utilizado por los entrevistados corresponde al número de contenedores de basura de 60 litros de capacidad, dispuestos semanalmente como destino final de los residuos. Con base en esta información, los datos recopilados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4: Generación de residuos restaurantes

<i>N° Restaurant</i>	<i>Diciembre-Marzo (contenedores/semana)</i>	<i>Abril-Noviembre (contenedores/semana)</i>
Restaurant 1	3	0.25
Restaurant 2	3	2
Restaurant 3	3	2

Si bien en Chile no existen estudios que precisen el porcentaje de residuos orgánicos generados en restaurantes, la Guía de gestión integral de residuos sólidos y economía circular de la Asociación Nacional de Empresarios de Colombia (ANDI) señala que aproximadamente el 75% de los residuos de este tipo de establecimientos corresponden a fracción orgánica [1]. En cuanto a la densidad de los residuos orgánicos, la literatura reporta valores entre 600 y 800 kg/m^3 en términos estadísticos, por lo que para este estudio se adoptó un valor promedio de 700 kg/m^3 [18].

Así, se obtiene la Tabla 5 con la generación de residuos orgánicos por parte de los tres restaurantes a lo largo de todo el año.

Tabla 5: Generación mensual de residuos orgánicos de los restaurantes

<i>Mes</i>	<i>Residuos Orgánicos Restaurantes (kg)</i>
Enero	1134
Febrero	1134
Marzo	1134
Abril	535.5
Mayo	535.5
Junio	535.5
Julio	535.5
Agosto	535.5
Septiembre	535.5
Octubre	535.5
Noviembre	535.5
Diciembre	1134

3.1.5 Cantidad Total de Residuos en la Zona de Influencia

A continuación, se presenta la Tabla 6, la cual muestra la cantidad de potenciales residuos a utilizar en la zona de influencia, para el dimensionamiento de los biodigestores.

Tabla 6: Resumen generación de residuos orgánicos en el área de influencia

<i>Mes</i>	<i>Residuos Salmón (ton)</i>	<i>Residuos Róbalo (ton)</i>	<i>Residuos Residenciales (ton)</i>				<i>Residuos Restaurantes (ton)</i>
			25%	50%	75%	100%	
Enero	3.2	-	1.1	2.2	3.3	4.39	1.134
Febrero	3.2	-	1.1	2.2	3.3	4.39	1.134
Marzo	-	0.418	1.1	2.2	3.3	4.39	1.134
Abril	-	0.418	1.1	2.2	3.3	4.39	0.5355
Mayo	-	0.209	1.1	2.2	3.3	4.39	0.5355
Junio	-	-	1.1	2.2	3.3	4.39	0.5355
Julio	-	-	1.1	2.2	3.3	4.39	0.5355
Agosto	-	-	1.1	2.2	3.3	4.39	0.5355

Septiembre	-	0.042	1.1	2.2	3.3	4.39	0.5355
Octubre	-	0.084	1.1	2.2	3.3	4.39	0.5355
Noviembre	-	0.084	1.1	2.2	3.3	4.39	0.5355
Diciembre	1.6	-	1.1	2.2	3.3	4.39	1.134
Suma	8	1.253	13.2	26.4	39.6	53.68	8.82

De esta manera, la generación anual de vísceras de salmón y róbalo se estima en 9.25 toneladas. Por su parte, los residuos residenciales alcanzan un máximo de 52.68 toneladas al año, mientras que los residuos orgánicos provenientes de los restaurantes se calculan en 8.82 toneladas anuales. Sumando todas estas contribuciones, la cantidad total máxima de residuos generados en la caleta se estima en 70.75 toneladas por año.

3.2 Supuestos, criterios de diseño y escenario seleccionado

Para el desarrollo del presente proyecto se adoptaron una serie de supuestos técnicos que permiten simplificar el análisis sin afectar la validez de los resultados obtenidos. En primer lugar, se considera que el biodigestor opera bajo un régimen mesófilo, manteniendo una temperatura promedio de 35 °C, condición que favorece la actividad microbiológica y la estabilidad del proceso de digestión anaeróbica. Se asume que el sistema alcanza un régimen estacionario una vez finalizada la etapa de arranque, por lo que las variaciones transitorias de temperatura y producción de biogás no son consideradas en los cálculos principales.

Asimismo, se supone una alimentación diaria constante del digestor, con un caudal que permite obtener un tiempo de residencia hidráulico (TRH) comprendido entre 21 y 28 días. Este rango se considera adecuado para garantizar una degradación eficiente de la materia orgánica y evitar el lavado de biomasa, especialmente de las arqueas metanogénicas, que presentan cinéticas de crecimiento más lentas. Se asume además que el sustrato posee una composición relativamente homogénea a lo largo del tiempo y que no existen inhibidores significativos que afecten el proceso biológico.

En el análisis térmico, se considera que las pérdidas de calor del biodigestor son constantes y que, una vez alcanzada la temperatura de operación, el sistema de calentamiento debe únicamente compensar dichas pérdidas. Finalmente, se supone una disponibilidad variable de biogás, razón por la cual se incorpora una fuente auxiliar de energía basada en GLP para asegurar la continuidad operacional del sistema.

El diseño del sistema se basa en criterios técnicos ampliamente utilizados en proyectos de digestión anaeróbica a escala pequeña y media. El volumen útil del biodigestor se definió en función de la cantidad de sustrato a tratar y del TRH seleccionado, adoptándose un volumen aproximado de 4,5 m³. El rango de TRH entre 21 y 28 días se seleccionó considerando la temperatura de operación de 35 °C, correspondiente a un régimen

mesófilo, y valores recomendados en la literatura técnica para asegurar estabilidad biológica y una adecuada producción de biogás.

El sistema de calentamiento se diseñó para elevar la temperatura del sustrato desde condiciones ambientales hasta la temperatura de operación, y posteriormente mantenerla compensando las pérdidas térmicas del biodigestor. Para ello, se definió un aporte energético mixto, combinando energía solar térmica y energía proveniente de la combustión de biogás, con respaldo mediante GLP en caso de baja disponibilidad del biogás.

El aporte solar se fijó como un porcentaje de la demanda térmica total del sistema, con el objetivo de reducir el consumo de combustibles y mejorar la sustentabilidad del proyecto. Los colectores solares se diseñaron considerando condiciones climáticas locales y un rendimiento promedio conservador, mientras que el sistema hidráulico se dimensionó para asegurar una correcta circulación del fluido caloportador sin comprometer la eficiencia energética.

Por último, los cálculos de dimensionamiento y diseño de los elementos del sistema se realizan considerando el escenario dos, el cual corresponde a las vísceras de salmón y róbalo más los residuos de los restaurantes. De igual manera, en algunos casos, se calculan los demás escenarios para establecer una comparación.

3.3 Análisis del Potencial de Biogás

El cálculo del potencial nominal se realizó considerando el período de carga mensual más alto, determinado a partir de la distribución mensual de los sustratos, resultando en 6.53 toneladas por mes. Este valor corresponde a los meses de enero y febrero, que representan la temporada de máxima generación de vísceras de salmón. Es importante destacar que la energía disponible se alcanzará únicamente durante estos meses de máxima carga, y disminuirá de manera proporcional al reducirse la cantidad de sustrato ingresado al reactor.

Con el objetivo de disponer de varias alternativas para la selección del sistema de biodigestión más adecuado, se definieron cuatro escenarios de modelación del sustrato disponible:

- **Escenario 1: Vísceras de salmón y róbalo**
Se consideró únicamente la utilización de las vísceras de salmón y róbalo como sustrato del biodigestor.
- **Escenario 2: Vísceras de salmón y róbalo + residuos de restaurantes**
Se incorporaron las vísceras de salmón y róbalo junto con el 100% de los residuos orgánicos generados por los restaurantes de la caleta.
- **Escenario 3: Vísceras de salmón y róbalo + residuos de restaurantes + 25% de residuos orgánicos domiciliarios**
Se integraron las vísceras de salmón y róbalo, el total de residuos de los restaurantes y los residuos orgánicos correspondientes al 25% de la población de la caleta, equivalentes a 1.1 toneladas.

- **Escenario 4: Visceras de salmón y róbalo + residuos de restaurantes + 50% de residuos orgánicos domiciliarios**

Se consideraron las vísceras de salmón y róbalo, el 100% de los residuos de los restaurantes y los residuos orgánicos correspondientes al 50% de la población de la caleta, equivalentes a 2.2 toneladas.

Para cada escenario se calcularon los siguientes indicadores:

- Sustrato máximo: Corresponde a la cantidad máxima de residuos que puede introducirse al biodigestor, expresada en toneladas mensuales. Depende del escenario evaluado. Su fórmula general es la siguiente:

$$S_{max} = S_{salmón,mes} + S_{róbalo,mes} + S_{restaurantes,mes} + S_{residencial,mes} \quad (1)$$

- Metano: Principal componente del biogás producido. Su concentración determina el poder calorífico del biogás y, por tanto, la eficiencia energética del sistema. La producción se cuantifica en metros cúbicos normales (Nm^3) de metano por mes. Se calcula como:

$$V_{CH_4,mes} = S_{max} \cdot Y_{CH_4} \quad (2)$$

Considerando:

$$Y_{CH_4} \approx 90,6 Nm^3/ton$$

- GLP equivalente: Cantidad de energía equivalente en gas licuado de petróleo que podría generar el biodigestor durante los meses de máxima producción. Este indicador considera que el biodigestor requiere aproximadamente un 20% de la energía generada para su propio funcionamiento, la cual se descuenta de este valor. Se obtiene de la siguiente manera:

$$GLP_{mes} = \frac{E_{mes}}{PCI_{GLP}} \quad (3)$$

Sabiendo que E_{mes} corresponde a la energía térmica por mes. Se calcula con la siguiente ecuación:

$$E_{mes} = V_{CH_4,mes} \cdot PCI_{CH_4} \quad (4)$$

Con:

$$PCI_{CH_4} = 9.9 kWh/Nm^3$$

- Potencia nominal: Energía máxima que el biodigestor puede generar de forma continua bajo condiciones óptimas, expresada en kilovatios (kW). Se utiliza la siguiente formula:

$$P_{nom} = \frac{E_{mes}}{H_{mes}} \quad (5)$$

Sabiendo que:

$$H_{mes} = 744 \text{ h}$$

- Potencia nominal eléctrica disponible: Energía máxima en forma de electricidad que puede generar el sistema, considerando la eficiencia del generador, también expresada en kW . Se obtiene de la siguiente manera:

$$P_{el,d} = P_{nom} \cdot \eta_{gen} \quad (6)$$

Si se considera que la potencia del generador es del 30%

- Volumen de fertilizante: Volumen máximo de fertilizante líquido o sólido resultante del proceso de digestión anaeróbica. Su la ecuación para su obtención es la siguiente:

$$V_{fert,año} = V_{útil} \cdot \frac{365}{HRT} \quad (7)$$

$V_{útil}$ corresponde a él volumen útil del reactor y se dimensiona en base al S_{mes} correspondiente a cada uno de los escenarios mencionados anteriormente. Se obtiene de la siguiente manera:

$$V_{útil} = \frac{S_{máx}}{días/mes} \cdot HRT \quad (8)$$

Mientras que HRT se refiere al tiempo de retención hidráulica en días y también se asume en base al escenario a considerar, en este caso se define un valor HRT considerándolo como parámetro de diseño, por lo que es arbitrario para cada variante, los valores se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7: HRT para cada escenario

Escenario	HRT [horas]
Escenario 1	270
Escenario 2	227
Escenario 3	211
Escenario 4	222

Estos indicadores permiten evaluar y comparar la viabilidad técnica y energética de cada escenario, así como el potencial de generación de recursos renovables y subproductos útiles para la comunidad. A continuación, se presentan la Tabla 8, en donde se muestra los indicadores mencionados anteriormente para cada uno de los escenarios a considerar y la Tabla 9 en donde se resumen los indicadores más importantes.

Tabla 8: Indicadores de volumen y potencial energético para cada escenario

<i>Indicador</i>	<i>Vísceras Salmón y Robalo</i>	<i>Vísceras Salmón y Robalo +Restaurantes</i>	<i>Vísceras Salmón y Robalo + Restaurantes +25% F.O. Domiciliario</i>	<i>Vísceras Salmón y Robalo + Restaurantes +50% F.O. Domiciliario</i>
Sustrato máx. <i>Ton/mes</i>	3.2	4.3	5.4	6.5
Metano/mes <i>N – m³ CH₄/mes</i>	288.0	390.1	489.1	588.1
Calor/mes <i>kwh/mes</i>	2851.2	3861.6	4841.7	5821.8
GLP equivalente/mes <i>Kg</i>	162.1	219.6	275.3	331.0
Potencia Nominal <i>kW</i>	3.8	5.2	6.5	7.8
Pote Nominal Eléctrica disponible <i>kW</i>	1.2	1.6	2.0	2.4
Volumen Fertilizante <i>m³/año</i>	27.8	36.4	56.2	76.0

Tabla 9: Resumen Indicadores de volumen y potencial energético

<i>Indicador</i>	<i>Vísceras Salmón y Robalo</i>	<i>Vísceras Salmón y Robalo +Restaurantes</i>	<i>Vísceras Salmón y Robalo + Restaurantes +25% F.O. Domiciliario</i>	<i>Vísceras Salmón y Robalo + Restaurantes +50% F.O. Domiciliario</i>
Residuos <i>ton/año</i>	9.3	18.1	31.3	44.5
Volumen útil requerido <i>m³</i>	27.8	31.5	36.8	46.7
kg GLP equivalente/mes <i>Kg</i>	162.1	219.6	275.3	331.0

Pote Nominal				
Eléctrica disponible <i>kW</i>	1.2	1.6	2.0	2.4
Volumen				
Fertilizante $m^3/año$	27.8	36.4	56.2	76.0

3.3.1 Ubicación de la Planta

Como parte del desarrollo del proyecto, se llevó a cabo un proceso de identificación y análisis de diversos espacios dentro de la caleta que presentan potencial para la implementación del proyecto. A continuación, se describen las seis áreas disponibles:

- Terreno del Sindicato de Pescadores de La Barra: Ubicado frente a la ribera del río Toltén, este terreno es propiedad del Sindicato y cuenta con infraestructura existente, incluyendo una sede, oficinas y un restaurante que actualmente funciona como oficina administrativa.
- Terreno de la Junta de Vecinos: También emplazado frente al río Toltén, este espacio dispone de una sede vecinal como infraestructura principal, la cual podría ser utilizada o adaptada según las necesidades del proyecto.
- Terreno del Sistema de Agua Potable Rural (APR): Situado en la zona sur de la caleta, este terreno amplio posee instalaciones destinadas a la extracción y tratamiento de agua potable, lo que representa una ventaja en términos de servicios básicos.
- Terreno del Club Deportivo: Localizado en la zona norte de la caleta, este terreno es propiedad del club deportivo y cuenta con dos canchas de fútbol, camarines y un área de recreación, lo que lo convierte en un espacio versátil para actividades comunitarias.
- Área asignada en el Proyecto Costanera: Actualmente se encuentra en ejecución la construcción de una nueva costanera en la caleta. Como parte de este proyecto, se ha destinado un espacio en la zona sur para el uso del Sindicato. Sin embargo, no se dispone de información detallada sobre las características específicas de dicha infraestructura.

A continuación, la Figura 2 presenta una imagen obtenida desde Google Maps que permite dimensionar el área total de la caleta e identificar visualmente los puntos mencionados como posibles emplazamientos para el desarrollo del proyecto.



Figura 2: Ubicación de la planta

En la Tabla 10 se muestra un cuadro comparativo con las condiciones que debe cumplir el terreno a seleccionar.

Tabla 10: Tabla resumen de condiciones de borde sobre potenciales lugares de implementación del proyecto

Condición de borde	Sindicato	JJ.VV.	Terreno APR	Club Deportivo	Costanera
Limitación normativa	No cumple distancia mínima	No existe limitación normativa	No existe limitación normativa	No existe limitación normativa	Sin información
Propiedad	Sindicato	JJ.VV.	Asociados APR	Club deportivo	Sindicato
Área disponible	No posee área mínima	No posee área mínima	Cumple	Cumple	Sin información
Consumo Energía	Cocina restaurant sindicato	Agua Caliente Sanitaria JJ.VV	No existe alternativa de consumo	Agua Caliente Sanitaria en camarines y cocina. Posibilidad de canalizar biogás a JJ.VV.	Sin información

Considerando los pros y contras de cada uno de los terrenos considerados se escoge el Club Deportivo, debido a que se cuenta con más espacio y que los beneficios obtenidos con la planta se pueden aprovechar de buena manera.

3.4 Componentes de la Planta

3.4.1 Proceso de Digestión Anaeróbica

La digestión anaeróbica se basa en la acción conjunta de un consorcio microbiano compuesto por bacterias hidrolíticas, acidogénicas, acetogénicas y arqueas metanogénicas. Estas poblaciones microbianas actúan de forma secuencial permitiendo la conversión de materia orgánica compleja en biogás, compuesto principalmente por metano y dióxido de carbono.

En el diseño del biodigestor no se considera la dosificación de bacterias individuales, sino la incorporación de un inóculo anaerobio activo, proveniente de lodos o digestores en operación. La cantidad de inóculo se define como un porcentaje del volumen útil del digestor cubo, en este caso 5.10 m^3 y 50 m^3 para el biodigestor pulmón, adoptándose valores típicos entre 10 y 30%, con el fin de asegurar una adecuada relación microorganismo-sustrato y evitar fenómenos de acidificación durante el arranque. A continuación, se muestran las ecuaciones para estos cálculos.

$$V_{in\acute{o}culo,c} = 0.2 \cdot V_{util,c} = 1.02\text{ m}^3 \quad (9)$$

$$V_{in\acute{o}culo,p} = 0.2 \cdot V_{util,p} = 10\text{ m}^3 \quad (10)$$

3.4.2 Descripción de componentes del Sistema

A continuación, se enumeran los componentes necesarios para el funcionamiento del sistema, considerando el proceso mostrado en la Figura 3.

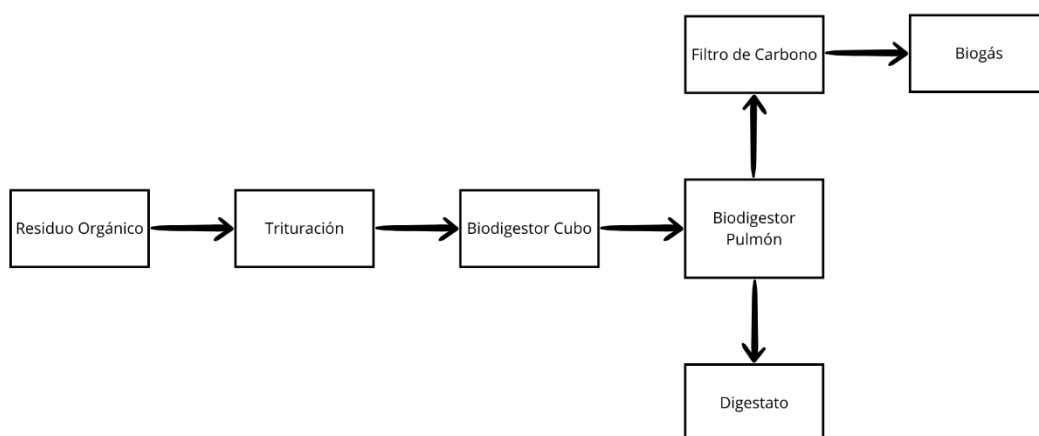


Figura 3: Esquema del proceso de la planta

Biodigestor Pulmón Flexible

Digestor fabricado con una membrana plástica flexible resistente a los rayos UV, fabricada con el mismo material que se utiliza en los gasómetros industriales. Está dispuesto de forma semienterrada, de manera que los taludes laterales actúan como contención estructural. Su función principal es proporcionar el volumen de reacción del sistema.

Gracias a su capacidad de contraerse durante la descarga, se evita la entrada de aire al interior del estanque, lo que facilita la operación y mantiene condiciones anaerobias estables.

Además, el biodigestor cumple una doble función, ya que también actúa como gasómetro, es decir, como unidad de almacenamiento del biogás generado. En la Figura 4 se muestra un ejemplo aproximado de cómo se vería este elemento.



Figura 4: Ejemplo de Biodigestor Pulmón

Biodigestor de mezcla cubo

Pequeño biodigestor diseñado para permitir la carga del sustrato por gravedad, optimizando así el proceso de alimentación. En su interior cuenta con una serie de deflectores estratégicamente dispuestos, los cuales retienen los sólidos más pesados y de mayor tamaño, favoreciendo una mezcla homogénea y un proceso de digestión más eficiente.

Asimismo, el sistema está diseñado para facilitar la extracción del fertilizante líquido, permitiendo operar con altos caudales de descarga sin comprometer la estabilidad del proceso. En la Figura 5 se muestra la apariencia aproximada que tendría el biodigestor cubo.



Figura 5: Ejemplo de Biodigestor Cubo

Instalación Eléctrica

La instalación eléctrica tiene como finalidad proveer energía de forma segura y confiable a los distintos componentes del sistema. Está diseñada para alimentar las bombas de impulsión y recirculación, el sistema de trituración del sustrato y los equipos eléctricos de control y automatización que regulan el funcionamiento general del biodigestor.

Sistema de Mezcla y trituración

El sistema de mezcla y trituración tiene como objetivo homogeneizar el sustrato antes de su ingreso al biodigestor principal, garantizando una distribución uniforme de sólidos y líquidos que favorece la eficiencia del proceso de digestión anaerobia.

Este sistema está compuesto por una serie de cuchillas motorizadas dispuestas en serie, ubicadas estratégicamente en la entrada del biodigestor tipo “Mezcla Cubo”. Las cuchillas están diseñadas para fragmentar, cortar y triturar los sólidos de mayor tamaño, reduciendo su granulometría y evitando obstrucciones en las líneas de conducción o en el propio digestor.

Bomba de Agua dilución

La bomba de agua de dilución tiene como función incorporar agua proveniente del río al sistema de mezcla, permitiendo ajustar la concentración del sustrato antes de su ingreso al biodigestor. Este proceso de dilución es esencial para garantizar una viscosidad adecuada del material, facilitando su bombeo, mezcla y posterior digestión anaerobia.

Además, la adición controlada de agua cumple una función sanitaria y ambiental relevante, ya que permite formar un sello hidráulico en la zona superior del estanque de mezcla. Este

sello actúa como barrera física que impide la liberación de gases y olores hacia el ambiente, contribuyendo a mantener condiciones higiénicas y reducir el impacto ambiental del sistema. En la Figura 6 se muestra un ejemplo de la bomba descrita.



Figura 6: Ejemplo de Bomba de Agua dilución

Bomba de Agua calefacción

La bomba de agua de calefacción tiene como función recircular el agua caliente entre el calentador alimentado con biogás y el sistema de distribución térmica instalado en el digestor de mezcla. Este circuito cerrado permite mantener una temperatura uniforme y controlada dentro del digestor, condición fundamental para optimizar la actividad microbiana responsable del proceso de digestión anaerobia.

El sistema funciona mediante la extracción del agua calentada en el intercambiador térmico del calentador a biogás, la cual es impulsada por la bomba hacia las tuberías o serpentines internos del digestor de mezcla. Allí, el calor es transferido de manera indirecta al sustrato, favoreciendo una temperatura estable y homogénea en todo el volumen de reacción. En la Figura 7 se muestra un ejemplo de la bomba.



Figura 7: Ejemplo de Bomba de Agua calefacción

Sistema de Calefacción

El sistema de calefacción está diseñado para mantener una temperatura interna óptima de aproximadamente 35 °C en los digestores, condición esencial para garantizar el correcto desarrollo de la digestión anaerobia y maximizar la producción de biogás.

Este sistema emplea agua caliente como medio de transferencia térmica, la cual es calentada mediante un termo equipado con un quemador a biogás y un colector solar térmico que actúan de manera complementaria. El colector solar proporciona energía renovable y gratuita durante las horas de radiación, mientras que el quemador a biogás asegura el mantenimiento de la temperatura en periodos de baja radiación o alta demanda térmica, garantizando continuidad y estabilidad operativa. En la Figura 8 se muestra cómo sería un termo a gas natural y el la Figura 9 un ejemplo aproximado de un colector solar.



Figura 8: Ejemplo de Termo a biogás



Figura 9: Ejemplo de Colectores solares

Canalización

El sistema de canalización está compuesto por una red de conducciones hidráulicas y de biogás diseñadas para garantizar el transporte seguro y eficiente de fluidos entre los distintos componentes del sistema de biodigestión.

Para el transporte de agua de dilución, se utiliza tubería de PVC hidráulico de 1" de diámetro, adecuada para condiciones de presión moderada y resistente a la corrosión. Este sistema permite la distribución del agua hacia los puntos de mezcla y la conexión de rebalses y derivaciones entre los estanques digestores.

Los puntos de extracción de fertilizante destinados a los usuarios están equipados con válvulas y conexiones rápidas tipo Camlock de 110 *mm*, que permiten la descarga directa mediante camión cisterna. Adicionalmente, se incluyen válvulas de paso y control en PVC hidráulico de 75 y 110 *mm* de diámetro, para regular el flujo entre los distintos sectores del sistema.

En cuanto al transporte de biogás, se emplean tuberías de PVC hidráulico o acero inoxidable, según las condiciones de presión y exposición, garantizando hermeticidad, durabilidad y resistencia a la corrosión. Todas las líneas expuestas cuentan con pintura protectora con filtro UV, que cumple además una función de señalización y seguridad operativa.

Para el sistema de calefacción, se utilizan tuberías aisladas de PPU (polipropileno) o PE-RT (polietileno resistente a altas temperaturas), diseñadas para el transporte de agua caliente entre el calentador y los digestores, minimizando las pérdidas térmicas y mejorando la eficiencia energética del sistema.

Cocina o Quemadores a biogás

El sistema de cocción está conformado por quemadores o cocinas adaptadas específicamente para la combustión de biogás, asegurando una combustión eficiente y segura del gas generado en el biodigestor. Estos equipos pueden ser modelos comerciales modificados o dispositivos diseñados a medida, según las necesidades del proyecto y la disponibilidad de gas.

La cocina o los quemadores también cumplen una función de seguridad operativa, actuando como punto de consumo o desfogue controlado en caso de que el gasómetro alcance su capacidad máxima de almacenamiento, evitando así la acumulación excesiva de presión en el sistema. En la Figura 10 se ve un ejemplo de un quemador a biogás.



Figura 10: Ejemplo de Quemador de biogás

Cierre Perimetral

El cierre perimetral tiene como propósito restringir el acceso al área del sistema de biodigestión, evitando el ingreso de personas no autorizadas y de animales que pudieran causar daños o interferir con su funcionamiento, en cumplimiento con las normas de seguridad y protección vigentes.

Dentro del área delimitada por el cierre se instalará un invernadero que cubrirá el biodigestor tipo “Pulmón Flexible”, contribuyendo a proteger la estructura de las condiciones climáticas externas, mantener una temperatura más estable y mejorar la eficiencia del proceso de digestión anaerobia.

Filtro de carbono

El biogás producido presenta cierta concentración de sulfuro de hidrógeno (H_2S). El sulfuro de hidrógeno es altamente corrosivo y tóxico, por lo que se incorpora un filtro de carbón activado impregnado para retener y oxidar este compuesto antes del almacenamiento del gas.

Este sistema permite proteger las tuberías, el gasómetro y el quemador, disminuir olores, evitar la formación de ácido sulfúrico durante la combustión y mejorar la seguridad del proceso.

Invernadero

Se ubica sobre el biodigestor pulmón. Su objetivo es mantener la temperatura un poco más elevada que la exterior para facilitar la digestión anaeróbica. En la Figura 11 se muestra un ejemplo aproximado.



Figura 11: Ejemplo de Invernadero

3.4.3 Diseño del Biodigestor Cubo

Sabiendo que la cantidad de residuos orgánicos es de 18.1 toneladas al año y que el sistema de digestión se basa en un modo de operación tipo batch, el cual considera cargas periódicas de mezcla equivalentes a 40.5 m^3 por lote, correspondientes a un promedio de 6.75 m^3 de sustrato procesado por mes. Este enfoque permite controlar de manera precisa las condiciones de carga y descarga, optimizando la producción y aprovechamiento del biogás.

El biodigestor tipo “Cubo” se diseña para cumplir la función de unidad de preprocesamiento, en la que se realiza una mezcla y homogenización inicial del sustrato. En esta etapa, se busca mejorar la distribución de sólidos y líquidos y favorecer la descomposición parcial de la materia orgánica, incrementando así la eficiencia del proceso anaerobio posterior.

Una vez completada esta etapa, la mezcla fluye por rebalse hacia el biodigestor tipo “Pulmón Flexible”, donde se desarrolla la mayor parte del tiempo de residencia hidráulica necesario para la producción estable de biogás. Este diseño en etapas permite mantener un flujo continuo del material y garantizar condiciones adecuadas de digestión y almacenamiento de gas.

El sistema incorpora además una trampa hidráulica integrada al biodigestor, la cual evita la fuga de biogás hacia el exterior. Este mecanismo se basa en una diferencia de alturas entre los niveles de líquido y gas, generando una barrera natural de agua que actúa como sello hermético, asegurando la retención y acumulación eficiente del biogás generado.

El biodigestor tipo Cubo se dimensiona con 2.00 m de largo, 2.00 m de ancho y 1.50 m de alto, alcanzando un volumen geométrico de 6.00 m^3 y un volumen útil aproximado de 5.10 m^3 al considerar un 15% de espacio libre para rebalse y espuma. Estas dimensiones se justifican en función de su rol como unidad de preprocesamiento y mezcla, equivalente al

15 % del volumen total por lote (40.5 m^3), lo que permite homogeneizar el sustrato, retener sólidos gruesos y estabilizar el flujo hacia el biodigestor principal. Además, su geometría cuadrada y profundidad moderada facilitan la mezcla eficiente, la instalación de cuchillas y bombas, y simplifican las labores de mantenimiento y limpieza. Por tanto, las dimensiones adoptadas son técnica y operativamente coherentes con la función del sistema, asegurando un pretratamiento eficiente y un desempeño confiable del conjunto de biodigestión. A continuación, se muestran las ecuaciones que lo justifican.

$$V_{geom,c} = L_c \cdot W_c \cdot H_c = 6 \text{ m}^3 \quad (11)$$

Si el lote total se considera $40,5 \text{ m}^3$, una práctica habitual es dimensionar el pretratador para contener $\approx 15 \%$ del lote para mezcla y trituración:

$$0.15 \cdot 40.5 = 6.075 \text{ m}^3 \approx 6.08 \text{ m}^3 \quad (12)$$

El volumen geométrico 6.00 m^3 coincide razonablemente con este criterio ($\approx 14,8 \%$ del lote):

$$\frac{6}{40.5} = 0.14815 \approx 14.8\% \quad (13)$$

Además, por diseño se recomienda dejar un freeboard para rebalse y espuma; se toma 15% como valor de referencia:

$$V_{\text{útil},c} = V_{geom,c} \cdot (1 - 0.15) = 5.10 \text{ m}^3 \quad (14)$$

El biodigestor se compone de dos partes principales: el recipiente y la tapa superior, ambas hechas de fibra de vidrio y aisladas. La tapa incorpora la boca de entrada del sustrato orgánico y sirve como punto de acoplamiento del sistema de trituración y mezcla, permitiendo el ingreso controlado del material al interior del digestor. Ambas piezas se ensamblan mediante un sistema de unión hermética, diseñado para garantizar un sellado eficiente que evite la fuga de biogás o líquidos y asegure un funcionamiento estable y seguro del sistema. En el Anexo 1 se muestran los planos tanto de la tapa como de la estructura del biodigestor cubo.

3.4.4 Diseño del Biodigestor Pulmón

Considerando la cantidad de residuos orgánicos disponibles y el modo de operación tipo batch definido para el sistema, se diseña un biodigestor que integra las funciones de reactor y gasómetro en una misma unidad. Este componente cumple un doble propósito: por un lado, almacena el sustrato en proceso de digestión anaerobia, y por otro, acumula el biogás generado durante dicha etapa, manteniendo una separación natural entre las fases líquida y gaseosa.

El biodigestor está fabricado en fibra plástica flexible de PVC, material seleccionado por su resistencia mecánica, hermeticidad y durabilidad frente a la radiación UV, además de su facilidad de instalación y mantenimiento. La estructura flexible permite que el digestor varíe su volumen interno según la cantidad de biogás acumulado, comportándose como un “pulmón” que se expande y contrae sin comprometer el sellado.

De este modo, el sistema optimiza el aprovechamiento del espacio útil, reduce la necesidad de equipos de almacenamiento externos y simplifica la operación del conjunto, al combinar en un solo elemento la reacción biológica y el almacenamiento temporal del biogás.

En una primera etapa del diseño, se consideró un biodigestor de $4 \times 2 \times 1$ m, dimensionado únicamente para cumplir la función de reactor anaeróbico principal. Sin embargo, tras analizar el espacio disponible en el terreno y evaluar la conveniencia operativa y constructiva del sistema, se determinó que resultaba más eficiente integrar en una sola estructura las funciones de digestión y almacenamiento de biogás, en lugar de implementar dos unidades independientes (biodigestor y gasómetro).

Como resultado de este análisis, se aumentaron las dimensiones del biodigestor a $4.2 \times 7.4 \times 2.3$ m, permitiendo así albergar un mayor volumen de sustrato y proporcionar la capacidad de expansión necesaria para el biogás generado durante el proceso de digestión anaerobia. Este incremento en tamaño ofrece mayor estabilidad térmica, mejor aprovechamiento del terreno disponible, y simplifica la operación y el mantenimiento, al eliminar interconexiones y sistemas de sellado adicionales.

De esta forma, el biodigestor tipo “Pulmón Flexible” pasa a desempeñar un doble rol de reactor y gasómetro, optimizando tanto el rendimiento energético como la eficiencia estructural del sistema.

3.4.5 Diseño del Sistema de Trituración

Para el sistema de trituración se opta por un diseño de tipo artesanal debido a restricciones técnicas y económicas asociadas a las alternativas comerciales. El uso de una bomba trituradora sumergible dificulta significativamente las labores de mantención preventiva y correctiva, dado que requiere desmontaje completo del equipo y presenta mayores riesgos de obstrucción por sólidos fibrosos.

Por otra parte, las bombas trituradoras de superficie con las características requeridas no se encuentran disponibles en el mercado nacional, y la importación de este tipo de equipos implica costos elevados y tiempos de entrega incompatibles con los objetivos del proyecto. Por estas razones, se justifica el desarrollo de un sistema propio basado en componentes accesibles y de fácil reemplazo.

El diseño desarrollado consta de una estructura tipo caja de $1.9 \times 0.5 \times 0.5$ m, donde estarían las cuchillas. Abajo existe otro compartimiento en donde están los motores de las licuadoras.

Con el objetivo de caracterizar los motores necesarios, se considera que la mezcla es más densa que el agua, tipo slurry. También se da un tiempo máximo de procesamiento de 5

minutos para una carga de 50 *kg*, considerando 6 motores, y que la energía específica para el slurry, tomando un valor conservador, es de $E_{slurry} = 15000 \text{ J/kg}$. Estos datos son designados arbitrariamente para el obtener los resultados. Entonces los cálculos realizados para dimensionar este sistema se muestran a continuación. Para esto se consideran los supuestos mostrados en la Tabla 14.

Tabla 11: Valores establecidos para el diseño del sistema de trituración

<i>Dato</i>	<i>Valor</i>
m_m	50 <i>kg</i>
$t_{m\acute{a}x}$	5 <i>min</i>
E_{slurry}	15000 <i>J/kg</i>
η_{con}	0.3
N_c	6
V_{al}	230 <i>V</i>
P_{un}	1500 <i>W</i>
η_{mo}	0.7
$\cos\varphi$	0.9
L_{to}	1.9 <i>m</i>

Primero se obtiene el caudal másico

$$\dot{m}_{trit} = \frac{m_m}{t_{m\acute{a}x}} = 0.1667 \text{ kg/s} \quad (15)$$

$$P_{req} = \frac{\dot{m}_{trit} \cdot E_{slurry}}{\eta_{con}} = 8333 \text{ W} \quad (16)$$

Ahora, la potencia por motor

$$P_{motor} = \frac{P_{req}}{N_c} = 1389 \text{ W} \quad (17)$$

Por tanto, elegir 6 unidades de 1500 *W* es una decisión justificada si adoptas el valor conservador $E = 15,000 \text{ J/kg}$. Esto da un margen ya que 1.5 *kW* es mayor que los 1.389 *kW* requerido por motor.

Luego se pasa a la verificación de la mecánica mínima del torque y eje por motor. Tomando $n_m = 3000 \text{ rpm}$, se obtienen la velocidad angular y el torque.

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot \frac{n_m}{60} = 314.159 \text{ rad/s} \quad (18)$$

$$T = \frac{P_{un}}{\omega} = 4.7746 \text{ Nm} \quad (19)$$

Comprobación de diámetro de eje (acero inoxidable, esfuerzo cortante admisible $\tau_{adm} \approx 40$, factor de seguridad $FS = 2 \Rightarrow \tau_{diseño} = 20 \text{ MPa}$). Para un eje circular macizo:

$$\tau_{max} = \frac{T}{\pi d_{ej}^3} \leq \tau_{diseño} \quad (20)$$

Despejando d_{ej}

$$d_{ej} \geq \left(\frac{16T}{\pi \tau_{diseño}} \right)^{\frac{1}{3}} = 10.6 \text{ mm} \quad (21)$$

Diámetro comercial recomendado: ejes de 12 mm (comercial estándar) cumplen sobradamente. Esto muestra que una licuadora de 1500 W a 3000 rpm transmite un torque pequeño, así, los ejes y chavetas comerciales de 12 mm son adecuados.

Se continua con la verificación eléctrica

$$I_{motor} = \frac{P_{un}}{\eta_{mo} \cdot V_o \cdot \cos \varphi} = 10.35 \text{ A} \quad (22)$$

Para 6 unidades

$$I_{total} = 6 \cdot I_{motor} = 62.1 \text{ A} \quad (23)$$

Ahora, en la caja, se calcula la separación de las cuchillas, para optimizar la cobertura hidrodinámica. Se comienza la longitud útil para montaje, con un margen 5 cm en ambos extremos

$$L_{usable} = L_{to} - (2 \cdot 0.05) = 1.80 \text{ m} \quad (24)$$

Si $N_c = 6$ unidades en línea, separación centro-centro

$$S = \frac{L_{usable}}{N_c - 1} = 0.36 \text{ m} \quad (25)$$

Modelo empírico de zona de acción

- Radio efectivo de mezcla

$$R_m = k_i \cdot D_c \quad (26)$$

con $k_i = 3$ (valor empírico para impellers/guards pequeños).

- Para cobertura sin huecos conviene

$$S \leq 2R_m = 2k_i D_c \quad (27)$$

Si se eligen cabezales de licuadora con diámetro protector $D \geq 0.08 \text{ m} \rightarrow 2R_m = 2 \cdot 3 \cdot 0.08 = 0.48 \text{ m} = 480 \text{ mm} \rightarrow S = 360 < 480 \text{ mm} \rightarrow$ hay solapamiento (bueno).

Si se usa $D = 0.06 \text{ m} \rightarrow 2R_m = 360 \text{ mm} \rightarrow S = 360 \text{ mm} \approx$ límite (cobertura justa).

Con 6 unidades, separación 360 mm , se necesitan cabezales con diámetro guard $\geq 60\text{--}80 \text{ mm}$ para una cobertura aceptable; lo ideal son guards $\approx 100 \text{ mm}$ (modelos comerciales heavy-duty) para robustez hidrodinámica.

3.4.6 Diseño del Sistema de Calefacción

Con el objetivo de mantener el sustrato del biodigestor a la temperatura óptima de operación, aprovechando los recursos energéticos generados por la propia planta, se diseñó un sistema de calefacción completamente desarrollado desde cero. Esta decisión responde a que los calefontes o termos convencionales no son compatibles con la calidad del biogás producido, el cual contiene impurezas y puede requerir condiciones de combustión específicas. El sistema se concibe en dos etapas complementarias.

La primera etapa utiliza un colector solar térmico que aprovecha la radiación solar disponible para precalentar el agua del circuito de calefacción, suministrando aproximadamente el 30% de la energía necesaria para alcanzar la temperatura objetivo. Esta etapa permite reducir el consumo de biogás y aprovechar energía renovable de manera directa, mejorando la eficiencia energética global del sistema.

La segunda etapa consiste en un termo especialmente diseñado para biogás, encargado de mantener la temperatura entregada por el colector solar y proporcionar la energía restante necesaria para alcanzar la temperatura ideal del sustrato. Este termo incorpora mecanismos de control de flujo de gas, sensores de temperatura y recirculación de agua caliente, garantizando un funcionamiento seguro, continuo y estable, independientemente de la radiación solar disponible.

La combinación de ambas etapas permite que el sistema de calefacción sea autosuficiente, eficiente y adaptable, maximizando el aprovechamiento del biogás producido en la planta y minimizando la dependencia de fuentes externas de energía.

3.4.6.1 Termo de biogás

El sistema consiste en un estanque de agua, que actúa como medio de transferencia térmica, calentándose mediante un tubo central por el que circula la llama y los gases de combustión. Este diseño permite que el calor generado se transfiera de manera eficiente al agua, que a su vez circula hacia el biodigestor para mantener el sustrato a la temperatura óptima de digestión anaerobia. Para garantizar la continuidad operativa, se contemplan dos tipos de quemadores.

Quemador a biogás, que utiliza el gas producido por la planta, asegurando un aprovechamiento directo de la energía generada y reduciendo la dependencia de combustibles externos.

Quemador de respaldo a gas licuado, diseñado para operar cuando no se disponga de biogás suficiente o durante el arranque del sistema, asegurando que la temperatura del sustrato pueda mantenerse de manera constante.

El diseño del estanque y del tubo central, junto con la elección de los quemadores, permite un control eficiente de la temperatura, minimiza pérdidas térmicas y garantiza operación segura y confiable en todas las condiciones de funcionamiento del biodigestor. Además, la combinación de ambos combustibles proporciona flexibilidad operativa, facilitando el mantenimiento y la adaptación del sistema a la disponibilidad variable de biogás.

A continuación, se presentan todos los cálculos realizados para el dimensionamiento del termo de calefacción, diseñados para garantizar que cumpla con las condiciones térmicas requeridas por la planta. Estos cálculos incluyen la determinación del volumen de agua necesario, la energía requerida para alcanzar la temperatura óptima del sustrato, el aporte del colector solar y la potencia necesaria del quemador a biogás, así como los márgenes de seguridad y eficiencia operativa.

El propósito de esta sección es demostrar de manera cuantitativa que el termo proyectado asegura un funcionamiento continuo y estable, permite mantener la temperatura ideal del biodigestor, y garantiza un aprovechamiento óptimo del biogás generado en la planta. Todos los supuestos, fórmulas y parámetros utilizados se detallan paso a paso para respaldar la coherencia y fiabilidad del diseño. Para los cálculos se consideran los valores mostrados en la Tabla 11.

Tabla 12: Valores considerados en los cálculos

<i>Dato</i>	<i>Valor</i>
m_s	4500 kg
$C_{p,s}$	4 kJ/kgK
ρ_{agua}	1000 kg/m ³

$C_{p,agua}$	4.18 kJ/kgK
η_q	0.7
LHV_{biogas}	20 MJ/m^3
t_c	3 h

Primero se obtiene la energía total necesaria para calentar el sustrato de 16°C a 35°C , así $\Delta T_s = 21 \text{ K}$

$$Q_s = m_s \cdot C_{p,agua} \cdot \Delta T_s = 342000 \text{ kJ} \rightarrow 342 \text{ MJ} \quad (28)$$

Lo cual corresponde a 95 kWh

Ahora, si se considera que la fracción solar es de 30%

$$E_s = 0.3 \cdot Q_s = 28.5 \text{ kWh} \quad (29)$$

Luego se obtiene el volumen mínimo de almacenamiento para cubrir E_s , con ΔT útil del tanque de 40 K .

$$E_{m^3} = \rho_{agua} \cdot C_{p,agua} \cdot \Delta T_t = 167200 \text{ kJ} \quad (30)$$

Lo que corresponde a 46.44 kWh/m^3

Así, el volumen mínimo

$$V_{min} = \frac{E_s}{E_{m^3}} = 0.6136 \text{ m}^3 \approx 614 \text{ L} \quad (31)$$

Con esto se determina que el volumen ideal del termo es de 750, ya que 614 es el mínimo teórico, pero, en el mundo real, se necesita un margen por estratificación imperfecta, volumen muerto, pérdidas y una holgura para días nublados.

Además, aplicando un margen del 20%, se obtiene un volumen de 737 L , lo cual se redondea a 750, por razones comerciales y operativas. Entonces, $V = 0.75 \text{ m}^3$

Ahora se necesita obtener la energía necesaria para calentar el termo si comienza frío, lo cual corresponde al peor caso posible. Lo cual sería desde 15°C a 70°C .

$$E_{termo} = \rho_{agua} \cdot C_{p,agua} \cdot V \cdot \Delta T = 172425 \text{ kJ} = 172.425 \text{ MJ} \quad (32)$$

Lo cual corresponde a 47.9 kWh.

Luego, se obtiene la potencia necesaria para cargar el termo en 3 horas, el cual es un tiempo que consideramos apto para la recuperación del estanque.

$$P_{net} = \frac{E_{termo}}{t_c} = 15.96 \text{ kW} \quad (33)$$

También se necesita la potencia química y el caudal del biogás, y se calcula de la siguiente manera.

$$P_{quem} = \frac{P_{net}}{\eta_q} = 22.81 \text{ kW} \quad (34)$$

Entonces, la energía química por hora ($E_{q,h}$) es de 82.1 MJ/h

Con esto

$$\dot{V}_{biog} = \frac{E_{q,h}}{LHV_{biogas}} = 4.11 \text{ m}^3/\text{h} \quad (35)$$

Este flujo de biogás corresponde a así es que la carga parte fría y se calienta en 3 horas, si el termo ya está parcialmente caliente el caudal requerido será menor.

Como se mencionó anteriormente, el calentamiento del agua dentro del termo se realiza mediante un tubo que actúa como chimenea interna. A través de este tubo circulan la llama generada por el quemador y los gases producto de la combustión. El área y la longitud del tubo se determinan de la siguiente manera.

$$A_{chim} = \frac{P_{net}}{U_{a,g} \cdot \Delta T_{lm}} = 0.22807 \text{ m}^2 \quad (36)$$

Tomando un supuesto conservador para la diferencia de temperatura entre el agua y los gases, la cual considera una media del agua de 42.5°C y gases a 400°C, obteniendo una diferencia de temperatura aproximada de $\Delta T_{lm} = 350 \text{ K}$. También se determina un U razonable sin aletas de $U_{a,g} = 200 \text{ W/m}^2\text{K}$

Si se establece que el tubo central tiene un diámetro interno de $D_o = 0.10 \text{ m}$, se puede calcular la longitud.

$$L_{chim} = \frac{A_{chim}}{\pi \cdot D_o} = 0.726 \text{ m} \quad (37)$$

Posteriormente se determina la geometría del tanque, considerando $H/D = 1.5$, Si

$$V = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot H \quad (38)$$

Y,

$$H = 1.5 \cdot D \quad (39)$$

Entonces,

$$D = \left(\frac{4 \cdot V}{1.5 \cdot \pi} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (40)$$

Sustituyendo $V = 0.75 \text{ m}^3$, se obtiene $D = 0.86 \text{ m}$ y $H = 1.29 \text{ m}$

Por último, se calculan las pérdidas por aislamiento, considerando un modelo radial, aislamiento de 80 mm , $k = 0.035 \text{ W/mK}$, $D = 0.86 \text{ m}$, $t = 0.008 \text{ m}$, $L = 1.29 \text{ m}$, la temperatura media del estanque 70°C y la temperatura ambiente 10°C . Así, la resistencia de conducción radial para un cilindro es

$$R_{cond} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} = 0.6 \text{ K/W} \quad (41)$$

Con

$$r_1 = \frac{D}{2} = 0.43 \text{ m} \quad (42)$$

Y,

$$r_2 = r_1 + t = 0.51 \text{ m} \quad (43)$$

Así, la pérdida sería

$$Q_{loss} = \frac{(T_{med,es} - T_{amb})}{R_{cond}} = 100 \text{ W} \quad (44)$$

Lo cual corresponde a 2.4 kWh/día, que son pérdidas pequeñas.

3.4.6.2 Colector solar

Para el diseño de los colectores solares se toma como referencia una memoria de título previa, sin embargo, el presente trabajo introduce mejoras orientadas a aumentar la eficiencia térmica y reducir los costos globales de fabricación. El nuevo diseño está basado en un enfoque modular de mayor superficie unitaria (4 m² por colector), optimizado para aplicaciones de calentamiento de agua en sistemas de biodigestión.

El colector fue fabricado manualmente utilizando materiales de bajo costo y fácil acceso, manteniendo la premisa de ser una tecnología replicable por usuarios con conocimientos básicos de construcción. No requiere herramientas especializadas ni procesos industriales complejos, lo que permite su implementación en zonas rurales o de recursos limitados.

La estructura principal está construida a partir de perfiles livianos y madera tratada, seleccionados por su buena relación costo/resistencia y facilidad de montaje. Las dimensiones del colector se presentan en la sección siguiente, ajustadas para maximizar el aprovechamiento solar en la región de estudio.

Con el objetivo de minimizar las pérdidas térmicas, se implementó un sistema de aislamiento compuesto por dos capas: 20 mm de poliestireno expandido (EPS) y 50 mm de lana mineral. Esta configuración combina baja conductividad térmica y estabilidad dimensional, logrando una reducción efectiva de pérdidas por conducción y convección hacia el ambiente.

El elemento absorbedor de calor está conformado por un serpentín de polietileno de alta densidad (PEAD) de ½" de diámetro interno y 1.2 mm de espesor, dispuesto en forma de espiral concéntrica. A través de este serpentín circula el agua del sistema, absorbiendo la radiación solar transformada en calor. El uso de polietileno permite un diseño flexible, económico y resistente a la corrosión, manteniendo una adecuada conductividad térmica para aplicaciones de media temperatura.

Como cubierta se utiliza policarbonato alveolar transparente, material seleccionado por su alta transmisividad óptica, resistencia a la radiación ultravioleta, baja densidad y excelente comportamiento mecánico. Esta cubierta reduce las pérdidas por convección y crea un efecto invernadero que eleva la temperatura interna del colector, favoreciendo la captación de energía solar aún en condiciones ambientales adversas.

Entre la cubierta y el serpentín se genera una cámara de aire que actúa como aislante adicional y permite el desarrollo de convección natural controlada, distribuyendo el calor de forma más homogénea sobre la superficie del absorbedor.

Finalmente, la parte inferior del colector fue sellada con una lámina impermeable para proteger el conjunto frente a la humedad y el ingreso de aire frío. Las uniones fueron

tratadas con silicona de alta temperatura para garantizar la estanqueidad, facilitar el mantenimiento y prolongar la vida útil del sistema.

Este diseño actualizado permite reducir el costo por metro cuadrado de colector, aumentar la eficiencia térmica y facilitar la instalación modular, lo que lo convierte en una solución viable y escalable para sistemas de calentamiento de agua mediante energía solar.

A continuación, se muestran los cálculos realizados para adecuar la solución de la memoria a el caso de estudio actual. En la Tabla 12 se muestran los supuestos iniciales para el desarrollo del diseño.

Tabla 13: Supuestos iniciales para los cálculos

<i>Dato</i>	<i>Valor</i>
E_s	28.5 kWh
H_m	4.7 kWh/m ² día
A_{mod}	4 m ²
$D_{i,e}$	½ in
t_t	1.2 mm
$D_{0,e}$	15.1 mm
L_{mod}	75 m
k_{PE}	0.2 W/mK
τ_{PMMMA}	0.93
α_{tubo}	0.63
η_0	0.5859
U_L	4.5 W/m ² K
T_{me}	50 °C
T_{amb}	10 °C
I_0	1000 W/m ²
PSH	4.71 h

Primero se obtiene la eficiencia media estimada del módulo

$$\eta_{inst} = \eta_0 - \frac{U_L \cdot (T_{me} - T_{amb})}{I} \quad (45)$$

Para uso diario se puede aproximar una eficiencia media diaria, sustituyendo I por I_0 y usando H_m para energía diaria.

$$\eta_{avg} = \eta_0 - \frac{U_L \cdot (T_{me} - T_{amb})}{I_0} = 0.4059 \quad (46)$$

Con esta media el módulo convierte aproximadamente 40.6% de la energía solar incidente (día) en energía útil al fluido.

A continuación, se obtiene la energía diaria por módulo y numero de módulos necesarios para cumplir la demanda.

$$E_{mod} = \eta_{avg} \cdot H_m \cdot A_{mod} = 7.648 \text{ kWh/día} \quad (47)$$

Entonces, si hay que cubrir $E_s = 28.5 \text{ kWh}$

$$N = \frac{E_s}{E_{mod}} = 3.73 \text{ kg/s} \quad (48)$$

Redondeando hacia arriba se obtienen 4 módulos.

Luego se calcula la geometría del serpentín y el área de intercambio necesaria. Primero se obtiene el área superficial exterior del tubo por módulo.

$$A_{ext} = \pi \cdot D_{0,e} \cdot L_{mod} = 3.56 \text{ m}^2 \quad (49)$$

Ahora, se obtiene la resistencia térmica del tubo plástico y el coeficiente de perdidas interno. Se sabe que la resistencia de conducción de la pared y la convección interna limitan la transferencia desde la pared interior al agua, por lo que se obtienen estas resistencias. Para esto se considera $h_{in} = 500 \text{ W/m}^2\text{K}$, lo cual es una estimación típica para un flujo forzado pequeño.

$$R_{conv,in} = \frac{1}{h_{in}} = 0.002 \text{ m}^2\text{K/W} \quad (50)$$

Se continua con la resistencia por la pared plástica.

$$R_{wall} = \frac{t_t}{k_{PE}} = 0.0060 \text{ m}^2\text{K/W} \quad (51)$$

Así, la resistencia total entre la pared exterior que absorbe y el agua

$$R_{tot} = R_{conv,in} + R_{wal} = 0.008 \text{ m}^2\text{K/W} \quad (52)$$

La pared plástica aporta la mayor parte de la resistencia, entonces U_{tube} queda en torno a $125 \text{ W/m}^2\text{K}$

Se sigue con la verificación térmica instantánea (potencia pico). Primero se obtiene la ganancia óptica instantánea, considerando que, instantáneamente el pico sería $I = 800 \text{ W/m}^2$

$$\dot{q}_{opt} = \eta_0 \cdot I \cdot A_{mod} = 1874.8 \text{ W} \quad (53)$$

Se prosigue con las perdidas instantáneas por temperaturas.

$$\dot{q}_{loss} = U_L \cdot A_{mod} \cdot (T_{me} - T_{amb}) = 720 \text{ W} \quad (54)$$

Finalmente, se calcula la potencia útil instantánea estimada

$$\dot{Q}_{U,peak} = \dot{q}_{opt} - \dot{q}_{loss} = 1154.8 \text{ W} \quad (55)$$

Continuando, se obtiene el caudal necesario por módulo durante horas de sol, lo que corresponde al dimensionamiento hidráulico. Primero, la potencia efectiva durante las horas de sol se toma como:

$$\dot{Q}_{sol} = \frac{E_{mod}}{PSH} = 1.624 \text{ kW} \quad (56)$$

El objetivo es que el circuito transporte esa potencia con un salto térmico por colector $\Delta T_{col} = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ (si entrada 60°C y salida 50°C , valores típicos). Entonces el caudal másico:

$$\dot{m}_{col} = \frac{\dot{Q}_{sol}}{C_{p,agua} \cdot \Delta T_{col}} = 0.039 \text{ kg/s} \quad (57)$$

Ahora, el flujo volumétrico

$$\dot{V}_{col} = \frac{\dot{m}_{col}}{\rho_{agua}} = 3.9 \cdot 10^{-5} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \rightarrow 0.1404 \text{ m}^3/\text{h} \quad (58)$$

Luego, la velocidad del tubo y el área interna

$$A_c = \frac{\pi \cdot D_{i,e}^2}{4} = 0.0001266 \text{ m}^2 \quad (59)$$

$$v_{col} = \frac{\dot{V}_{col}}{A_c} = 0.3 \text{ m/s} \quad (60)$$

El número de Reynolds, considerando agua a 60°C y viscosidad dinámica $\mu_{agua} = 4.7 \cdot 10^{-4} \text{ Pas}$

$$Re = \frac{\rho_{agua} \cdot v_{col} \cdot D_{i,e}}{\mu_{agua}} = 8106.4 \quad (61)$$

La estimación $h_{in,e}$ se realiza mediante Dittus-Boelter, donde si $Re > 4000$ se utiliza una fórmula para flujo turbulento. Si para el agua a 60°C $Pr = 1.75$

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0.8} \cdot Pr^{0.4} = 38.55 \quad (62)$$

Así, el coeficiente convectivo interno, considerando $k_{water} = 0.647 \text{ W/mK}$

$$h_{in,e} = \frac{Nu \cdot k_{agua}}{D_{i,e}} = 1.964 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (63)$$

Se continúa con el cálculo de la pérdida de agua por fricción para cada módulo, para esto se utiliza la fórmula de Darcy-Weisbach. Primero se obtiene el factor de fricción, para estos utiliza la aproximación para Re entre $3000 - 10^5$, si $Re = 8106$

$$f = 0.3164 \cdot Re^{-0.25} = 0.0333 \quad (64)$$

Luego, la pérdida de carga a lo largo de la longitud L_{mod}

$$h_{f,e} = f \cdot \frac{L_{mod}}{D_{i,e}} \cdot \frac{\dot{v}_{col}^2}{2 \cdot g} = 0.902 \text{ m} \quad (65)$$

Y la pérdida de presión

$$\Delta p = \rho_{agua} \cdot g \cdot h_{f,e} = 8.85 \text{ kPa} \quad (66)$$

3.4.6.3 Espiral

Con el fin de transferir el calor del agua calentada proveniente del sistema de calefacción hacia el fluido contenido en el biodigestor tipo “Cubo”, se diseña un intercambiador de calor en forma de espiral. Este componente se instala en el interior del reactor, en contacto directo con el sustrato a calentar, lo que permite una distribución homogénea de la temperatura y evita zonas frías dentro del volumen útil del digestor.

El espiral se fabrica en un material compatible con el medio biológico, resistente a la corrosión, abrasión y variaciones térmicas, y con una superficie de intercambio suficiente para asegurar la transferencia eficiente del calor sin afectar la integridad del sistema ni alterar el proceso anaerobio. En las secciones siguientes se presentan los cálculos de diseño térmico e hidráulico de la espiral y en la Tabla 13 se muestran los parámetros considerados.

Tabla 14: Valores establecidos para el diseño

Dato	Valor
D_i	1 in
$D_{c,e}$	31.4 mm
$L_{separación}$	10 mm
k_{PE}	0.2 W/mK
h_i	500 W/m ² K
h_o	100 W/m ² K

La longitud total del cubo en espiral se obtiene mediante la espiral de Arquímedes, con lo que se tienen $L_{espiral} = 72.85 \text{ m}$

Con lo que se obtiene el área

$$A_{esp} = \pi \cdot D_{o,e} \cdot L = 7.19 \text{ m}^2 \quad (67)$$

Ahora, la espiral entregará la potencia necesaria usando LMTD (50°C a 70°C) entre agua y slurry (35°C), así $\Delta T_1 = 70 - 35 = 35 \text{ K}$ y $\Delta T_2 = 50 - 35 = 15 \text{ K}$, entonces

$$\Delta T_{lm,2} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} = 23.6 \text{ K} \quad (68)$$

$$U_{esp} = \frac{1}{\frac{1}{h_o} + \frac{r_o}{k_{PE}} \ln \left(\frac{r_o}{r_i} \right) + \frac{r_o}{r_i} \cdot \frac{1}{h_i}} = 34.34 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (69)$$

Con $A_{esp} = 7.19 \text{ m}^2$ la potencia entregada depende de

$$Q_{esp} = U_{esp} \cdot A_{esp} \cdot \Delta T_{lm,2} = 5.8 \text{ kW} \quad (70)$$

3.4.7 Balance de masa y energía

En el Anexo 2 se presentan los cálculos para el balance de masa y energía para el proyecto, este constituye una herramienta fundamental para la evaluación técnica del sistema de digestión anaerobia propuesto, ya que integra de manera cuantitativa todas las variables operacionales del proceso y permite estimar los flujos de entrada, transformación y salida del sistema. En primer lugar, el balance de masa permite determinar las cantidades de sustrato y agua requeridas en cada batch, así como los volúmenes mensuales que ingresan al digestor en los dos escenarios planteados. A partir de estos valores se calcula la mezcla total de alimentación y se evalúan los tiempos de retención hidráulica (TRH) en el digestor Cubo y en el digestor Pulmón, verificando que la carga aplicada sea coherente con los volúmenes diseñados para asegurar la estabilidad biológica del proceso.

En segundo lugar, el balance energético integra las propiedades termodinámicas del sustrato y las condiciones operacionales del sistema, estimando la energía necesaria para elevar la mezcla desde la temperatura ambiente hasta la temperatura óptima de digestión. Este análisis considera las pérdidas térmicas del digestor, la eficiencia del sistema de calefacción y el aporte energético del biogás generado, permitiendo determinar la demanda térmica diaria, la potencia requerida en estado estacionario y la equivalencia del biogás en términos de calor y electricidad. Asimismo, se incorporan estimaciones de variables complementarias, como la producción de digestato, la generación de condensado y el consumo mensual de carbón activado para la remoción de H_2S , aspectos esenciales para dimensionar los equipos auxiliares y anticipar requerimientos operacionales.

Los resultados obtenidos mediante este balance permiten concluir que el sistema de digestión anaerobia propuesto se encuentra correctamente dimensionado para procesar los volúmenes de residuos generados en la caleta, tanto en el escenario de mayor disponibilidad (Opción A) como en el de menor carga estacional (Opción B). La composición de la mezcla de alimentación y los TRH calculados, 21 a 28 días para el digestor Cubo y 96 a 128 días para el digestor Pulmón, confirman que los volúmenes seleccionados garantizan una permanencia adecuada del sustrato, evitando sobrecargas y manteniendo condiciones estables de digestión. En términos energéticos, la generación de biogás del sistema, del orden de 4.2 a $4.5 \text{ m}^3/\text{día}$, es suficiente para cubrir la mayor parte de la demanda térmica asociada al calentamiento del sustrato y del agua de dilución. La potencia útil del biogás, estimada entre 5 y 7 kW , permite compensar las pérdidas térmicas del digestor y mantener la temperatura de operación en torno a los $35 \text{ }^\circ\text{C}$, evidenciando un alto grado de autosuficiencia energética y reduciendo la necesidad de combustibles externos.

Por otro lado, la producción de co-productos como digestato, condensado y H_2S se mantiene dentro de rangos manejables, facilitando su manipulación y confirmando la necesidad de incorporar etapas de purificación, como el filtro de carbón activado. Finalmente, la coherencia entre los caudales de entrada, los volúmenes de digestión, la

producción de biogás y las demandas térmicas demuestra que el sistema puede operar de manera estable frente a variaciones estacionales en la generación de residuos. En conjunto, el balance de masa y energía constituye un insumo esencial para validar la viabilidad técnica del proyecto y para asegurar que el diseño final se encuentre adecuadamente dimensionado para las condiciones reales de operación en la caleta.

3.4.8 Selección de los Elementos de la Planta de biodigestión

Anteriormente se mencionaron una serie de elementos necesarios para el funcionamiento de la planta. A continuación, se detalla el proceso de selección de ellos, considerando las condiciones de operación que se tendrían si está situado en el terreno seleccionado, la disponibilidad existente en el mercado y el presupuesto del proyecto.

3.4.8.1 Bomba de Agua Fría

Para la bomba de agua fría se requiere un equipo capaz de succionar el agua y posteriormente distribuirla a través del sistema, por lo que es necesario que sea autocebante. Además, se estima que en la red habrá 2 codos y estará hecha de PVC. Los demás valores considerados para los cálculos se presentan en la Tabla 16.

Tabla 15: Valores para los cálculos de la bomba

<i>Dato</i>	<i>Valor</i>
Q_{bba1}	$3.6 \text{ m}^3/h$
L_{tub}	120 m
h_{est}	2 m
h_{suc}	2 m
v_{agua}	$1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/s$

Primero se necesitan obtener las pérdidas de carga, considerando un diámetro de 2"

$$A_{tub1} = \frac{\pi \cdot D_{tub1}}{4} = 0.00196 \quad (71)$$

$$v_{tub1} = \frac{Q_{bba1}}{A_{tub}} = 0.509 \text{ m/s} \quad (72)$$

Luego se calcula el número de Reynolds (Re)

$$Re_{tub1} = \frac{v_{tub1} \cdot D_{tub1}}{v_{agua}} = 25450 \quad (73)$$

El valor obtenido indica que existe un flujo turbulento moderado. Ahora se pasa al cálculo de coeficiente de fricción, para el cual se puede utilizar la fórmula de Swamee-Jain, o utilizar la aproximación de $f_{bb1} = 0.026$, considerando como material PVC y $Re \approx 2500$. En este caso se utiliza la última.

Con esto se puede obtener la pérdida de carga por fricción, entonces

$$h_f = f_{bb1} \cdot \frac{L_{tub}}{D_{tub1}} \cdot \frac{v_{tub1}^2}{2 \cdot g} = 0.823 \text{ m} \quad (74)$$

Luego, la pérdida por accesorios, considerando 2 codos de 90° , se tiene $K=0.8$, 0.4 por cada codo, así

$$h_{acc} = 2K_{codo} \cdot \frac{v_{tub1}^2}{2 \cdot g} = 0.0105 \text{ m} \quad (75)$$

Entonces, las pérdidas de carga totales son

$$h_{perd1} = h_f \cdot h_{acc} = 0.8335 \text{ m} \quad (76)$$

Con esto, se obtienen la altura dinámica total requerida (TDH)

$$TDH = h_{est} + h_{succ} + h_{perd} = 4.83 \text{ m} \quad (77)$$

Por último, se calcula la potencia mínima teórica requerida

$$P_{el} = \frac{\rho_{agua} \cdot g \cdot Q_{bb1} \cdot TDH}{\eta_{bb1}} = 105.4 \text{ W} \quad (78)$$

Una bomba eléctrica de 0.125 HP (0.93 W) no alcanza, entonces la bomba deberá ser de una de 0.25 HP (186 W). Entonces, los parámetros para la selección de la bomba se muestran en la Tabla 17.

Tabla 16: Parámetros de selección de bomba

Parámetro	Valor
Caudal	$\geq 3.6 \text{ m}^3/h$
Potencia	0.25 HP
Altura manométrica	$\geq 5 \text{ m}$

Considerando los valores de la Tabla 16 se selecciona la bomba Reggio SJX 80 bomba centrífuga autocebante tipo jet acero inoxidable, la cual posee las características mostradas en la Tabla 18.

Tabla 17: Operación de la bomba

Monofase 230V – 50Hz	HP	Q=Caudal	m^3/h	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4	2.7	3	3.6	4.2	4.8
			L/min	10	15	20	25	30	35	40	45	50	60	70	80
SJX 80	0.8			38	36	34	32	29	27	22	19				

3.4.8.2 Bomba de Agua Caliente

Para la selección de la bomba de agua caliente se consideran los datos mostrados en la Tabla 19 mostrada a continuación.

Tabla 18: Datos para dimensionar la bomba de agua caliente

Dato	Valor
Q_{bba2}	$0.56 m^3/h$
L_{tub2}	$24 m$
K_{codo}	0.3
$K_{válvula}$	0.2
ε_{pvc}	$0.00015 m$
η_{bba2}	0.45

Se evalúan 4 diámetros, $0.015 m$, $0.020 m$, $0.025 m$ y $0.032 m$. Esto para seleccionar el más adecuado para el sistema. Las ecuaciones utilizadas para determinar esto se muestran a continuación y en la Tabla 20 se muestran los resultados obtenidos para cada diámetro.

$$A_{tub2} = \frac{\pi \cdot D_{bba2}^2}{4} \quad (79)$$

$$v_{bb2} = \frac{Q_{bba2}}{A_{tub2}} \quad (80)$$

$$Re_{tub2} = \frac{\rho_{agua} \cdot v_{agua} \cdot D_{bba2}^2}{\nu_{agua}} \quad (81)$$

$$f_{bba2} = 0.25 \left(\log \left(\frac{\varepsilon_{pvc}}{3.7 D_{bba2}} + \frac{5.54}{Re_{tub2}^{0.9}} \right) \right)^{-2} \quad (82)$$

$$h_{f2} = f_2 \frac{L_{tub2}}{D_{tub2}} \cdot \frac{v_{bb2}}{2 \cdot g} \quad (83)$$

$$K_{sum} = 6 \cdot K_{codo} + 4 \cdot K_{válvula} \quad (84)$$

$$h_{acc2} = K_{sum} \cdot \frac{v_{bb2}}{2 \cdot g} \quad (85)$$

$$h_{perd2} = h_{f2} + h_{acc} \quad (86)$$

$$P_{el2} = \frac{\rho_{agua} \cdot g \cdot Q_{bb2} \cdot h_{perd2}}{\eta_{bba2}} \quad (87)$$

Tabla 19: Resultados para los diferentes diámetros

Resultados	0.015 m	0.020 m	0.025 m	0.032 m
A_{tub2}	$1.767 \cdot 10^{-4} m^2$	$3.142 \cdot 10^{-4} m^2$	$4.909 \cdot 10^{-4} m^2$	$8.038 \cdot 10^{-4} m^2$
v_{bb2}	$0.8805 m/s$	$0.4953 m/s$	$0.31669 m/s$	$0.1835 m/s$
Re_{tub2}	$2.83 \cdot 10^4 m$	$2.12 \cdot 10^4 m$	$1.70 \cdot 10^4 m$	$1.33 \cdot 10^4 m$
f_{bba2}	0.0405	0.03817	0.0370	0.01909
h_{f2}	$2.561 m$	$0.2728 m$	$0.182 m$	$0.00520 m$
h_{acc2}	$0.1028 m$	$0.03253 m$	$0.01331 m$	$0.00496 m$
h_{perd2}	$2.664 m$	$0.6053 m$	$0.1953 m$	$0.05696 m$
P_{el2}	$8.69 W$	$2.05 W$	$0.66 W$	$0.19 W$

Con esto, el diámetro seleccionado es el de $0.020 m$, ya que muestra un buen comportamiento, teniendo perdidas bajas, velocidad moderada y baja potencia necesaria.

Por otro lado, si se estima que hay que elevar 3 metros de cota, este se sumaría a las perdidas anteriores, lo que resultaría en $h_{tot,real} = 3.6 m$. En ese caso la bomba debe entregar $0.56 m^3/h$ a aproximadamente 4 m de head.

Finalmente se selecciona la bomba recirculadora de agua Leo LRP 25-70/130 220 V, la cual cumple con todo lo mencionado y soporta temperaturas de agua de hasta 110°C.

3.4.8.3 Biodigestor Pulmón

Para el biodigestor inicialmente, en la etapa de ingeniería básica, se había establecido que las dimensiones serían de 6x3x1.3 m, lo que serían 24.4 m³ y que el gasómetro posee un volumen de 27m³, lo que suma 51.4 m³. Luego, debido a que se tenía más espacio en el terreno y se decidió que el gasómetro y el biodigestor pulmón fueran solo una estructura, se modificaron las dimensiones a 7.4x4.2x2.3 m, lo cual corresponde a 71.5 m³.

Pero, realizando las cotizaciones correspondientes, se denota que es más fácil y económico comprar el biodigestor pulmón que mandarlo a hacer, lo que significa que las dimensiones están regidas por la disponibilidad existente en la empresa a la que se vaya a comprar, considerando como parámetro de elección el volumen total del pulmón. Entonces, si se tiene que, en la ingeniería básica, entre el biodigestor pulmón y el gasómetro hay 51.4 m³

Ahora, la empresa seleccionada para la compra es Tarpulin, la cual tiene distintos volúmenes disponibles, de los cuales seleccionamos el de 50 m³, debido a que es un valor el cual está entre los volúmenes considerados. En la Tabla 21 se muestran las dimensiones y el valor para los volúmenes cotizadas.

Tabla 20: Dimensiones y precios de las cisternas cotizadas.

Litros	m3	Largo (m)	Ancho (m)	Alto (m)	Precio (+IVA)
30000	30	5.7	6.8	1.2	\$1.752.240
40000	40	5.7	7.8	1.4	\$1.973.918
50000	50	7.0	7.8	1.4	\$2.268.527

3.4.8.4 Colectores Solares

Al diseñar los colectores solares se proyectó inicialmente que éstos cubrieran el 30% de la demanda energética necesaria para calentar el biodigestor cúbico, lo que implicaba instalar ocho módulos de 2x2 m. Sin embargo, al cotizar los materiales surgieron dos dificultades. Primero, es complejo encontrar y transportar planchas de PMMA de esas dimensiones; las más grandes disponibles son de 1.2x1.2 m, por lo que se optó por ajustar el tamaño del colector al utilizado en la memoria de referencia. Segundo, la construcción de ocho módulos de 2x2 m excede el presupuesto del proyecto. Ante esto, se decidió reducir el aporte solar a un 15%.

A continuación, se presentan los cálculos realizados para determinar el número de módulos necesarios, considerando el nuevo tamaño y el objetivo de cubrir el 15% de la demanda energética. Los datos utilizados se muestran en la Tabla 22.

Tabla 21: Datos nuevos colectores

Dato	Valor
f_{solar}	0.15
A_{col2}	1.44 m^2

Primero se calcula la energía diaria objetivo que debe dar el conjunto solar

$$E_{s2} = f_{solar} \cdot Q_s = 14.25 \text{ kWh/día} \quad (88)$$

Ahora, la energía útil diaria entregada por un solo colector

$$E_{mod2} = A_{mod2} \cdot \eta_{avg} \cdot H_m = 2.754 \text{ kWh/día} \quad (89)$$

Luego, el número de colectores necesarios

$$N_2 = \frac{E_{s2}}{E_{mod2}} = 5.17 \quad (90)$$

Redondeando hacia arriba, serían 6 colectores.

3.4.8.5 Termo de agua caliente

Al calcular las dimensiones del termo de agua caliente necesarias para poder elevar la temperatura del biodigestor cubo se concluye que se necesita un volumen de 750 L, esto si el tiempo de calefacción es de 3 horas.

Cuando se pasó a la etapa de cotización del proyecto no se encuentran termos de esta capacidad, el más cercano siendo de 600 L, costando cerca de 6 millones de pesos, lo que es un valor elevado para las dimensiones de este proyecto.

Entonces se decide que en lugar de tener un termo de 750 L se van a instalar 3 termos, dos de biogás y uno de gas licuado, cada uno de 120 L, lo cual no cubre el volumen calculado. Esto no significa que el sistema de calefacción no logre calentar el cubo, si no que influye en el tiempo otros parámetros Las variaciones en los cálculos que conlleva el cambio se detallan a continuación, considerando solo un termo, ya que inicialmente solo se contaría con el termo de GLP.

Primero, la energía necesaria para calentar el agua del termo, si comienza de 15°C hasta 70°C

$$E_{act} = \rho_{agua} \cdot C_{p,agua} \cdot V_{nuevo} \cdot \Delta T_{frio} = 7.663 \text{ kWh} \quad (91)$$

Luego, la potencia neta para cargar en 3 horas

$$P_{net,act} = \frac{E_{act}}{t_c} = 2.554 \text{ kW} \quad (92)$$

Así, la potencia requerida por el quemador

$$P_{quem,act} = \frac{P_{net,act}}{\eta_q} = 3.649 \text{ kW} \quad (93)$$

La energía química por hora y el consumo de combustible sería, con $LHV_{GLP} = 46 \text{ MJ/kg}$ y $\rho_{GLP} = 0.54 \text{ kg/L}$

$$E_{q,h2} = P_{quem,act} \cdot 3.6 = 13.14 \text{ MJ/h} \quad (94)$$

$$\dot{m}_{GLP} = \frac{E_{q,h}}{LHV_{GLP}} = 0.286 \text{ kg/h} \quad (95)$$

$$\dot{V}_{GLP} = \frac{\dot{m}_{GLP}}{\rho_{GLP}} = 0.529 \text{ L/h} \quad (96)$$

Ahora, para calcular las perdidas por aislamiento se mantiene la relación $H/D = 1.5$

$$D_2 = \left(\frac{4V_{nuevo}}{1.5\pi} \right)^{1/3} = 0.672 \text{ m} \quad (97)$$

$$r_{1,act} = \frac{D_2}{2} = 0.336 \text{ m} \quad (98)$$

$$r_{2,act} = r_{1,act} + t = 0.416 \text{ m} \quad (99)$$

$$H_2 = 1.5 \cdot D_2 = 1.008 \text{ m} \quad (100)$$

$$R_{cond,act} = \frac{\ln\left(\frac{r_{2,act}}{r_{1,act}}\right)}{2\pi k H_2} = 0.961 \text{ K/W} \quad (101)$$

$$Q_{loss,act} = \frac{T_{int} - T_{amb}}{R_{cond,act}} = 62.5 \text{ W} \quad (102)$$

Por último, la capacidad de almacenamiento respecto al aporte solar de los colectores, considerando $E_{m^3} = 46.44 \text{ kWh/m}^3$

$$E_{guardado} = E_{m^3} \cdot V_{nuevo} = 5.573 \text{ kWh} \quad (103)$$

$$\%E_s = \frac{E_{guardado}}{E_{s2}} = 0.374 \approx 37.4\% \quad (104)$$

3.4.8.6 Invernadero

Al cambiar las medidas del biodigestor pulmón ya no se encuentran en el mercado invernaderos que coincidan con lo que se necesita, entonces se toma la decisión de construir un invernadero personalizado para la planta. Este contará con una estructura hecha de tubos de PVC y lona de polietileno. Esto ya que es la forma más económica y eficiente de obtener el invernadero necesario. Sus dimensiones serán de 7.3 x 8.1 x 1.8 m ya que se necesita un pequeño margen entre el biodigestor y el invernadero, y una persona de estatura media debe poder entrar.

3.5 Análisis Económico

Para el análisis económico se evalúan los distintos factores que podrían significar un aumento en el costo de instalación y operación de la planta, los cuales posteriormente se contrastan con los beneficios económicos que se podrían obtener de este proyecto. Se evalúan indicadores económicos como el VAN, TIR, PRI, entre otros. Esto, con el objetivo de determinar la viabilidad financiera del sistema.

3.5.1 Costos de inversión

Los costos de inversión corresponden al conjunto de gastos que se requieren para construir, implementar y poner en marcha de la planta de biogás. Los cuales se dividen en infraestructura, equipos principales, sistemas auxiliares y costos asociados a ingeniería y permisos. Los costos considerados se muestran en la Tabla 23.

Tabla 22: Costos de inversión

<i>Elemento</i>	<i>Presupuesto (CLP)</i>
Desgasificador	\$200,000
Biodigestor Cubo	\$1,000,000
Biodigestor Pulmón	\$2,300,000

Instalación Eléctrica	\$1,000,000
Bombas	\$2,000,000
Cierre Perimetral	\$2,200,000
Sistema de Calefacción	\$2,000,000
Transporte	\$2,000,000
Canalización	\$1,200,000
Insumos Varios	\$1,000,000
Mano de obra	\$5,720,000
Total	\$20,620,000

3.5.2 Costos de Operación y Mantenimiento

Estos valores operacionales consideran los gastos recurrentes necesarios para asegurar el funcionamiento adecuado de la planta. Como esta aún no se encuentra en operación se aproximan valores según los elementos existentes en la planta, como se muestra a continuación:

- LEO LRP 25-70/130: potencia nominal tomada como 146 W (0.146 kW) según fichas comerciales. Operación estimada 6 h/día (circulación de calefacción/recirculación durante horarios de mayor necesidad).
- REGGIO SJX 80: potencia 0.8 HP = 0.596 kW (ficha técnica indica 0.8 HP / 220 V). Operación estimada 2 h/día (bombas de succión/llenado/dilución puntuales).
- Licuadoras RAF R.295 (5 unidades presentes): potencia tomada como 1.0 kW por unidad; se asume que todas están en uso efectivo durante la alimentación/triturado por 1 h/día
- Precio eléctrico tomado como referencia conservadora 180 CLP/kWh el cual es el valor medio residencial.

Con estas aproximaciones el consumo eléctrico sería:

- LEO LRP 25-70/130: $0.146 \text{ kW} \cdot 6 \text{ h/día} = 0.876 \text{ kWh/día}$
- REGGIO SJX 80: $0.596 \text{ kW} \cdot 2 \text{ h/día} = 1.192 \text{ kWh/día}$
- Licuadoras RAF: $5.0 \text{ kW} \cdot 1 \text{ h/día} = 5 \text{ kWh/día}$

Así, el consumo diario total aproximado es de 7.068 kWh/día, el consumo mensual, considerando 30 días es de 212.04 kWh/mes y el consumo anual es de 2544.48 kWh/año.

Entonces el costo mensual de electricidad es de 38,167 pesos y el anual es de 458,006.4 pesos

Luego, evaluamos el costo del mantenimiento preventivo y consumibles anuales de la siguiente manera:

- Mantenimiento LEO LRP, considerando revisión, limpieza, repuestos menores se estima 40,000 pesos al año.
- Mantenimiento REGGIO SJX80, considerando revisión sello, sello mecánico y limpieza se estima 60,000 pesos al año.
- Mantenimiento licuadoras 5 uso ligero 100,000 pesos al año.
- Consumibles generales como lubricantes, teflón, sellos, abrasivos, guantes, materiales de limpieza se estiman 50,000 pesos al año.
- Inspecciones y pruebas de estanqueidad como kits, detectores y accesorios 40000 pesos al año.

El total del mantenimiento anual es de 290,000 pesos al año o 24,170 pesos al mes.

Ahora, la reposición o amortización de equipos, al año sería:

- LEO LRP 25-70/130 vale aproximadamente \$85,500. Si la vida útil estimada es de 5 años, la amortización sería de \$17,100 pesos al año.
- Precio REGGIO SJX80 vale aproximadamente \$170,100. Si la vida útil estimada es de 7 años, la amortización sería de \$24,300 al año.
- Licuadoras son 5 unidades, costo total aproximadamente es \$200,000 si la vida útil es de 2 años, la amortización es de \$80,000 al año.

Con esto, la amortización anual sería de \$121,400 al año, lo cual serían \$10,117 mensuales.

3.5.3 Beneficios del Proyecto

La puesta en marcha de la planta de biogás en Caleta La Barra genera beneficios técnicos, económicos, ambientales y sociales claramente identificables y cuantificables. En primer lugar, desde el punto de vista energético el sistema transforma los residuos orgánicos locales en un recurso útil: según las estimaciones de potencial del proyecto, la planta es capaz de generar entre 2.851 y 5.821 kWh térmicos por mes (en los escenarios evaluados), lo que se traduce en una producción de metano entre 288 y 588 $Nm^3 CH_4$ por mes según el nivel de sustrato considerado.

En términos de sustitución de combustibles convencionales, la generación energética del biogás equivale a una reducción directa en la demanda de gas licuado de petróleo. El estudio cuantifica esta sustitución en aproximadamente 162 a 331 kg GLP equivalente por mes, dependiendo del escenario de entrada de residuos, escenarios que van desde sólo vísceras hasta la incorporación de restaurantes y servicios de comida domiciliaria.

Otro beneficio tangible es la valorización del digestato: la operación del biodigestor produce volúmenes de fertilizante líquido que, según los escenarios analizados, oscilan entre 28 y 76 m^3 por año. Este producto puede usarse localmente como enmienda orgánica para pequeños huertos, jardinería comunitaria o para la recuperación de suelos, contribuyendo a cerrar el ciclo de nutrientes y reducir la necesidad de fertilizantes químicos importados, con el consiguiente beneficio económico y ambiental, también puede ser vendido a externos.

El beneficio ambiental más relevante, estrechamente vinculado al anterior, es la reducción de la carga orgánica que actualmente es mal dispuesta en la caleta y en el cauce del río Toltén. La digestión anaerobia convierte fracciones biodegradables en biogás y productos estabilizados, disminuyendo la proliferación de vectores, como moscas, aves oportunistas, perros, los malos olores y el riesgo de contaminación local que se ha identificado en entrevistas y levantamientos con la comunidad. Esto mejora la salubridad del entorno inmediato, la calidad del paisaje costero y las condiciones para la actividad turística y pesquera.

Finalmente, existen beneficios socioeconómicos y de resiliencia comunitaria: crea oportunidades de capacitación técnica local para la operación y mantención, incluso si la operación es comunitaria, y mejora la gestión de residuos en un núcleo poblacional pequeño donde la acumulación orgánica tiene un alto impacto relativo. Además, la integración de colectores solares y un sistema de calefacción diseñado para operar con el biogás incrementa la autosuficiencia energética del sistema y reduce costos operacionales a mediano plazo, reforzando la sostenibilidad económica del proyecto.

En conjunto, los beneficios cuantitativos, energía y fertilizante, y los beneficios cualitativos, salud pública, reducción de olores y vectores, mejora del paisaje y capacidad técnica local, muestran que la implementación de la planta en Caleta La Barra aporta un impacto positivo de alta magnitud y carácter perdurable, siempre que se mantengan las prácticas de operación y las medidas de mitigación propuestas en este estudio

3.5.4 Flujo de Caja del Proyecto

El análisis económico del proyecto se realizó mediante la construcción de un flujo de caja a diez años, incorporando todos los costos y beneficios asociados al sistema de producción de biogás propuesto para Caleta La Barra. Para ello, se utilizaron los valores de inversión inicial (CAPEX) y de costos de operación y mantenimiento (OPEX) obtenidos directamente del presupuesto y las especificaciones técnicas desarrolladas en capítulos anteriores de la memoria. Según lo indicado en el documento, la inversión inicial total del sistema asciende a \$20.020.000, valor que corresponde a la construcción del biodigestor, el invernadero térmico, las bombas, tuberías, colectores solares, estanques, equipamiento eléctrico y accesorios.

Los costos de operación anual se calcularon utilizando la información detallada en la sección de OPEX de la memoria. Estos consideran principalmente tres ítems: consumo eléctrico del sistema, mantenimiento preventivo y reposición o amortización de los equipos. El consumo eléctrico anual se obtuvo a partir de las potencias nominales y horas de funcionamiento de las bombas y de las cinco licuadoras de procesamiento de sustrato. Esta operación conjunta genera un consumo aproximado de 2544.48 *kWh* por año, valor que multiplicado por la tarifa utilizada en el estudio (180 *CLP/kWh*) entrega un gasto eléctrico anual de \$458,006.4. A este valor se suman los costos anuales de mantenimiento preventivo y consumibles, estimados en \$290,000, además de la amortización anual de los equipos, calculada en \$121,400, según sus vidas útiles estimadas. De esta forma, el costo

operativo total anual del sistema corresponde a \$869,406.4, cifra utilizada de manera constante durante todo el horizonte del análisis.

Los ingresos del proyecto se modelaron como ahorros económicos por sustitución de gas licuado (GLP). Para ello, se utilizaron directamente los valores de producción de metano obtenidos en el capítulo de modelación del biodigestor, donde se evaluaron cuatro escenarios de disponibilidad de residuos. Dichos escenarios producen montos equivalentes de GLP entre 162 y 331 *kg* por mes, lo cual representa entre 1944 y 3972 *kg* por año. Para convertir estos valores en beneficios monetarios se adoptó un precio unitario de \$1,459.47 por kilogramo de GLP, obtenido a partir del precio promedio de un cilindro de 15 *kg* informado por proveedores comerciales. De esta manera, se estimaron los ahorros anuales brutos para cada escenario.

Posteriormente, para obtener el beneficio neto anual se restó el OPEX anual fijo del ahorro bruto por sustitución de GLP. Este cálculo permitió determinar el flujo anual positivo que genera el sistema una vez en operación. Con estos valores se construyó un flujo de caja a diez años, donde el año 0 corresponde a la inversión inicial y los años 1 al 10 corresponden a los beneficios netos anuales constantes. Los resultados para cada escenario se muestran en la Tabla 24.

Tabla 23: Flujo de caja para cada escenario

<i>Año</i>	<i>Escenario</i>	<i>Ingresos (CLP)</i>	<i>Gastos OPEX (CLP)</i>	<i>Flujo Neto (CLP)</i>
0	Todos	0	20,620,000	-20,620,000
1	1	2,837,203	869,406	1,967,797
	2	3,845,987	869,406	2,976,581
	3	4,821,494	869,406	3,952,088
	4	5,797,002	869,406	4,927,596
2	1	2,837,203	869,406	1,967,797
	2	3,845,987	869,406	2,976,581
	3	4,821,494	869,406	3,952,088
	4	4,821,494	869,406	4,927,596
3	1	2,837,203	869,406	1,967,797
	2	3,845,987	869,406	2,976,581
	3	4,821,494	869,406	3,952,088
	4	4,821,494	869,406	4,927,596
4	1	2,837,203	869,406	1,967,797
	2	3,845,987	869,406	2,976,581

	3	4,821,494	869,406	3,952,088
	4	4,821,494	869,406	4,927,596
5-10	1	2,837,203	869,406	1,967,797
	2	3,845,987	869,406	2,976,581
	3	4,821,494	869,406	3,952,088
	4	4,821,494	869,406	4,927,596

Para evaluar la rentabilidad del proyecto se calcularon tres indicadores: Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR) y Periodo de Recuperación (Payback). El VAN se obtuvo actualizando los flujos futuros con una tasa de descuento del 6%, representativa de proyectos comunitarios de pequeña escala. La TIR se determinó como la tasa que anula el VAN, mientras que el Payback se evaluó como el número de años necesarios para que la suma de los beneficios netos acumulados iguale la inversión inicial.

Los resultados obtenidos muestran en la Tabla 25, estos muestran un comportamiento claramente dependiente del nivel de residuos disponibles. En el Escenario 1, correspondiente a la disponibilidad mínima de sustrato, el beneficio anual neto no alcanza a cubrir la inversión dentro del horizonte de análisis, por lo que el VAN resulta negativo y la TIR prácticamente nula. En cambio, a partir del Escenario 2, el proyecto se vuelve económicamente rentable: el VAN se vuelve positivo, la TIR supera la tasa de descuento, y el periodo de recuperación disminuye a aproximadamente 7 años. La tendencia continúa mejorando en los escenarios superiores, alcanzando su mejor desempeño en el Escenario 4, donde la TIR supera el 20% y el Payback se reduce a cerca de 5 años. Esto confirma que el desempeño económico del sistema depende directamente de la cantidad de residuos orgánicos disponibles para su procesamiento, destacando la importancia de integrar a restaurantes, hogares y otros generadores en la operación de la planta.

En conclusión, el flujo de caja demuestra que el proyecto es económicamente viable en escenarios donde existe una adecuada disponibilidad de residuos, condición que además coincide con los mayores beneficios ambientales del sistema. Por ello, se recomienda incentivar la participación comunitaria y asegurar una cadena de recolección estable para maximizar la rentabilidad del proyecto.

Tabla 24: Indicadores económicos

<i>Parámetro</i>	<i>Escenario 1 (162 kg/mes)</i>	<i>Escenario 2 (219.6 kg/mes)</i>	<i>Escenario 3 (275.3 kg/mes)</i>	<i>Escenario 4 (331 Kg/mes)</i>
Ahorro mensual (CLP)	2,837,203	3,845,987	4,821,494	5,797,002

OPEX anual (CLP)	869,406.4	869,406.4	869,406.4	869,406.4
Beneficio neto anual (CLP)	1,967,796.8	2,976,580.2	3,952,087.7	4,927,595.2
VAN (6%, 10 años) (CLP)	-5,536,844	+1,887,889	+9,067,709	+16,247,530
TIR (IRR) aprox	-0.31%	7.95%	14.76%	20.94%
Payback (años, simple)	11 años	7 años	6 años	5 años

3.5.5 Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad del proyecto se realizó evaluando cómo se modifica la rentabilidad económica cuando varía la disponibilidad de sustrato, es decir, la cantidad de residuos orgánicos que ingresan al biodigestor. Se presentan cuatro escenarios de generación de biogás, cada uno asociado a una sustitución anual distinta de GLP. Estos escenarios representan la principal fuente de incertidumbre del proyecto, por lo que constituyen la base para el análisis de sensibilidad. En todos los casos, los costos de operación se mantienen constantes, ya que el documento establece que el OPEX anual está compuesto por el costo eléctrico, el mantenimiento y la amortización de equipos, los cuales no dependen del nivel de carga orgánica.

Los ingresos del proyecto corresponden al ahorro por sustitución de GLP. Estos valores varían significativamente entre escenarios: desde una reducción anual de 1944 *kg* de GLP en el Escenario 1, hasta 3972 *kg* en el Escenario 4.

Aplicando el precio de GLP utilizado en la memoria, el ahorro anual aumenta desde aproximadamente \$2.84 millones en el escenario de baja carga hasta \$5.80 millones en el escenario de máxima disponibilidad de residuos.

Como el OPEX anual permanece fijo en \$869,406, sumatoria de electricidad, mantenimiento e ítems de amortización, el flujo neto del proyecto depende casi exclusivamente del nivel de sustitución de GLP. Esto permite identificar rápidamente la sensibilidad del proyecto frente a esta variable crítica. En el Escenario 1, el flujo neto anual es de \$1.97 millones, lo que no permite recuperar la inversión inicial dentro de los primeros diez años. No obstante, a medida que aumenta la disponibilidad de sustrato, el flujo neto mejora considerablemente: en el Escenario 2 alcanza \$2.98 millones, en el Escenario 3 llega a \$3.95 millones, y en el Escenario 4 alcanza \$4.93 millones. Estos valores muestran que la viabilidad financiera del sistema es altamente sensible al nivel de residuos disponible, lo que coincide con la relevancia operativa de asegurar una cadena estable de recolección de sustratos para la planta.

El análisis permite concluir que, si bien el proyecto no resulta rentable bajo condiciones conservadoras de aporte de residuos, Escenario 1, se vuelve económicamente atractivo desde el Escenario 2 en adelante, mostrando un VAN positivo y periodos de recuperación entre cinco y siete años en los escenarios superiores. Esto indica que la sostenibilidad económica del sistema depende principalmente del involucramiento de los actores locales, pescadores, restaurantes y viviendas, en la entrega sistemática de sustrato. Por lo tanto, la recomendación principal es fortalecer los mecanismos logísticos y comunitarios que aseguren una carga orgánica estable, pues esta variable determina con mayor fuerza la sensibilidad económica del proyecto.

3.6 Análisis Ambiental

Para evaluar el impacto ambiental del proyecto en la caleta La Barra primero hay que caracterizar la zona.

3.6.1 Línea Base Ambiental

3.6.1.1 Medio Físico

El clima es templado costero, las temperaturas medias anuales en el entorno de Nueva Toltén son de aproximadamente de 10-16 °C. La humedad es relativamente alta y los vientos son predominantemente del suroeste. Esto favorece las condiciones de mezcla atmosférica, pero reduce la amplitud térmica.

Analizando el suelo, predominan suelos arenosos y franco-arenosos en la ribera y en la playa cercana, con buena infiltración, pero existe impacto por salinidad, se recomienda utilizar una base impermeable para digestores considerando una posible percolación.

Continuando con la hidrología, el proyecto se encuentra ubicado junto a la desembocadura del río Toltén, las mareas y dinámicas fluviales deben considerarse en trazados de zanjas y manejo de drenajes.

3.6.1.2 Medio Biótico

Existe una flora costera y pastizales malos. La fauna consiste en aves marinas y fauna asociada con las caletas. No existen registros públicos de especies protegidas en el núcleo urbano de la caleta, pero cualquier intervención en zonas dunarias deberá confirmar en terreno.

3.6.1.3 Medio Socioeconómico

En la caleta existe una población pequeña, con una economía ligada a la pesca artesanal, gastronomía y turismo local, por lo que existen emprendimientos turísticos y restaurantes. La comunidad es directamente beneficiaria de la gestión de residuos y la reducción de olores.

3.6.2 Identificación de aspectos e impactos ambientales

Primero se considera el impacto generado al preparar el terreno, el más relevante sería la remoción de vegetación superficial y alteración del suelo. En este proyecto las modificaciones son menores, pero es necesario estar atentos a la estabilidad de los suelos, controlar la erosión, en el caso que haya, y evitar la disposición inadecuada del material vegetal o escombros desechados.

En relación con el uso de materiales y a la construcción, el mayor riesgo se encuentra asociado al transporte y a la manipulación de los insumos, como PVC, cemento, estructuras metálicas o elementos prefabricados. Estos generan un impacto bajo, pero al acumularse pueden traducirse en un aumento de ruido, polvo y tránsito vehicular. Pero esta al ser una planta pequeña, no será de mayor problema.

Durante la operación del sistema, los impactos principalmente se relacionan con el consumo de recursos y la generación de residuos. El uso de agua debe ser gestionado de manera eficiente, incorporando medidas de ahorro y evitando pérdidas por fugas. Por otro lado, el proyecto, al incorporar energía solar se genera un impacto ambiental positivo, ya que se reduce la demanda sobre fuentes energéticas convencionales. Por otro lado, los residuos derivados del mantenimiento, como piezas de PVC dañadas, filtros o empaques, deben ser manejados adecuadamente para evitar contaminación del suelo.

Finalmente, en términos de seguridad ambiental y riesgos, este tipo de proyectos presenta una probabilidad baja de generar impactos severos. Sin embargo, siempre es mejor contar con un plan básico de manejo ambiental, el cual contemple el control de derrames accidentales, orden y limpieza de área de trabajo y protocolos de intervención ante contingencias menores. Así, el proyecto puede operar de manera sostenible, logrando que su relación con el entorno sea equilibrada y respetuosa.

3.6.3 Evaluación de Impactos

Los impactos negativos identificados para el proyecto corresponden principalmente a efectos asociados a la fase de construcción y a la operación rutinaria del sistema. Entre ellos destaca la alteración temporal del suelo, producto de excavaciones menores, movimiento de materiales y tránsito de personal. Esta intervención puede generar cambios puntuales en la estructura y compactación del terreno, aunque su alcance es reducido y de carácter reversible.

Durante la fase operativa, los principales riesgos se relacionan con la posible emisión de olores procedentes del biodigestor y con derrames localizados de agua o residuos semilíquidos en caso de fallas en las conexiones o manipulación inadecuada. No obstante, estos impactos se consideran de baja a media magnitud, dada la escala del proyecto y la naturaleza de los residuos involucrados. Además, su ocurrencia es controlable mediante la implementación adecuada de las medidas preventivas y de mitigación previamente

propuestas, tales como un diseño hermético del digestor, planes de mantención regular y protocolos de contingencia.

En contraste, los impactos positivos previstos poseen una mayor relevancia y duración en el tiempo. La instalación del sistema contribuye de manera directa a la reducción significativa de residuos orgánicos que, de no ser valorizados, podrían generar problemas sanitarios, malos olores o proliferación de vectores en la caleta.

La digestión anaerobia permite transformar esos residuos en biogás y digestato, lo que disminuye la carga orgánica liberada al ambiente y reduce la presencia de insectos y animales oportunistas, mejorando las condiciones higiénicas del sector. Finalmente, el uso del digestato como fertilizante aporta beneficios adicionales, tanto económicos como ambientales, al mejorar la calidad del suelo y evitar el uso de productos químicos. En conjunto, estos efectos generan un impacto positivo de alta magnitud y carácter permanente, favoreciendo directamente la calidad de vida y la sostenibilidad ambiental de la comunidad de Caleta La Barra

3.6.4 Medidas de Mitigación

Para el diseño y prevención se consideran varios puntos, empezando con el diseño de un biodigestor hermético, el cual esté totalmente sellado y con antirretorno. Contar con un almacenamiento temporal cerrado de los residuos entrantes y del digestato. Por último, canaletas y berreras físicas que eviten el escurrimiento hacia el río en caso de derrame.

Para la operación y manejo de la planta, se recomienda contar con un protocolo de recepción para así separar y retirar residuos no orgánicos. Además, es conveniente realizar una capacitación comunitaria, talleres para los pescadores y vecinos sobre separación de residuos y peligro de fugas.

Por último, se recomienda tener un plan de monitoreo, seguimiento de la posible generación de olores, de manera mensual y considerar reclamos de la comunidad. Inspección de las zanjales y drenajes luego de eventos de mareas extraordinarias o lluvias fuertes que puedan afectar a la planta. Realizar una revisión de anclajes y soportes de manera anual.

4 Conclusiones

El desarrollo del diseño e ingeniería de detalle de una planta de biodigestión anaerobia para la caleta La Barra permitió demostrar la viabilidad técnica, económica y ambiental de implementar un sistema comunitario de valorización de residuos orgánicos. A partir del diagnóstico inicial, se confirmó que los desechos generados por la actividad pesquera, principalmente vísceras de salmón y róbalo constituyen una carga ambiental significativa para el río Toltén, generando problemas sanitarios y deterioro del ecosistema.

La caracterización de los residuos permitió establecer cuatro escenarios de disponibilidad, con volúmenes anuales entre 9.3 y 44.5 toneladas, los cuales representan un potencial energético equivalente a 162–331 *kg* de GLP por mes y una producción sustancial de fertilizante orgánico líquido. Estos resultados confirmaron que los residuos de la caleta poseen un potencial energético suficiente para justificar la implementación de un sistema de biodigestión de pequeña escala.

El diseño del sistema condujo a una configuración óptima compuesta por dos digestores: un biodigestor tipo Cubo para el pretratamiento y homogenización del sustrato, y un biodigestor Pulmón Flexible que integra en una sola unidad la digestión y el almacenamiento de biogás, mejorando la eficiencia operativa y reduciendo los requerimientos de infraestructura. La incorporación de un sistema de calefacción basado en colectores solares y un termo diseñado específicamente para biogás aseguró condiciones mesofílicas estables, aumentando la robustez del proceso frente a las variaciones ambientales de la zona costera.

El análisis económico evidenció que, con una inversión inicial de \$20,020,000 y un costo operativo anual de \$869,406, el proyecto es económicamente viable. Los flujos de caja calculados a diez años demuestran beneficios netos positivos desde el primer año de operación gracias a los ahorros por sustitución de GLP, lo que refuerza el potencial del sistema como alternativa energética local.

Finalmente, la evaluación ambiental confirmó que la implementación del biodigestor contribuirá significativamente a reducir los impactos negativos actuales, como malos olores, proliferación de vectores y descarga de materia orgánica al río. Además, el digestato generado representa un beneficio complementario como fertilizante, promoviendo prácticas sostenibles en la comunidad. Las medidas de mitigación y monitoreo propuestas aseguran una operación segura y compatible con el entorno.

En conjunto, los resultados del estudio demuestran que la planta de biodigestión propuesta es una solución integral, sostenible y replicable, capaz de mejorar la gestión de residuos de la caleta La Barra, reducir impactos ambientales y proporcionar una fuente de energía renovable para la comunidad.

Referencias

- [1] “Implementación de la Ley de Caletas logra un importante hito al llegar a las 50 caletas con el convenio de uso firmado – sernapesca”. Accedido: 30 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.sernapesca.cl/noticias/implementacion-de-la-ley-de-caletas-logra-un-importante-hito-al-llegar-a-las-50-caletas-con-el-convenio-de-uso-firmado/?utm_source=chatgpt.com
- [2] “Acceso comunitario a Internet en Caleta La Barra: solución para una nueva necesidad básica. - Trabajo Vivo”. Accedido: 30 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: https://trabajovivo.cl/blog/acceso-comunitario-a-internet-en-caleta-la-barra-solucion-para-una-nueva-necesidad-basica/?utm_source=chatgpt.com
- [3] L. Appels, J. Baeyens, J. Degreève, y R. Dewil, “Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge”, *Prog Energy Combust Sci*, vol. 34, n° 6, pp. 755–781, dic. 2008, doi: 10.1016/J.PECS.2008.06.002.
- [4] L. T. B. S. T. P. P. H. M. G. Van Dinh Pham Fujiwara Takeshi, “A review of anaerobic digestion systems for biodegradable waste: Configurations, operating parameters, and current trends”, *Environmental Engineering Research*, vol. 25, n° 1, pp. 1–17, 2020, doi: 10.4491/eer.2018.334.
- [5] J. Vasco-Correa, S. Khanal, A. Manandhar, y A. Shah, “Anaerobic digestion for bioenergy production: Global status, environmental and techno-economic implications, and government policies”, *Bioresour Technol*, vol. 247, pp. 1015–1026, ene. 2018, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2017.09.004.
- [6] M. C. Gould, “Bioenergy and Anaerobic Digestion”, *Bioenergy*, pp. 297–317, ene. 2015, doi: 10.1016/B978-0-12-407909-0.00018-3.
- [7] U. Choe, A. M. Mustafa, H. Lin, J. Xu, y K. Sheng, “Effect of bamboo hydrochar on anaerobic digestion of fish processing waste for biogas production”, *Bioresour Technol*, vol. 283, pp. 340–349, jul. 2019, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2019.03.084.
- [8] H. Ingabire, M. M. M’arimi, K. H. Kiriamiti, y B. Ntambara, “Optimization of biogas production from anaerobic co-digestion of fish waste and water hyacinth”, *Biotechnology for Biofuels and Bioproducts*, vol. 16, n° 1, pp. 1–8, dic. 2023, doi: 10.1186/S13068-023-02360-W/FIGURES/10.
- [9] N. N. Kébé *et al.*, “Anaerobic Co-Digestion of Fish Processing Waste with Cow Manure and Waste of Market (Rests of Fruits and Vegetables): A Lab Scale Batch Test”, *J Sustain Bioenergy Syst*, vol. 11, n° 1, pp. 45–59, feb. 2021, doi: 10.4236/JSBS.2021.111004.
- [10] C. P. Ariza, ; Luis, A. Rueda Toncel, ; Jainer, y S. Blanchar, “HOME Revista ESPACIOS! Biodigestión anaerobia como alternativa energética para reducir el consumo de leña en las zonas rurales Anaerobic biodigestion as an energy alternative to reduce the consumption of firewood in rural areas Contenido”.

- [11] I. C. García, "Biodigestor doméstico para comunidades rurales y urbanas", *Ciencia y Filosofía*, pp. 31–46, jun. 2022, doi: 10.38128/CIENCIAFYFILOSOFA.V7I7.44.
- [12] "Potencial de biodigestores para el tratamiento de efluentes orgánicos en el ámbito rural | Revista de la Sociedad Científica del Paraguay". Accedido: 31 de agosto de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://sociedadcientifica.org.py/ojs/index.php/rscpy/article/view/32>
- [13] J. Fan *et al.*, "Prediction of the effect of fine grit on the MLVSS/MLSS ratio of activated sludge", *Bioresour Technol*, vol. 190, pp. 51–56, ago. 2015, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2015.04.035.
- [14] T. Sayara y A. Sánchez, "A Review on Anaerobic Digestion of Lignocellulosic Wastes: Pretreatments and Operational Conditions", *Applied Sciences 2019*, Vol. 9, Page 4655, vol. 9, n° 21, p. 4655, nov. 2019, doi: 10.3390/APP9214655.
- [15] I. Budiman, "The Role of Fixed-Dome and Floating Drum Biogas Digester for Energy Security in Indonesia", *Indonesian Journal of Energy*, vol. 3, n° 2, pp. 83–93, ago. 2020, doi: 10.33116/IJE.V3I2.88.
- [16] O. Yenigün y B. Demirel, "Ammonia inhibition in anaerobic digestion: A review", *Process Biochemistry*, vol. 48, n° 5–6, pp. 901–911, may 2013, doi: 10.1016/J.PROCBIO.2013.04.012.
- [17] "ESTRATEGIA NACIONAL DE RESIDUOS ORGÁNICOS CHILE 2040".
- [18] E. Por Black, "Designado por la Agencia Alemana de Cooperación Internacional GmbH Cooperation (GIZ)", Accedido: 20 de septiembre de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.pxfuel.com/es>

Anexo 1: Planos del biodigestor cubo

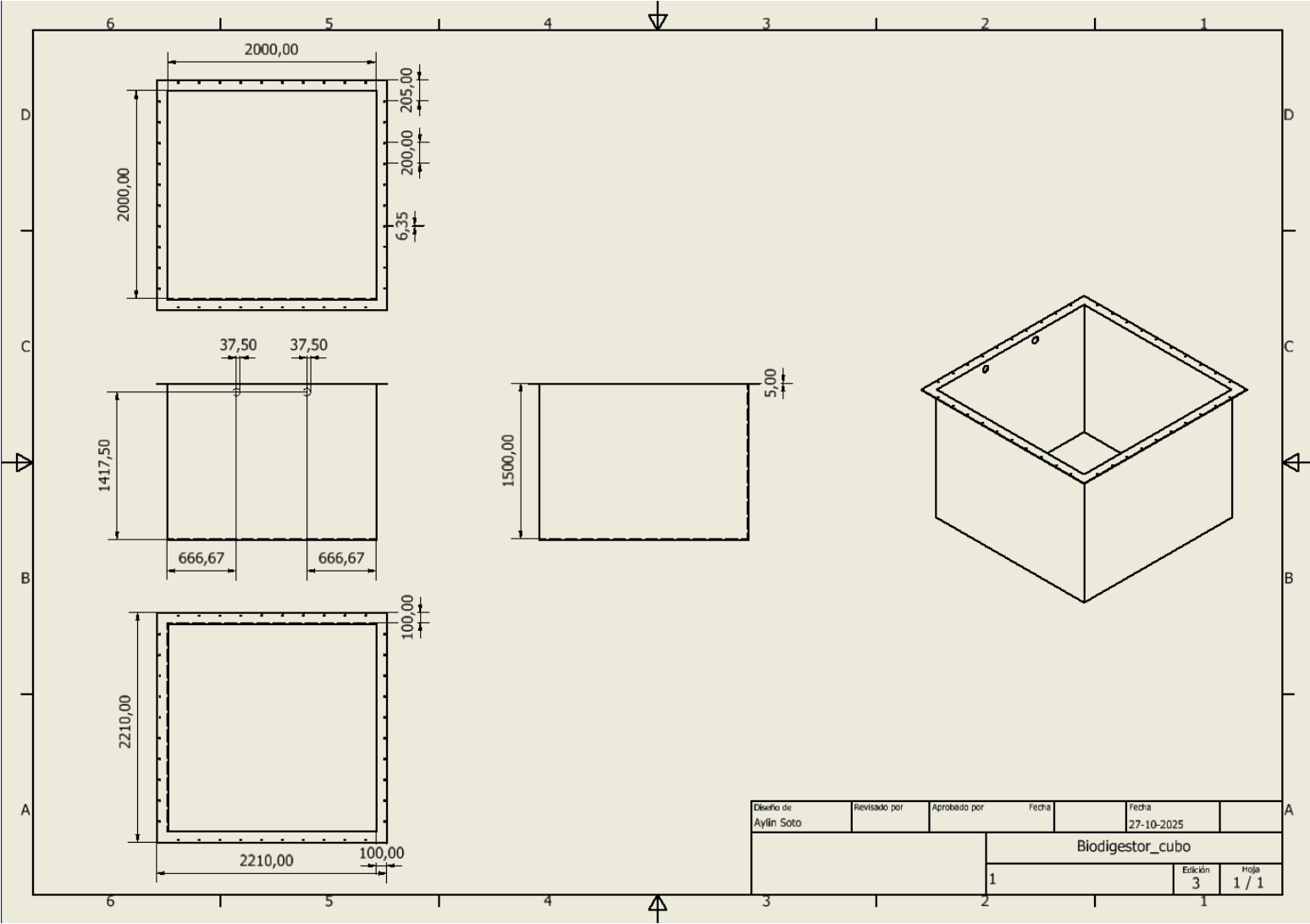


Figura 12: Estructura del biodigestor cubo

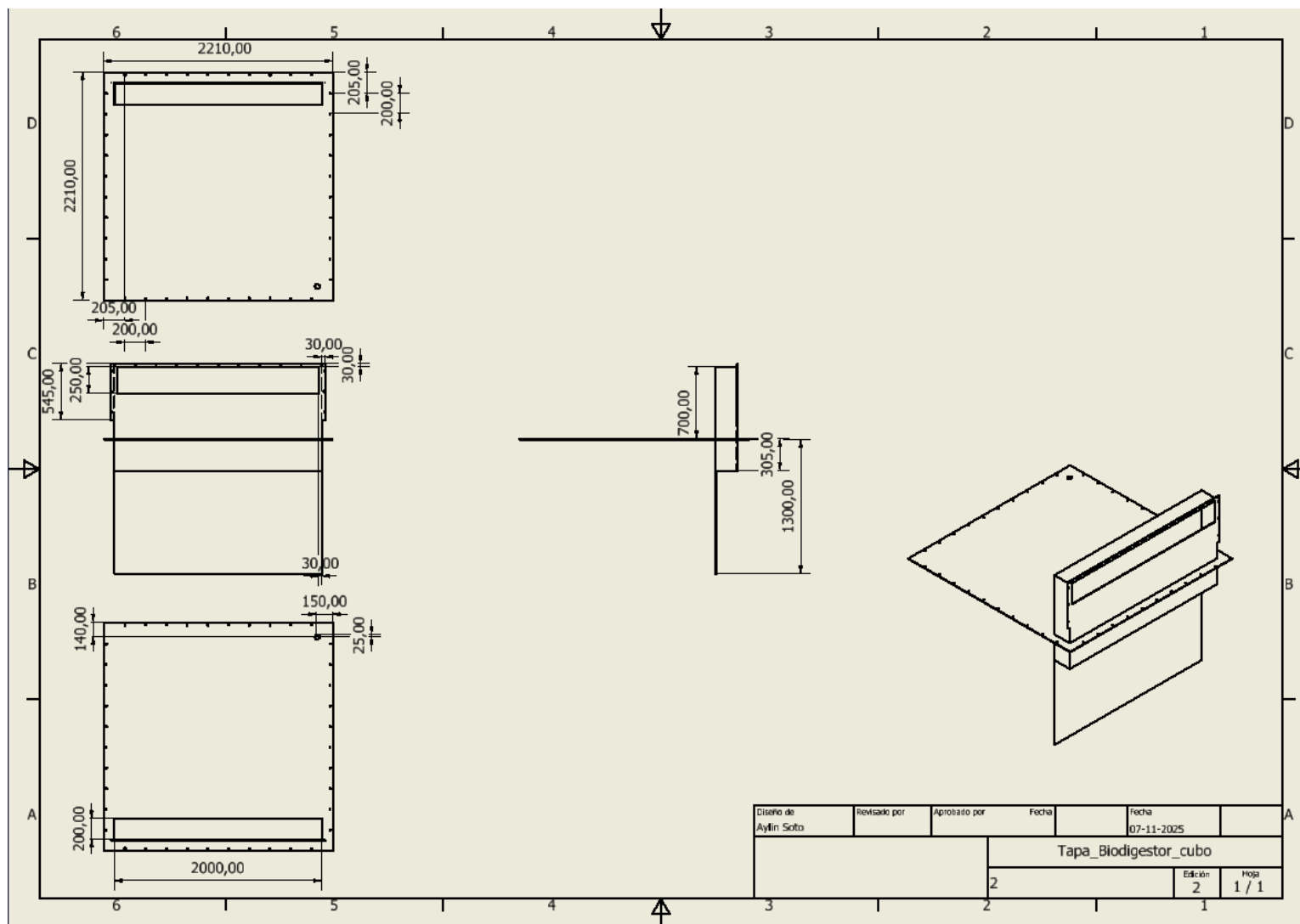


Figura 13: Tapa del biodigestor cubo

Anexo 2: Balance de masa y energía

			C.1			C.2		C.3							C.4			C.5			C.6			C.7			C.8			
Entradas			Sustrato			Agua Dilución		Mezcla entrada		Dig. Cubo		Dig. Pulmón			Gasómetro			Calor Calefacción			Filtro Carbono			Condensado Biogás			Digestato			
Factor de Dilución	1.25					Agua		Mezcla entrada			TRH			TRH			Caudal Biogás		Pérdida temp. D Cubo		3	° C / día								
Caudal total / batch	18	ton / Batch	18	ton / Batch		22.5	m3 / Batch	40.5	m3 / Batch		1	Batch	0	1	Batch		18	Nm3 / Batch		14,400,000	Cal / día									
Batch / mes	6		3	ton / mes	Opción A	3.75	m3 / mes	6.75	m3 / mes		21.3	días	0	96	días	Opción A	0.67	Nm3 / hora		16.7	Kw / día	Opción A	2.8	kg / mes	Opción A	576	cc / día	Opción A	6.75	m3 / mes
Batch / mes	8		2.25	ton / mes	Opción B	2.813	m3 / mes	5.063	m3 / mes		28.4	días	0	128	días	Opción B	0.5	Nm3 / hora		3.4	m3BG / día	Opción B	2.1	kg / mes	Opción B	432	cc / día	Opción B	5.0625	m3 / mes
Días / mes	30																													
Potencial metanogénico del sustrato	80	N-m3 CH4 / ton															Potencia térmica		Calefacción sustrato y agua		21	° C / día								
CH4 en Biogás	50%	%															6.6	Kw	Opción A		4,725,000	Cal / día								
H2S ppm	3000	ppm															4.95	Kw	3		5.5	Kw / día								
Kwh / N-m3 CH4	9.9	kWh/Nm3 CH4																	ton / mes		1.1	m3BG / día								
Temp. sustrato °C	14	°C															Tiempo llenado													
Temp. agua dil °C	14	°C															40.50	horas												
kw / cal	860421																53.99	horas	Calefacción sustrato y agua		21	° C / día								
Temp. operación °C	35	°C																	Opción B		3,543,750	Cal / día								
CH4 PCI	9.94	kWh/Nm3 CH4																	2.25		4.1	Kw / día								
Eficiencia térmica	75%	%																	ton / mes		0.8	m3BG / día								
Saturación de agua en biogás a 35°C	40	gr / m3 Biogás																												
											Largo	2	m	Largo	6	m	Largo	5.5	m	Opción A		4.5	m3BG / día							
											Ancho	2	m	Ancho	3	m	Díametro	2.5	m	6.9%		107.3	m3BG / mes							
											Alto	1.5	m	Alto	1.3	m				Opción B		4.2	m3BG / día							
											Volumen	4.8	m3	Volumen	21.6	m3	Volumen	27.0	m3	6.9%		100.7	m3BG / mes							

Figura 14: Excel balance de masa y energía