

Proyecto Final Integrador

Ingeniería Ambiental

“Estudio de prefactibilidad de la instalación de un biodigestor anaeróbico para la codigestión de purín de cerdo y nopal (*Opuntia ficus-indica*) en el departamento de Rosario Vera Peñaloza, La Rioja”

Autor: Franco David Barrionuevo

Legajo: CYT-8999

Tutor: Ing. Víctor Ismael Goicoa

Cotutora: Inga. Ruth Alejandra Rodríguez

Año: 2025

Agradecimientos

A la UNSAM por ser un hogar

A la Universidad Pública por permitirme torcer mi destino

A mis docentes y tutores de la ECyT y el 3IA quienes, con desinterés, me han transmitido su amor por la ciencia

A mis compañeros y compañeras del INTI por las risas compartidas, y por formarme estos últimos años

A mis tutores, Ruth y Víctor, por guiarme en este último tramo

A mi madre, quien me enseñó a enternecerme ante lo frágil

Resumen

El presente Proyecto Final Integrador tiene como objetivo evaluar la prefactibilidad técnica de la instalación de una planta de biogás en el predio de la empresa Granja Chepes, ubicado en la localidad homónima, en la provincia de La Rioja. La planta tratará diariamente el purín generado por 13.320 porcinos, en codigestión con cladodios de nopal (*Opuntia ficus-indica*), previamente procesados mecánicamente. Su construcción permitirá resolver el problema de la gestión del purín en el establecimiento, del cual sólo una fracción es destinada para uso agrícola.

La evaluación de prefactibilidad se centró en un enfoque técnico, habiendo definido la viabilidad del proyecto bajo tres criterios. En primer lugar, la planta debe tener la capacidad de tratar la totalidad del purín generado diariamente. En segundo lugar, el balance de energía térmica del biodigestor debe ser positivo, evitando el consumo adicional de biogás para calefacción. Como resultado, tras descontar los consumos internos, se obtendrá un excedente de energía eléctrica para su inyección y venta en la red de distribución. Por último, el área de cultivo de nopal requerida no debe superar la superficie disponible en el predio de la granja.

El desarrollo del proyecto involucró la realización de ensayos de laboratorio con el fin de determinar parámetros fisicoquímicos del purín de cerdo y el nopal, así como su potencial bioquímico metanogénico tanto por separado como en codigestión. A partir de los datos experimentales y, bajo criterios de diseño teórico, se llevó a cabo el análisis del balance de energía térmica para todas las posibles dimensiones del biodigestor definidos por la proporción de los sustratos a codigerir. Como resultado, se determinó que la relación óptima de codigestión es 0,365, lo que implica que, por cada tonelada de sustrato, 365 kg corresponden a cladodios de nopal y los 635 kg restantes a purín.

Definida la relación de codigestión para el diseño de la planta, se dimensionaron las unidades y se seleccionaron los equipos mecánicos y electromecánicos necesarios. Adicionalmente, se elaboraron los planos de ingeniería básica correspondientes. Finalmente, se realizó un análisis de viabilidad económica con el objetivo de evaluar preliminarmente el proyecto bajo este aspecto.

Índice

Capítulo 1. Introducción	6
1.1. Caso de estudio	6
1.2. Objetivos	9
1.2.1. Objetivo general	9
1.2.2. Objetivos específicos	9
Capítulo 2. Diagnóstico de situación	11
2.1. Área de estudio: Departamento de Rosario Vera Peñaloza, Pcia. de La Rioja.	11
2.2. Cadenas de valor en La Rioja	12
2.3. Criaderos porcinos en Argentina, generación de residuos y su impacto ambiental	14
2.3.1. Ciclo productivo de porcinos	14
2.3.2. Generación de residuos e impacto ambiental en granjas porcinas	16
2.4. Producción de biogás a partir de biomasa vegetal	22
2.4.1. Producción de biogás a partir de biocombustibles	22
2.4.2. Aprovechamiento bioenergético del cactus Opuntia ficus-indica	25
Capítulo 3. Marco Legal	30
3.1. Normativa a nivel nacional	30
3.2. Normativa a nivel provincial	33
3.3. Higiene y seguridad	37
Capítulo 4. Biodigestión anaeróbica	38
4.1. Introducción	38
4.2. Microbiología	38
4.3. Condiciones ambientales	40
4.3.1. Condiciones redox	40
4.3.2. pH, AGVs y bicarbonatos	40
4.3.3. Nutrientes, elementos traza e inhibidores	41
4.3.4. Temperatura	41
4.4. Producción de gas	42
4.5. Tipos de biodigestores	43
4.5.1. Biodigestores batch	43
4.5.2. Biodigestores semicontinuos y continuos	44
4.6. Productos de la biodigestión anaeróbica	47
4.6.1. Biogás	47
4.6.2. Digerido	51
Capítulo 5. Ensayo de Potencial Bioquímico Metanogénico	53
5.1. Introducción	53
5.2. Ensayo de Potencial Bioquímico Metanogénico	53
5.2.1. Metodologías de medición del biogás	54
5.2.2. Metodologías de medición del metano	56
5.2.3. Inóculo	57
5.2.4. Sustrato	59
5.2.5. Condiciones experimentales	62

5.2.6. Cálculos	66
5.2.7. Evaluación cualitativa	68
5.3. Ensayos de laboratorio	69
5.3.1. Desarrollo experimental	70
5.3.2. Resultados	75
Capítulo 6. Elección de la relación de codigestion óptima	79
6.1. Introducción	79
6.2. Cálculo de generación de sustratos	82
6.2.1. Generación de purín de cerdo	82
6.2.2. Cálculo del nopal (<i>Opuntia ficus-indica</i>) a adicionar	83
6.2.3. Cálculo del sustrato de codigestión	85
6.3. Cálculo de la generación de biogás	86
6.4. Cálculo de la generación de energía	89
6.5. Dimensionamiento del biodigestor	91
6.6. Consumo de energía calorífica	93
6.6.1. Cálculo de la energía calorífica para calentamiento del sustrato de codigestión	93
6.6.2. Cálculo de las pérdidas de calor en el biodigestor	95
6.7. Balance de energía calorífica total de la planta	102
6.8. Elección de la relación de codigestión	104
6.9. Resumen parámetros para diseño de la planta	107
Capítulo 7. Memoria descriptiva	108
Capítulo 8. Memoria de cálculo	113
8.1. Parámetros iniciales de diseño	113
8.2. Tratamiento mecánico del nopal	113
8.3. Tanque de mezcla y homogeneización	115
8.3.1. Dimensionamiento del tanque de mezcla	115
8.3.2. Sistema de mezcla	117
8.4 Biodigestor	119
8.4.1. Dimensionamiento del biodigestor	119
8.4.2. Sistema de mezcla	121
8.4.3. Aislamiento de la unidad	124
8.4.4. Gasómetro	126
8.5. Equipo cogenerador y generación de energía	127
8.6. Intercambiador de calor	130
8.6.1. Introducción a los intercambiadores de calor	130
8.6.3. Calor a transferir a la mezcla inóculo-sustrato	132
8.6.4. Dimensionamiento del equipo de IC	139
8.7. Tratamiento y almacenamiento del biogás	150
8.7.1. Desulfuración	151
8.7.2. Deshumidificador	157
8.7.3. Antorcha de biogás	158
8.8. Tratamiento y almacenamiento del digerido	159
8.8.1. Producción y caracterización del digerido	160
8.8.2. Pozo de bombeo	161

8.8.3. Separación de fracciones del digerido	164
8.8.4. Almacenamiento y destino de la fracción líquida	166
8.8.5. Almacenamiento de la fracción sólida	171
8.9. Líneas de conducción	172
8.9.1. Selección y dimensionamiento de las cañerías	175
8.9.2. Cálculo de altura manométrica (líquidos y semisólidos)	179
8.9.3. Sistema de bombeo	182
8.10. Balance energético total de la planta	185
8.10.1. Balance de energía calorífica	186
8.10.2. Balance de energía eléctrica	186
Capítulo 9. Análisis económico	189
9.1. Introducción	189
9.2. Inversión inicial	189
9.3. Gastos fijos	192
9.4. Ingresos	194
9.5. Viabilidad económica del proyecto: VAN y TIR	196
9.5.1. Análisis de escenarios por VAN	197
9.5.2. Análisis de escenarios por TIR	199
Capítulo 10. Planos	201
Capítulo 11. Conclusiones	202
Bibliografía	203
Anexos	207

Capítulo 1. Introducción

1.1. Caso de estudio

La empresa Granja Chepes es una iniciativa privada radicada en el año 2017 en las afueras de la ciudad de Chepes, departamento de Rosario Vera Peñaloza, provincia de La Rioja. La firma tiene su origen en el marco de un impulso de la provincia para el desarrollo de actividades productivas existentes y el aumento de su eficiencia con el fin de mejorar la matriz productiva y generar empleo. Granja Chepes abarca todos los eslabones de la cadena de producción porcina: reproducción, cría, engorde, faena y comercialización.



Figura 1.1. Logo de Granja Chepes. Elaboración propia

La granja de la empresa se encuentra ubicada a la altura del km 65 de la Ruta Nacional 141 (-31.379, -66.919) (ver figura 1.2) a 32 km del centro de Chepes. En total se encuentran construidas 11 naves dentro de un predio que ocupa alrededor de 400 ha. En las naves se desarrollan las etapas de reproducción, cría y engorde de un total de 13.320 animales entre cerdas, lechones y machos. Una vez que los cerdos alcanzan el peso y edad óptimos son comercializados vivos a mataderos para su faena en Córdoba, San Luis y San Juan. Una fracción es destinada al frigorífico de la empresa para la comercialización de cortes de carne de cerdo dentro de la provincia.

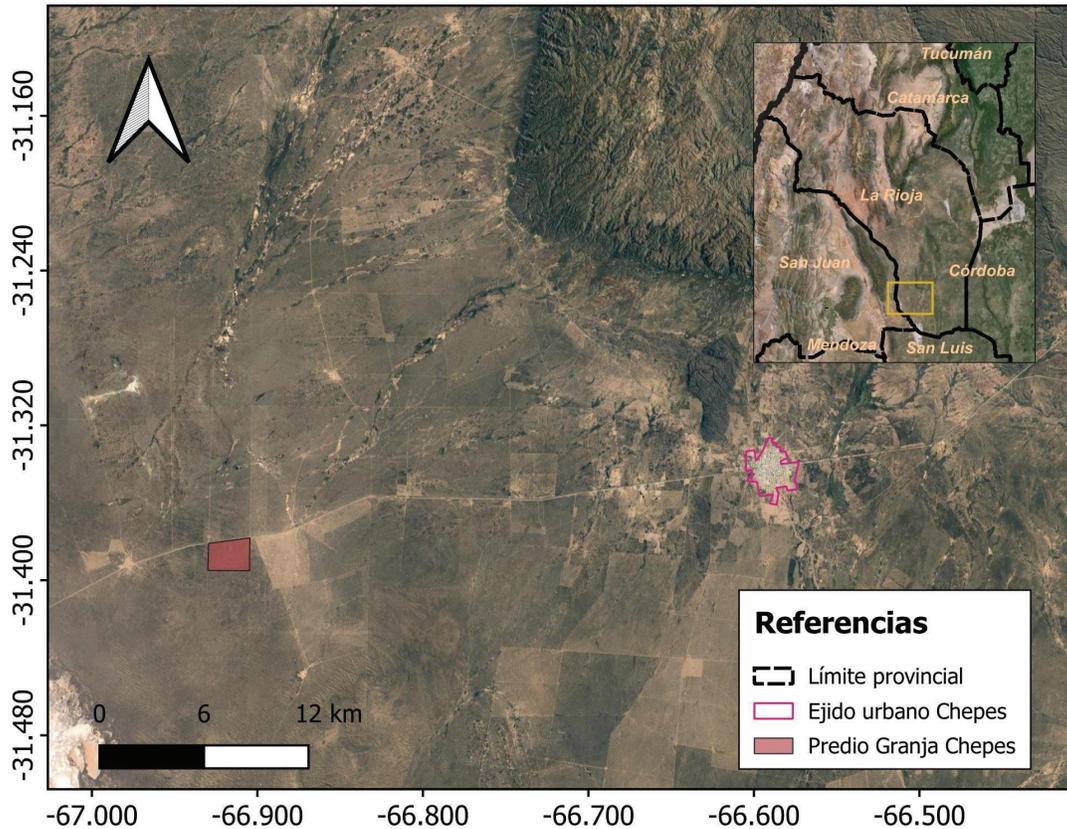


Figura 1.2. Ubicación del predio de Granja Chepes. Elaboración propia

El ciclo productivo de cada animal abarca un total de 283 días, tiempo durante el cual se suceden las etapas de gestación, maternidad y engorde. Como consecuencia de la cría de los porcinos, ocurre la generación del purín de cerdo (ver figura 1.3). Este es una mezcla de las excretas y orina de los animales, el agua de lavado de los pisos de las naves, y restos de alimento. En el establecimiento se estima una generación de entre 1,4 y 21,5 toneladas por día de purín según el tipo y estadio del porcino (Millares, s.f. y Maisonnave, s.f.).

A medida que se generan, las excretas y restos de agua y alimento, percolan mediante un sistema de piso emparrillado o *slat* hacia fosas de almacenamiento. Dichas fosas son periódicamente vaciadas, conduciendo el purín hacia pozos estercoleros o lagunas de almacenamiento. Actualmente, del total de purín generado sólo una fracción es aprovechada por productores locales para su uso como fertilizante. La mayor parte no tiene un destino, de modo que se acumula en nuevas lagunas que se van construyendo, representando un grave problema ambiental en la zona.

Adoptando la visión de economía circular, Granja Chepes ha estado evaluando alternativas para el tratamiento y valorización del purín, siendo una de ellas el tratamiento anaeróbico con la consecuente generación de biogás para producción energética. Con el fin de optimizar el proceso y potenciar la generación de biogás, además se ha considerado la posibilidad codigerir el purín con cladodios de nopal (*Opuntia ficus-indica*), planta que es capaz de adaptarse a climas áridos y semiáridos.

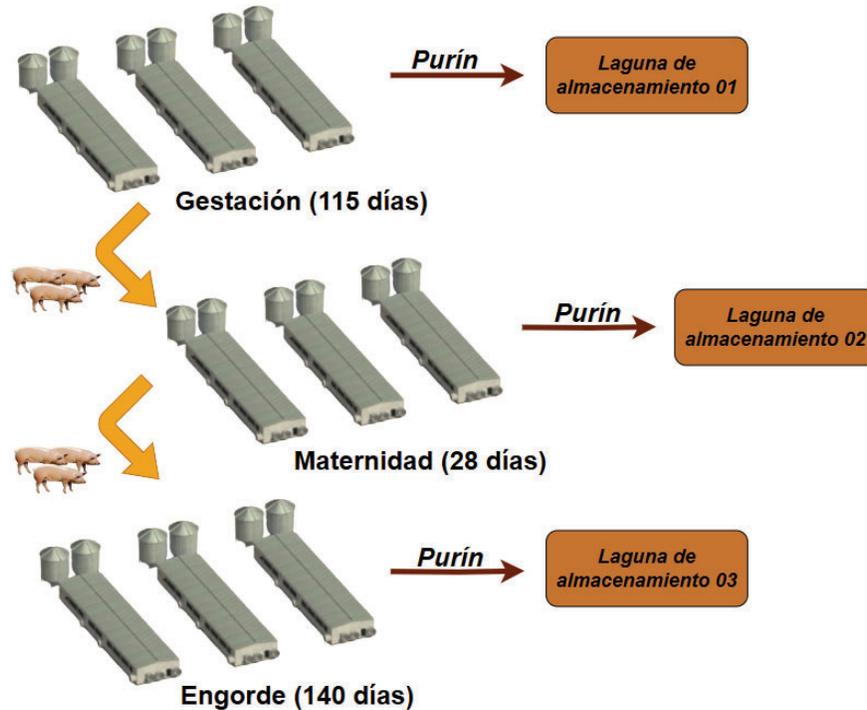


Figura 1.3. Ciclo productivo de la cría de cerdos y generación de purín en el establecimiento de Granja Chepes. Elaboración propia

El proyecto de instalación de una planta de biogás para el tratamiento del purín en codigestión con cladodios nopal y generación de energía cuenta con respaldo normativo en La Rioja, principalmente a través de tres leyes. Una de ellas, es la ley provincial 8.190 de adhesión a la ley nacional 26.093 del "Régimen de regulación y promoción para la producción y uso sustentables de biocombustibles". La segunda, es la ley provincial 9.818 de adhesión a la ley nacional 26.190 del "Régimen de fomento nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica". La tercera, es la ley provincial 10.150 de adhesión a la ley nacional 27.42426.190 del "Régimen de fomento a la generación distribuida de energía renovable integrada a la red eléctrica pública"

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

El proyecto final integrador tiene como objetivo realizar un análisis de prefactibilidad técnica de la instalación de una planta de biogás, cuyo biodigestor será alimentado con una mezcla formada por purín de cerdo y cladodios de nopal (*Opuntia ficus-indica*). Para decidir sobre la viabilidad técnica de la planta a diseñar, se han definido tres criterios. El primero es que tenga la capacidad para tratar el total del purín generado de forma diaria. El segundo, que el balance de energía térmica del biodigestor sea positivo. Por último, que el área de cultivo de nopal requerida no supere la superficie disponible. La proporción o relación entre los sustratos a codigerir para el diseño de la planta, va a estar determinada por aquella que permita que se cumplan con los criterios mencionados.

1.2.2. Objetivos específicos

- a) Relevar bibliográficamente el contexto socioproductivo actual de la provincia de La Rioja, el proceso productivo de la cría de porcinos y la generación de biogás a partir de purín de cerdo y biomasa vegetal.
- b) Obtener datos experimentales de parámetros fisicoquímicos y el potencial bioquímico metanogénico (PBM) del purín de cerdo y de cladodios de nopal (*Opuntia ficus-indica*).
- c) Realizar un análisis teórico de las posibles proporciones de codigestión entre el purín y los cladodios de nopal, y hallar aquella que garantice la viabilidad técnica de la planta.
- d) Realizar el diseño de ingeniería básica de la planta de biogás a partir de la relación de codigestión hallada y, por ende, de los caudales de sustrato a tratar.
- e) Evaluar de forma preliminar la viabilidad económica del proyecto.

Capítulo 2. Diagnóstico de situación

2.1. Área de estudio: Departamento de Rosario Vera Peñaloza, Pcia. de La Rioja.

El departamento de Rosario Vera Peñaloza (RVP), se encuentra ubicado en la zona suroeste de la provincia de La Rioja. Esta zona se halla en lo que se conoce como Llanos del Sur, que a la vez se encuentra inserto en la Región Sur del Chaco Árido Sudamericano. Al norte limita con el Departamento de Juan Facundo Quiroga, al oeste con la Provincia de San Juan, al sur y al este con el Departamento San Martín, y al noreste con el Departamento de General Ocampo. La ciudad de Chepes es la cabecera del departamento y se encuentra a 242 km de la ciudad Capital de provincia (ver figura 2.1).

El departamento de RVP posee una población de 15783 (Instituto Nacional de Estadísticas y Censos [INDEC], 2023) distribuidos en una superficie de 16114 km², lo que da una densidad de alrededor de 1 hab/km². Los habitantes se reparten de forma que el mayor porcentaje se halla en la zona urbana (73%) y el resto la zona rural (27%) (Gobierno Municipal de Rosario Vera Peñaloza [GMRVP], 2015).

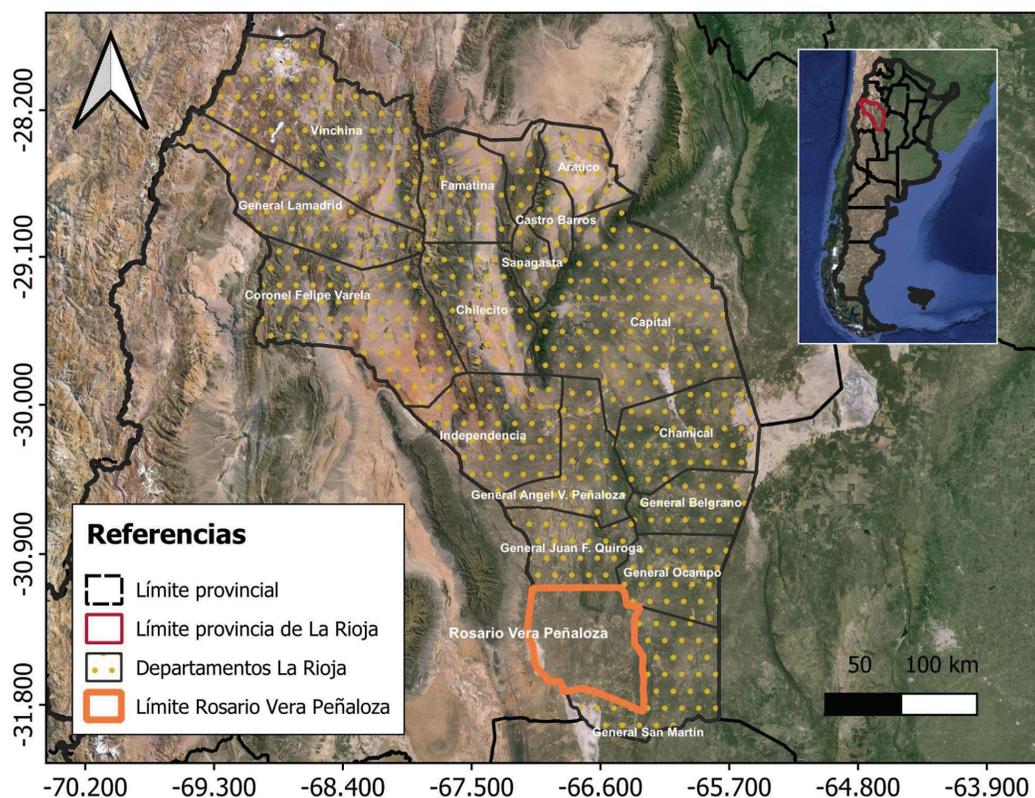


Figura 2.1. Ubicación geográfica Dpto. de Rosario Vera Peñaloza, Provincia de La Rioja. Elaboración propia a partir de capas IGN.

La región en donde está ubicado el departamento de RVP está caracterizado por ser una planicie ligeramente ondulada a 350 m de altitud. El clima es árido y las precipitaciones anuales son escasas con alrededor de 300-350 mm/año, concentrándose durante los meses de diciembre a febrero. El resto de los meses predomina la sequía.

Ante la escasez de agua, tanto de precipitaciones como a nivel subterráneo, la producción de la zona está casi exclusivamente dedicada a la ganadería. Esta situación acrecienta una de las principales problemáticas de la región relacionada a la degradación física por el deterioro de sus recursos naturales, disminución de la capacidad productiva, lo que finalmente conlleva a una menor calidad de vida de la población (GMRVP, 2015).

2.2. Cadenas de valor en La Rioja

El perfil productivo de la provincia de La Rioja se encuentra definido, entre otros factores, por la configuración geográfica y climática, y la consecuente disponibilidad de recursos. En las montañas se halla gran parte de los recursos de la provincia: minerales, recursos hidrocarburíferos y valles que son ideales para la agricultura de tipo oasis. En los llanos y sierras de la provincia, se desarrolla la producción de ganado, mientras que las condiciones de irradiación solar son propicias para el desarrollo de la energía solar y generan condiciones para el cultivo de cannabis con fines medicinales y producción de miel. Adicionalmente, el escenario natural de La Rioja constituye un entorno propicio para el desarrollo del turismo (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2021).

El desarrollo agropecuario de la provincia se encuentra limitado por la falta de agua y la aridez. Junto con Catamarca y San Juan, La Rioja se ubica en la región más seca del país, denominada la “diagonal árida”, que se extiende hacia el sudeste y la zona central de la Patagonia. La actividad agrícola-ganadera se encuentra circunscrita a las regiones del Río Salado, del Valle del Bermejo y del Valle Antinaco-Los Colorados debido a su disponibilidad de fuentes de aguas superficiales y subterráneas.

El desarrollo de las actividades productivas de la provincia tiene como otro de sus desafíos los costos energéticos. La energía eléctrica, que es la principal fuente de energía debido al escaso desarrollo de otras componentes de la matriz como el gas, tiene un costo elevado. La Rioja tiene una necesidad de minimizar el efecto de este factor mediante la diversificación de su matriz aprovechando potencialidades naturales y capacidades existentes. La producción de energía eólica en el Parque Arauco y de energía solar constituyen un avance en este sentido (CEPAL, 2021).

En este contexto de abundancia de algunos recursos y escasez de otros, la provincia de La Rioja tiene por delante el reto de avanzar en el mayor desarrollo y transformación de su sistema productivo con el fin de reducir la brecha que la separa de otras regiones del país. En este sentido, a modo de diagnóstico, la CEPAL (2021) ha identificado tres estrategias a aplicar sobre una serie de actividades productivas: *aumento de la eficiencia productiva de las actividades existentes*, *diversificación relacionada mediante la creación de nuevos eslabonamientos* y *la diversificación no relacionada mediante el impulso de nuevas actividades* (ver figura 2.1).



Figura 2.1. Estrategias para el desarrollo productivo en la Provincia de La Rioja. Obtenido de CEPAL (2021)

Uno de los rubros dentro de las actividades que presenta oportunidades de diversificación relacionada es la producción de carne porcina. La diversificación de este rubro que ya se encuentra consolidado en la provincia, tiene como fin aumentar su valor agregado, así como penetrar y consolidar sus productos dentro de mercados internos y externos. En este sentido, La Rioja se posiciona como la octava provincia productora de carne porcina del país. En 2019 se registró una producción de alrededor de 90.000 cabezas, de las cuales 29.000 fueron faenadas. Al interior de la provincia destaca la localidad de Chepes, en el departamento de Rosario Vera Peñaloza (ver figura 2.2), en la cual se encuentra la planta de la empresa Cerdos de los Llanos SAPEM que produce alrededor de 8 millones de kilos carne al año y emplea alrededor de 70 familias en forma directa. Esta localidad es estratégica debido a su cercanía a áreas productivas de maíz y soja (CEPAL, 2021).

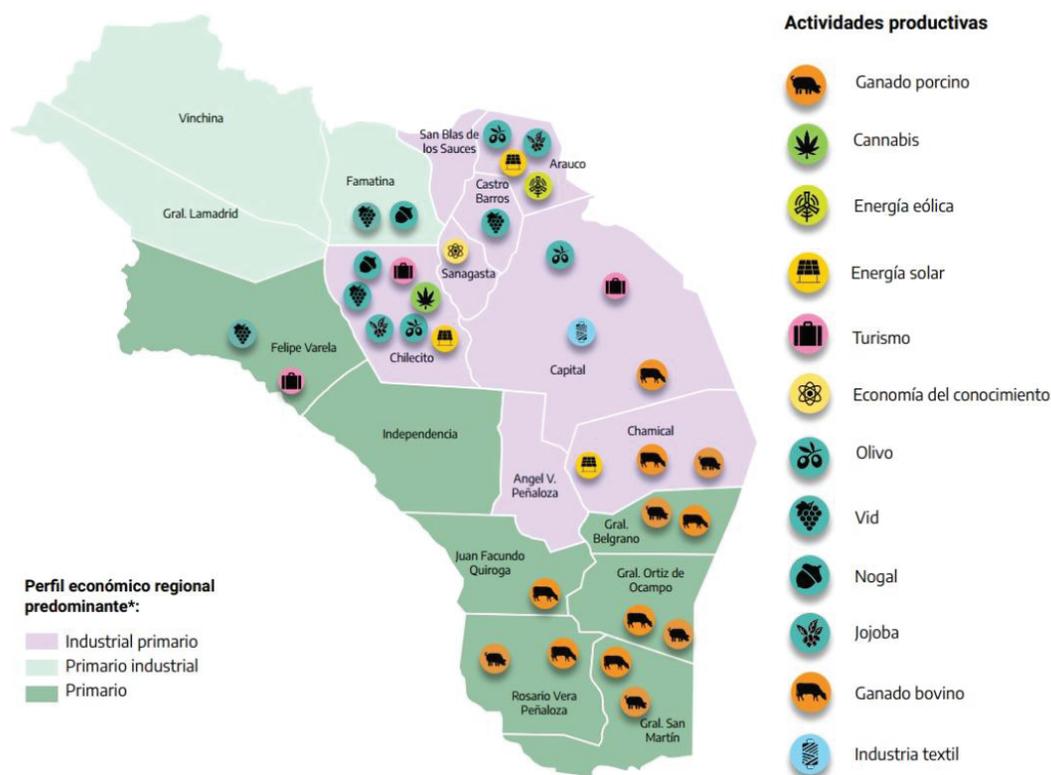


Figura 2.2. Perfil productivo de la Provincia de La Rioja. Obtenido de Subsecretaría de Políticas para el Desarrollo con Equidad Regional (s.f.)

2.3. Criaderos porcinos en Argentina, generación de residuos y su impacto ambiental

2.3.1. Ciclo productivo de porcinos

Las granjas de cría de ganado porcino tienen como fin la cría de cerdos con destino al matadero para obtener carne para ser consumida ya sea en forma fresca o transformada en productos cárnicos (jamones, salchichones, etc). El ciclo de producción de porcinos se desarrolla en dos líneas que funcionan de forma paralela. Una de ellas es la correspondiente a la producción de lechones destetados o ciclo de las madres, mientras que la otra al engorde de los cerdos para su envío al matadero o ciclo de los lechones con destino al matadero (Universidad Autónoma de Barcelona [UAB], 2019). En el diagrama de la figura 2.3 se resume la información en relación al ciclo de producción de porcinos.

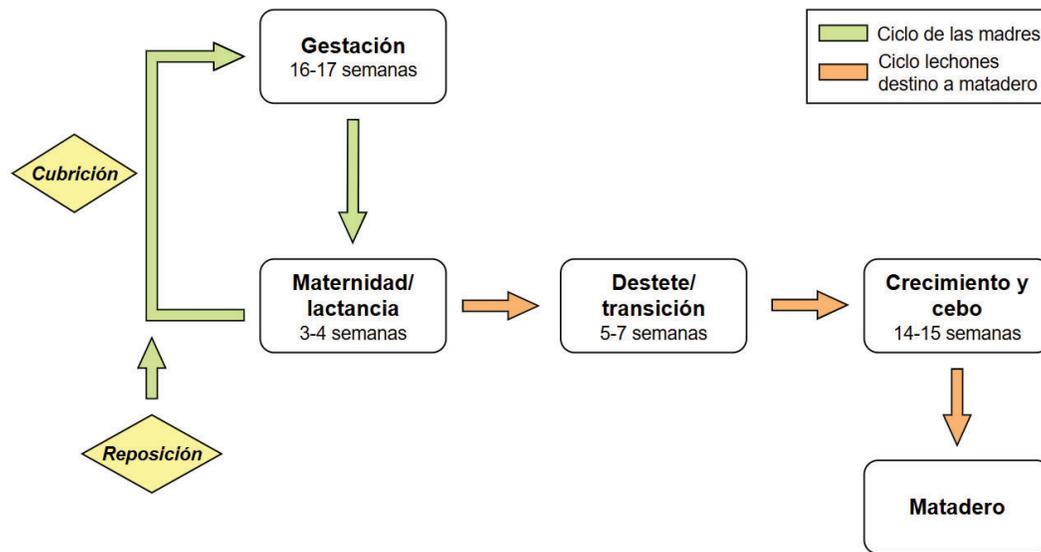


Figura 2.3. Resumen ciclo productivo de los porcinos. Elaboración propia a partir de UAB (2019)

El ciclo de las madres tiene una duración aproximada de entre 20-22 semanas, y depende principalmente de la duración de la lactancia de los lechones. Durante este ciclo, ocurren tres eventos fundamentales: la cubrición (o fecundación natural o *in vitro*), el parto y el destete. Durante este mismo ciclo, también se considera la introducción de cerdas jóvenes de reposición destinadas a sustituir aquellas que mueren, no son fértiles o han finalizado su vida reproductiva (UAB, 2019).

Según UAB (2019), el segundo ciclo, en el que los cerdos son preparados para el matadero, se extiende entre las 23 y 25 semanas. Al finalizar, alcanzan un peso de sacrificio de aproximadamente 100 kg. La duración del último periodo, conocido como fase de cebo o crecimiento, varía en función del peso objetivo de comercialización.



Figura 2.4. Madre junto a lechones en etapa de maternidad. Obtenido de www.interempresas.net

2.3.2. Generación de residuos e impacto ambiental en granjas porcinas

Introducción

La producción de cerdos en nuestro país ha experimentado un marcado desarrollo durante los últimos 30 años. Esto se comprueba al observar que, durante el periodo 1992-2021, la faena total de animales ha aumentado casi un 400% (ver figura 2.5, gráfico izquierda). El aumento de la producción no es un proceso que se ha dado de manera homogénea a lo largo y ancho de Argentina, debido a las características climáticas y geográficas, así como las diferentes oportunidades que presentan las provincias. Cabe mencionar que el aumento sostenido de esta actividad en dicho periodo se explica principalmente por la mayor demanda desde el consumo interno (ver figura 2.5, gráfico derecha).

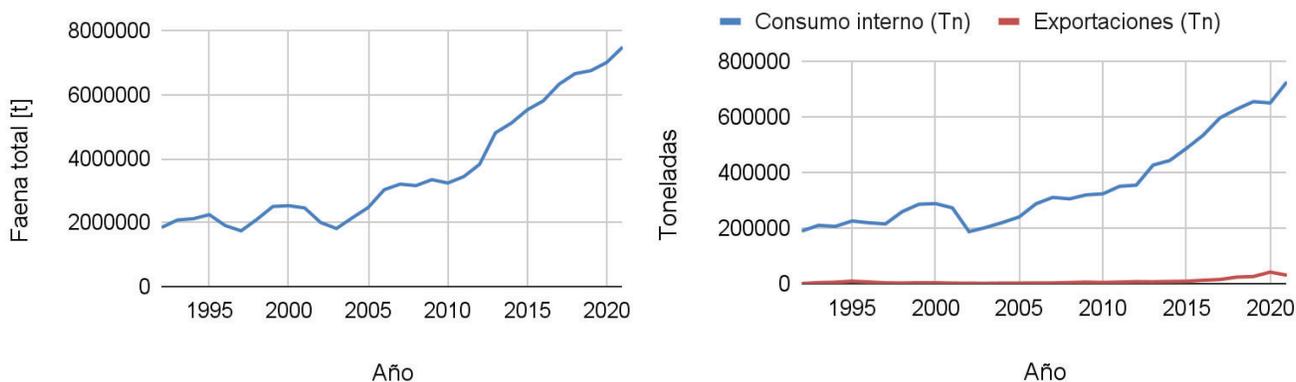


Figura 2.5. Evolución de la faena total de cerdos a nivel nacional para el periodo 1992-2021 (izq.). Evolución del consumo interno de carne porcina y de la exportación en Argentina para el periodo 1992-2021 (der.). Elaborado a partir de Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca, 2021

El aumento de la producción se desarrolló en paralelo a un proceso de transformación que abarcó varios aspectos relacionados con la incorporación de tecnología. El mejoramiento de aspectos tales como la genética, las instalaciones, la nutrición y sanidad de los animales, así como la incorporación de programas de gestión, han dado lugar a la necesidad de avanzar en temas como el impacto ambiental que genera el desarrollo de esta actividad.

En Argentina, al igual que en el resto del mundo, la producción de porcinos ha ido migrando hacia una mayor intensificación, con el consecuente confinamiento de los animales y control casi total del proceso por el hombre. Tanto en los sistemas intensivos como semi-intensivos, la generación de excretas es un problema que necesita ser adecuadamente planificado y manejado. En síntesis, las excretas deben recolectarse, conducirse o evacuarse fuera del sitio donde se alojan los animales por motivos de higiene y sanidad, y finalmente deben tratarse, almacenarse o exportarse (Maisonnave et al., s.f.).

En nuestro país, existen granjas diseñadas de acuerdo a estándares avanzados de bienestar general y eficiencia zoonótica, pero que todavía no cuentan con las instalaciones adecuadas para la correcta gestión de las excretas. Este escenario representa, en algunos casos, riesgos de contaminación del medio ambiente y/o una dificultad manifiesta para cumplir con normas ambientales vigentes en distintas provincias de nuestro país (Maisonave et al., s.f.). De sostenerse las tendencias de producción y faena de animales, esta situación representará un problema cada vez mayor.

Impacto ambiental de la cría de porcinos

Las granjas de producción porcina intensivas, generan impactos sobre diferentes matrices ambientales. Dentro de estas, se destacan los impactos a nivel físico, ecológico y químico.

Comenzando por los impactos a nivel físico, es posible mencionar al efecto sobre el paisaje rural que producen la construcción de galpones para los animales. También pueden reconocerse otros efectos, tales como el ruido y el aumento del tráfico con el consecuente aumento de polvo y partículas en la atmósfera.

Respecto de los efectos biológicos, la concentración de los porcinos y de un sistema de almacenamiento y distribución de alimentos, puede tener como efecto la atracción de roedores y moscas a las inmediaciones de la granja. Por otro lado, el incorrecto manejo de los animales que mueren, puede generar alteraciones en el tipo de animales y aves que merodean en el establecimiento y sus cercanías (Maisonave et al., s.f.).

En cuanto a los impactos químicos, se destacan aquellos ocasionados por la inadecuada gestión y manejo de las excretas, las cuales pueden afectar tanto a los suelos, los cuerpos de agua así como la calidad del aire. La gestión de las excretas en una granja de producción porcina intensiva, se puede realizar mediante un sistema de recolección, conducción y depuración, o a través de un sistema de aprovechamiento y utilización de las mismas.

El derrame o esparcimiento sobre el suelo sin un plan de manejo o uso agronómico puede impactar negativamente. Entre los inconvenientes que se pueden llegar a ocurrir son la salinización de los perfiles, la contaminación de las napas subterráneas con nitrógeno y la potencial eutrofización de los cursos de agua superficial por el agregado de fósforo.

La calidad del aire puede verse afectada por los olores producto de la acumulación de las excretas. Este efecto puede verse incrementado como causa de un aumento de los niveles de amoníaco cuando la higiene y la ventilación en los galpones no es la adecuada (Maisonave et al., s.f.).

Caracterización de las excretas porcinas

La excreta de porcinos (denominada purín) está conformada por una combinación de bosta y orina en una proporción de 60% heces sólidas y el restante 40% de orina. Su composición química está dada por la dieta que reciben los animales, la cual varía de acuerdo a su edad, sexo y peso. Los distintos componentes de la dieta para el buen crecimiento de los animales son provistos alimentando con maíz y sorgo como fuente primaria de carbohidratos, harina de soja que provee proteínas, y agua (Maisonave et al., s.f.).

En la tabla 2.1, se resume la generación diaria de purín según el tipo y estadio del porcino de acuerdo a Millares (s.f.) y Maisonave (s.f.). Cabe resaltar que, de acuerdo a fuentes consultadas, estos valores de relación de generación se corresponden a un uso eficiente del agua de bebida de los animales en el establecimiento. En casos de mala gestión y provisión del agua, estos valores pueden ser mayores. Adicionalmente, en la tabla 2.2 se puede observar la variabilidad que presenta el purín para diferentes parámetros fisicoquímicos. Esto se debe tanto a variaciones en el uso del agua, así como de la alimentación de los porcinos.

Tabla 2.1. Generación de excretas porcinas o purín de acuerdo al tipo y estadio de los animales. Elaborado a partir de Millares (s.f.) y Maisonave (s.f.)

Categoría de cerdos	Estiércol [kg/d animal]	Estiércol + orina [kg/d animal]	Efluente total [kg/d animal]
<i>Cerdas en gestación</i>	3,60	11,00	16,00
<i>Cerdas en lactancia</i>	6,40	18,00	27,00
<i>Lechones destetados</i>	0,35	0,95	1,40
<i>Lechones 25-100 kg</i>	2,30	4,90	7,00
<i>Machos</i>	3,00	6,00	9,00

Tabla 2.2. Valores promedio estimados para diferentes parámetros fisicoquímicos del purín de cerdo. Elaborado a partir de Millares (s.f.), Maisonnave et al. (s.f.), González Martineaux (2005), Marszalek et al. (2014) y Amaral (2015)

Parámetro	Valor promedio ¹
<i>pH</i>	5,9-8,1
Sólidos totales [% ST/Sust]	0,5-4
Sólidos volátiles [% SV/ST]	22-93
DQO [mg/l]	14000-98000
DBO₅ [mg/l]	4200-20000
Nitrógeno [mg/l]	3000-5200
Fósforo [mg/l]	190-1600
Potasio [mg/l]	400-5000
Densidad [mg/l]	1,0

Resulta preciso agregar que las excretas de los cerdos suelen presentarse mezcladas con otros materiales, de manera que pasan a denominarse “efluentes”. Entre los materiales que pueden incorporarse, se encuentra el agua de bebida que no es capturada por el animal, los residuos arrastrados por el agua de lavado, restos de alimentos volcados al piso y la paja y otro material usado para la cama (Maisonnave et al., s.f.).

Tratamiento de las excretas porcinas

En función de lo expuesto en los ítems anteriores, resulta evidente la importancia de la existencia de un sistema de tratamiento para las excretas/efluentes de los porcinos en las granjas modernas para evitar los impactos sobre el medio ambiente que pueden producir su inadecuada gestión y disposición. En algunos casos, la existencia de un sistema de tratamiento puede no solo responder a la necesidad de cumplir con una exigencia legal o regulatoria a nivel ambiental, sino también como medida de recuperación de valiosos nutrientes contenidos en los mismos (Maisonnave et al., s.f.). A continuación se desarrollan algunos de los tratamientos comunes para los efluentes porcinos.

¹ Valor promedio para los diferentes estadios. La composición, además puede variar según la dilución y la toma de muestra (Millares, s.f.)

Compostaje

El compostado de excretas se puede realizar a partir de los sólidos una vez separados de la fracción líquida por algún método de separación física. Otra forma, que aplica para el sistema túnel, consiste en compostar la cama profunda.

Este método de tratamiento de las excretas, por un lado provee como producto final un material con un contenido de humedad significativamente menor al original, lo que facilita su manipulación y transporte sin riesgo de provocar lixiviados. Además, constituye una alternativa relativamente económica, en comparación con otros sistemas, aunque no tiene costo cero. Requiere de maquinaria o herramientas específicas, y mano de obra de manera constante (Maisonave et al., s.f.).

Entre las principales ventajas que provee el compostaje, se destaca la reducción en volumen en el orden del 25-30%, la disminución del contenido de humedad, la estabilización química del material y la reducción de forma progresiva de los olores y moscas. Además, si se mantiene la temperatura interna de la pila por determinada cantidad de días, se pueden eliminar semillas de malezas y algunos patógenos. En cuanto a las desventajas de esta alternativa de tratamiento, es posible mencionar la liberación de amoníaco que puede generar olores desagradables, y óxido nitroso.

Finalmente, si bien el compostaje reduce los volúmenes de sólidos respecto del original de excretas, surge un nuevo desafío a la hora tener que encontrarle un destino al producto. Una alternativa es la venta, aunque esta requiere del cumplimiento de la normativa vigente para el registro de enmiendas y abonos orgánicos (Resolución SENASA 264/2011). Ante esta situación, en muchos casos, el producto compostado es empleado en el predio donde se origina o entregado sin cargo (Maisonave et al., s.f.).

Lagunas de tratamiento

En el caso de las granjas porcinas, las lagunas de tratamiento no deben ser confundidas con las fosas de almacenamiento de efluentes que solo contemplan un volumen necesario para albergar o almacenar los efluentes generados. O sea, no incluyen un volumen adicional para permitir el efectivo tratamiento de la materia orgánica por los microorganismos (Maisonave et al., s.f.).

De acuerdo a la cantidad de oxígeno disuelto en el efluente, las lagunas se pueden clasificar en tres tipos:

- **L. Anaeróbicas:** Hay ausencia de oxígeno, garantizada por una elevada profundidad en relación a los otros tipos de lagunas. Para evitar la emisión de gases de efecto invernadero como el metano, éstas lagunas deben ser cubiertas con extracción y aprovechamiento o combustión del biogás generado.
- **L. Aeróbicas:** Hay suficiente oxígeno disuelto para la supervivencia de los microorganismos aerobios. La profundidad es menor que en el caso de las L. anaeróbicas.
- **L. Facultativas:** Hay oxígeno disuelto en el efluente, aunque la concentración no es permanente ni sostenida en el tiempo. La profundidad de este tipo de lagunas es intermedia.

Las lagunas anaeróbicas permiten, a través de los procesos microbiológicos que ocurren en ellas, reducir la materia orgánica, el contenido de nitrógeno y el contenido de sólidos. Correctamente manejada, permite disminuir los potenciales olores que genera la descomposición de la materia orgánica. El efluente tratado puede ser usado posteriormente como fertilizante.

Una laguna anaeróbica tendrá un mayor volumen que una de almacenamiento de los efluentes, aunque será de menor tamaño en comparación con una laguna aeróbica. Esto se debe a que este tipo de lagunas, requiere en su diseño contemplar un volumen de acumulación de los barros, un volumen de tratamiento biológico, y un volumen de almacenamiento transitorio en su parte superior. En todos los casos, las lagunas deben estar impermeabilizadas con membranas geotextiles en zonas húmedas o el uso de arcillas en climas semiáridos, para proteger la calidad de las aguas subterráneas (Maisonnavé et al., s.f.).

Digestión anaeróbica

La materia orgánica de las excretas líquidas se descompone bajo condiciones anaeróbicas produciendo metano, dióxido de carbono, sulfuro de hidrógeno y vapor de agua, lo que conforma el biogás. Este proceso se denomina biodigestión anaeróbica y depende de la temperatura del efluente, el balance de nutrientes y el pH entre otros factores. De acuerdo al objetivo, el sistema en donde puede ocurrir este proceso puede ser abierto (lagunas abiertas) o cerrado (lagunas cerradas y/o tanque biodigestor).

A grandes rasgos, se pueden identificar dos tipos de motivos por los cuales se suele instalar un sistema de digestión anaeróbica en granjas porcinas. Uno de ellos es la reducción de la carga orgánica y de nutrientes de los efluentes con un posterior aprovechamiento agronómico para su aplicación en fertirriego de cultivos. En este caso, se suele instalar una laguna anaeróbica abierta o cerrada con venteo. Otro de los motivos es el aprovechamiento del biogás que se genera mediante su captación y tratamiento para la posterior generación de energía eléctrica. Para este propósito, es posible instalar una laguna anaeróbica cerrada o un tanque biodigestor (Maisonave et al., s.f.).

De acuerdo a Amaral et al. (2015) experimentalmente se han obtenido rendimientos de biogás entre los 325 y 970 $\text{Nm}^3_{\text{Biogás}}/\text{gSV}_{\text{Purín}}$, para diferentes sitios de generación dentro de una granja porcina. Esta generación puede ser mejorada mediante la codigestión del purín con sustratos provenientes de cultivos energéticos o residuos agrícolas. Adicionalmente, el agregado de un cosustrato de esta naturaleza permite mantener un pH óptimo para las bacterias metanogénicas, evitar la inhibición del proceso por una sobreproducción de amoníaco y optimizar la relación C/N (Xie et al., 2009).

De las tres alternativas para el tratamiento de los purines de cerdo desarrolladas, la digestión anaeróbica en tanques biodigestores de mezcla completa, se presenta como la de mayor interés. Esto se debe a que mediante esta tecnología, se puede tener un mayor control del proceso, permitiendo una mejor depuración del purín, así como una optimización de la generación de biogás y consecuentemente de energía.

2.4. Producción de biogás a partir de biomasa vegetal

2.4.1. Producción de biogás a partir de biocombustibles

Se denomina biocombustible a aquel combustible que proviene o se deriva de la biomasa y permite la obtención de energía. El origen de la biomasa puede ser de origen animal o vegetal: madera o viruta, residuos de procesos agrícolas o forestales, residuos industriales o residuos y efluentes cloacales y animales. El uso de este tipo de biocombustibles tiene como principal objetivo reducir las emisiones de CO_2 a la atmósfera en la producción de energía.

La biomasa constituye una fuente de energía renovable que se basa en la utilización de la materia orgánica formada por vía biológica en un pasado inmediato o de los productos que se derivan de la misma. A través de diferentes procesos de transformación, se puede obtener una serie de biocombustibles que pueden estar en estado sólido, líquido o gaseoso.

Los biocombustibles se clasifican según la materia prima utilizada para su elaboración en biocombustibles de primera, segunda y tercera generación. Aquellos denominados como de primera generación, se obtienen por fermentación o transesterificación, los de segunda mediante técnicas bioquímicas o termoquímicas, y los de tercera a partir de organismos autótrofos como las algas. De estos tres tipos, resultan de particular interés, los de primera generación que son aquellos que se producen a partir de cultivos alimenticios y requieren tecnología convencional. Ejemplos de este tipo son el bioetanol, el biodiesel y el biogás (Vargas, et al., 2022).

Hasta el siglo XIX la biomasa fue la principal fuente de combustible utilizada por los seres humanos. En los siglos XVIII y XIX, con el auge de la Revolución Industrial, se comenzaron a emplear combustibles fósiles, desplazando a la biomasa como principal fuente de energía. Si bien han habido desarrollos desde la segunda mitad del siglo anterior, en las últimas décadas los biocombustibles tomaron un nuevo impulso. Particularmente aquellos de estado líquido.

El auge actual de los combustibles a partir de biomasa se explica principalmente por tres factores. Uno de ellos es su carácter renovable en comparación con los combustibles fósiles. La producción de la biomasa vegetal se realiza con cultivos que permiten obtener cosecha al año. El segundo factor, es que permite diversificar las fuentes de energía en un escenario de agotamiento de los combustibles fósiles. El tercer aspecto es su teórico carácter neutro en términos de emisiones de gases de efecto invernadero. Según sus defensores, la emisión de GEIs por la quema del combustible es equivalente al CO₂ capturado por las plantas durante su crecimiento en el proceso de fotosíntesis. Cabe destacar que este ítem no computa las emisiones asociadas al riego, el uso de fertilizantes y herbicidas, el transporte, procesamiento, entre otros.

Un punto de polémica en la discusión sobre los biocombustibles, es su impacto negativo sobre la seguridad alimentaria. Las posiciones al respecto son diversas, y van desde quienes le atribuyen un peso relativo, a quienes le adjudican gran parte de la responsabilidad. Esta situación tiene su origen en el hecho de que frente al aumento del precio del petróleo, se estimula la producción de biocombustibles cuya demanda conlleva a una suba de los precios de las materias primas que se utilizan en su fabricación. Otro punto de debate en relación a este tema, es el destino de tierras para la producción de biocombustibles en detrimento de su uso agrícola con fines alimenticios (Medina Rey, 2013).

Como se ha mencionado anteriormente, una forma de producir biocombustible a partir de biomasa vegetal es la digestión anaeróbica de dicha biomasa para la producción de biogás. Originalmente se han aprovechado mediante esta tecnología los restos de cosecha y otros residuos vegetales mediante su codigestión con otros residuos orgánicos tales como purines animales.

A partir de los años 90 en Alemania y Austria, se comenzó a desarrollar lo que se denominó cultivo energético con el fin de producir biomasa para su aprovechamiento energético mediante digestión anaeróbica tanto en forma monodigerida como codigerida. Algunos de los cultivos probados que han demostrado buenos rendimientos son el maíz, diversos tipos de pastos, variedad de cereales, remolacha, papa, girasol entre otros. El maíz es uno de los más populares y se puede usar inmediatamente después de cosechado o en su forma ensilada (Wellinger et al., 2013).

De acuerdo al relevamiento realizado por profesionales del INTA en conjunto con el MAGyP (Bres et al., 2021) en Argentina el silaje de maíz es una de las biomazas más empleadas en el país tanto como sustrato principal así como sustrato de codigestión (ver figura 2.6). Esto se debe a su alto contenido en carbono y bajo de nitrógeno lo que permite balancear la relación C/N del sustrato principal.

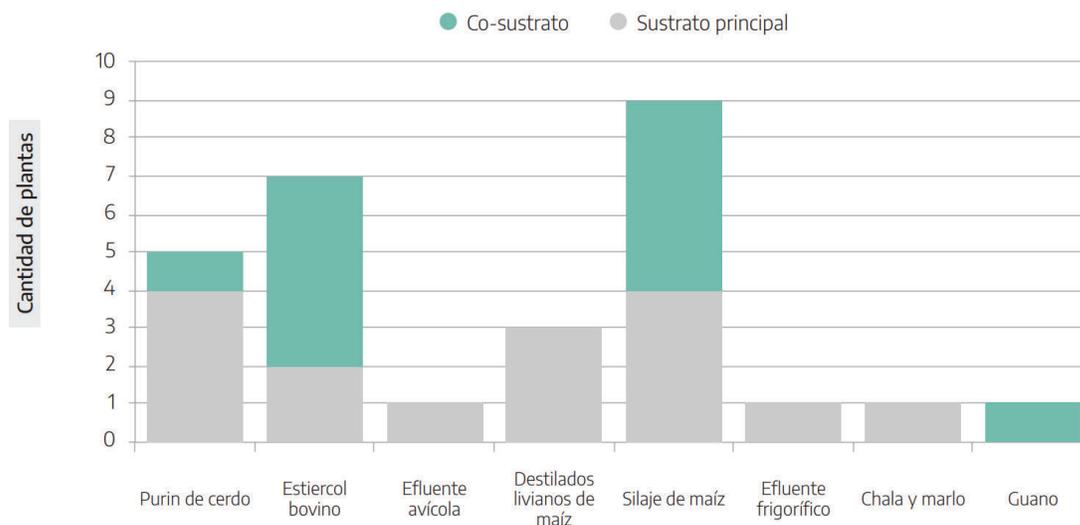


Figura 2.6. Relevamiento de sustratos y cosustratos empleados en biodigestores anaeróbicos con volúmenes mayores a 1000 m³ en Argentina. Obtenido de Bres et al. (2021)

2.4.2. Aprovechamiento bioenergético del cactus *Opuntia ficus-indica*

Opuntia es una xerófita que abarca a alrededor de 300 especies las cuales crecen en zonas áridas y semiáridas. El nopal (*Opuntia ficus-indica*) es una especie tropical o subtropical originaria de México y Centroamérica, actualmente reconocida como la cactácea con la mayor importancia agronómica a nivel global. Esto es debido no solamente a los frutos que produce sino a sus cladodios, los cuales tienen múltiples usos como el forraje, consumo humano o generación de biocombustible (Falasca et al., 2011; Inglese et al., 2017).

El nopal posee un mecanismo fotosintético especializado conocido como metabolismo del ácido crasuláceo (MAC o CAM por sus siglas en inglés). Su éxito ecológico, en conjunto con el resto de las *Opuntias* es atribuido a su metabolismo con un peculiar patrón diario de fijación del carbono y pérdida de agua, los cuales ocurren durante la noche. Al igual que otras plantas MAC, el nopal abre sus estomas en la noche para fijar CO₂. Debido a que las temperaturas nocturnas son más bajas que las diurnas y la humedad relativa es generalmente más alta, la transpiración de las plantas MAC es de tres a cinco veces menor que las de una planta C3 o C4, respectivamente. Esto da como resultado un notable incremento en la eficiencia de uso del agua y en la habilidad de la planta en sobrevivir en ambientes semiáridos caracterizados por una disponibilidad restringida de agua (200-300 mm de precipitación anual) o en regiones caracterizadas por largos periodos de sequía y altas temperaturas. Dicho de otra manera, ofrece enormes posibilidades para la producción de biomasa en áreas de disponibilidad hídrica limitada (Falasca et al., 2011; Inglese et al., 2017).

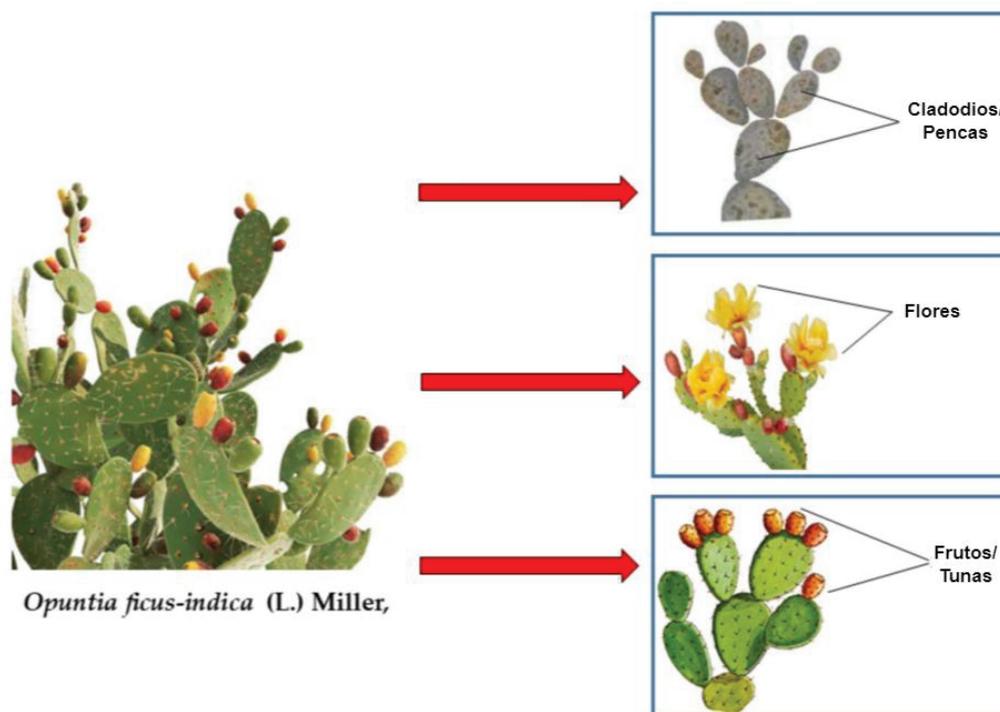


Figura 2.7. Representación de los órganos principales de *O. ficus-indica*. Obtenido y modificado de Caminati et al., 2024.

El nopal presenta una gran variedad de características y ventajas que las destacan sobre otras en entornos relativamente hostiles. Una de ellas es que esta planta crece en cualquier tipo de suelo. Por otro lado, presenta versatilidad de adaptación a diferentes tipos de suelos, aunque aquellos con alta salinidad o inundables no le son favorables. En relación al clima, el nopal puede ser cultivado en un amplio rango de climas. Puede cumplir su ciclo anual con precipitaciones alrededor de los 150 mm y alcanza su condición óptima con 300 mm anuales. Las plantaciones comerciales para producción de fruta y verdura, se ubican en áreas con lluvias primaverales entre los 600-800 mm. La máxima productividad fotosintética es alcanzada con temperaturas entre los 15 y 30 °C. En términos generales, se sugiere un clima seco, pero no muy caliente. Las heladas pueden ocasionar daños irreversibles a las plantas (Falasca et al., 2011; Inglese et al., 2017).

Cabe agregar que el mayor potencial de producción de biomasa del nopal es alcanzado cuando se provee una fertilización adecuada. Se ha comprobado que la planta responde mejor a la fertilización orgánica que a la mineral (Inglese et al., 2017).

Considerando las condiciones que favorecen el crecimiento del nopal, Falasca et al. (2011) han delimitado las zonas de Argentina de acuerdo a su aptitud agroclimática para el cultivo de esta planta (ver figura 2.8). Los autores han identificado a las áreas óptimas para el crecimiento de la *Opuntia ficus-indica*, tanto para plantaciones jóvenes como adultas, en las provincias del Litoral, la totalidad de las provincias de Formosa y Chaco, la parte oriental de la provincia de Jujuy, este y centro de Salta, casi la totalidad de Tucuman, la region oriental de La Rioja y Catamarca, norte y centro de Santa Fe, norte de Córdoba, norte de San Luis y noreste de Mendoza.

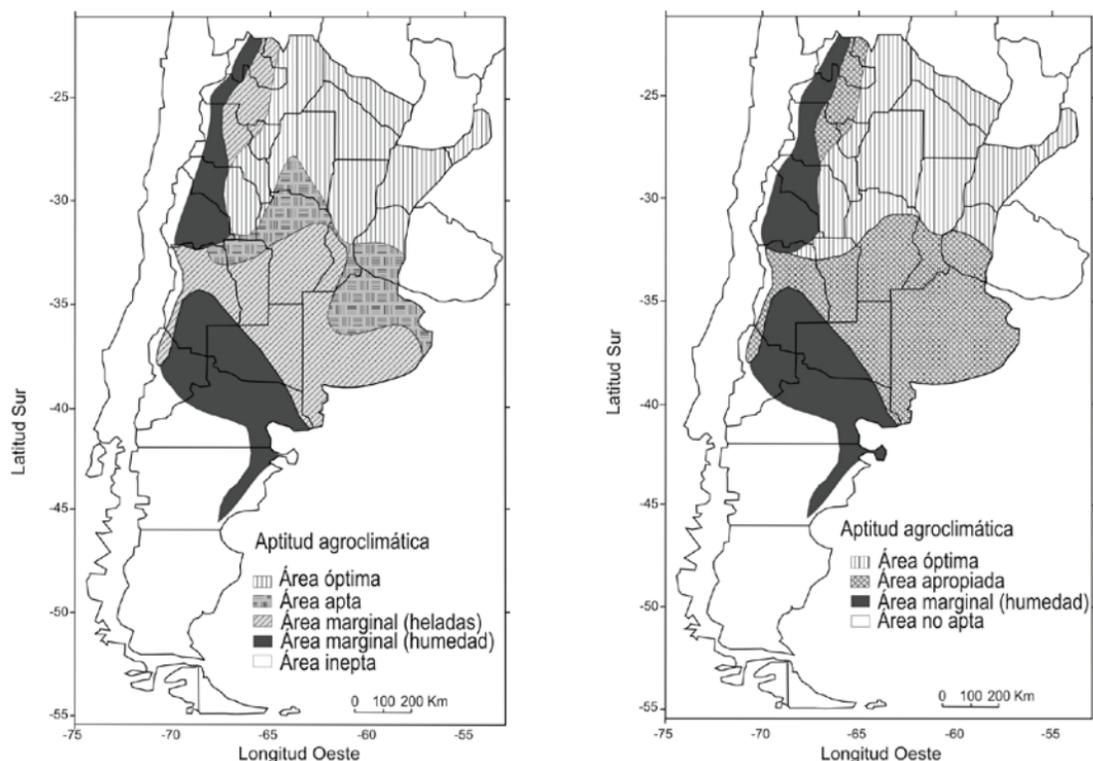


Figura 2.8. Izquierda: Delimitación de áreas según condiciones agroclimáticas para cultivos jóvenes. Derecha: Delimitación de áreas según condiciones agroclimáticas para cultivos adultos. Obtenido de Falasca et al. (2011)

De acuerdo a Guevara & Estevez (2003), la textura del suelo y la precipitación son los principales factores que afectan la productividad del nopal. Según registros reportados en el trabajo mencionado, se ha cuantificado la productividad para diferentes sitios de las provincias de Mendoza y La Rioja en el rango de 0,75 y 2,4 t MS/ha² año bajo diferentes condiciones climáticas, textura del suelo y características de la plantación (ver tabla 2.3).

² MS: Materia seca

Tabla 2.3. Productividad de biomasa aérea de *Opuntia ficus-indica* en Argentina. Elaborado a partir de Guevara & Estevez (2003)

Sitio	Precipitación anual [mm]	Textura del suelo	Trazo de la plantación	Edad de la plantación [años]	Productividad [t MS/ha año]
Los Llanos (La Rioja)	317	Arenoso	3x3	5-7	2,4
Los Llanos (La Rioja)	317	n.d.	4x4	10	1,7
El Divisadero (Santa Rosa, Mendoza)	294	Arenoso	3x1	3	2,1
Mendoza	215	Limoarenoso	5x1	3	0,75

Falasca et al (2011) definen a un cultivo energético a aquel que cumple con las siguientes condiciones: produce una elevada cantidad de biomasa a bajo costo de producción; se desarrolla en tierras marginales; no degrada el medio ambiente; y tiene un balance energético positivo. El nopal cumple todos los requisitos para ser considerado un cultivo energético, y el desarrollo de los cultivos constituye una actividad de gran potencial en zonas áridas (Inglese et al., 2017). Producto de su metabolismo CAM, se caracteriza por una alta producción de biomasa aún bajo dichas condiciones.

La biomasa obtenida se puede transformar para la obtención de biocombustible en estado líquido o gaseoso, ya sea bioetanol o biogás respectivamente. Debido a que este trabajo está enfocado en la producción de biogás, se hará hincapié en el segundo caso. Un punto importante a la hora de hacer un aprovechamiento de los cladodios del nopal para la obtención de biogás, es que es condición mantener el pH de la mezcla cercano a 6 para garantizar un adecuado contenido de metano en el gas. Para lograr esto, se suelen digerir los cladodios de nopal con purines animales (ver figura 2.9).

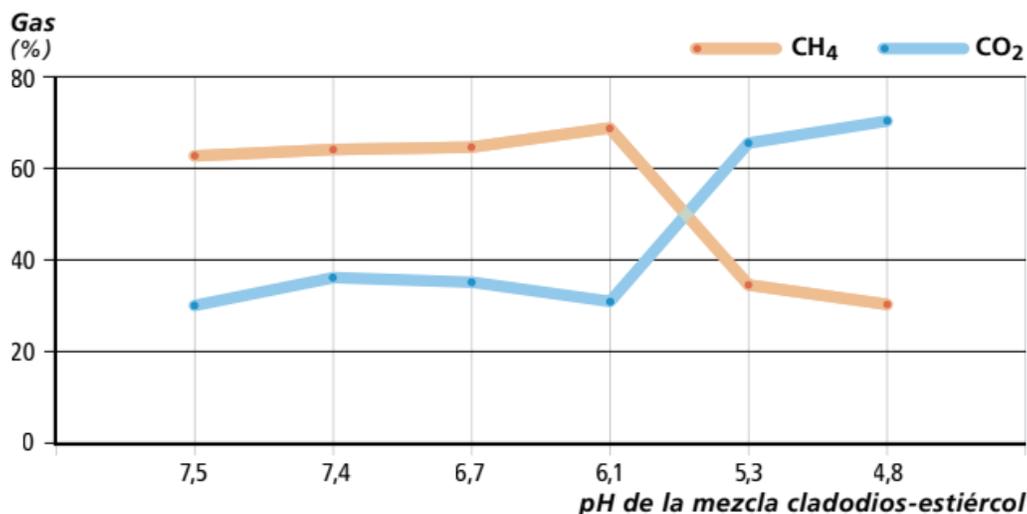


Figura 2.9. Composición del biogás a partir de cladodios de nopal según el pH. Obtenido de Inglesse et al. (2017)

De acuerdo a Homer & Varnero (2023), los cladodios de nopal tiene un potencial bioquímico metanogénico de 327 mlCH₄/gSV, el cual representa un valor alto y se encuentra en el rango del potencial para cultivos energéticos. Por otro lado, los mismos autores han indicado que el potencial de biogás de los cladodios se estima en alrededor de 360 m³/t de materia seca. Como se ha mencionado previamente, una óptima calidad del biogás generado, en términos de porcentaje de metano, es posible de alcanzar bajo la codigestión con purines animales.

Finalmente, según lo expuesto anteriormente, se concluye que el empleo de los cladodios de nopal como cosustrato para el tratamiento del purín mediante biodigestión anaeróbica, es una alternativa factible frente a otros posibles sustratos. Además de los beneficios en común a las otras posibles alternativas tales como el maíz, como la optimización del pH y la relación C:N que mejoran la producción y calidad del biogás, el nopal se encuentra adaptado al clima en donde se va a implantar el proyecto. De esta manera, se va a poder desarrollar su cultivo con poco o nulo requerimiento de agua, el cual es un recurso que escasea en la región. Por otro lado, el nopal es un cultivo que no compite con otros que pueden ser destinados para consumo humano, ya sea de forma directa o indirecta.

Capítulo 3. Marco Legal y normativo

En el presente capítulo se resume la normativa legal aplicable al proyecto de la instalación de la planta de biogás en el establecimiento de Granja Chepes para el tratamiento del purín de cerdo codigerido con cladodios de nopal. Debido a que la planta tiene como objetivo, además del tratamiento del purín generado por los porcinos, la generación de energía, además del tratamiento, se incluye toda la normativa aplicable tanto nacional como provincial en relación a la generación de energía renovable. Adicionalmente, se incluye normativa relacionada a la seguridad e higiene a nivel de la construcción como de la operación de la planta.

3.1. Normativa a nivel nacional

A continuación se resume brevemente la normativa aplicable a nivel nacional sobre el proyecto de instalación del biodigestor.

Constitución Nacional. Artículo 41

Le otorga al gobierno federal la facultad de establecer los presupuestos mínimos de calidad ambiental con el objetivo de definir principios básicos que aseguren una protección ambiental integral de todo el territorio en el país. Asimismo, deja bajo potestad de los gobiernos provinciales el dictar normas complementarias los presupuestos mínimos federales

Ley 25.675. Ley general del ambiente nacional

Establece los presupuestos mínimos para lograr la preservación y protección de la diversidad biológica y desarrollo sustentable a nivel nacional. Entre sus contenidos, establece objetivos y principios de política ambiental; determina los instrumentos de gestión ambiental como la evaluación de impacto ambiental y participación ciudadana; las instituciones de gestión interjurisdiccional de la competencia judicial ambiental.

Ley 24.065. Régimen de la energía eléctrica

Establece el marco regulatorio del sistema eléctrico en Argentina. Su objetivo principal es organizar la generación, transporte, distribución y comercialización. Para supervisar su cumplimiento, define al Ente Nacional Regulador de la Electricidad (ENRE), encargado de regular y controlar el sector eléctrico en beneficio de los usuarios y el desarrollo del sistema energético.

Ley 26.093. Régimen de regulación y promoción para la producción y uso sustentables de biocombustibles

Su objetivo principal es fomentar la producción, comercialización y uso de biocombustibles como el biodiésel, bioetanol y biogás, promoviendo el desarrollo sostenible, la diversificación energética y la reducción de emisiones contaminantes. La ley otorga beneficios fiscales, como la exención de impuestos específicos, y establece un cupo obligatorio de mezcla de biocombustibles con combustibles fósiles en el mercado interno.

Ley 26.190 (Modificada por 27.191). Régimen de fomento nacional para el uso de energías renovables

Establece el marco normativo para lograr que el 20% del consumo total de electricidad del país provenga de fuentes renovables para el año 2025. Define medidas específicas como contratos a largo plazo, precios competitivos para la energía renovable y exenciones fiscales para proyectos del sector.

Resolución 19/2019. Norma técnica para la aplicación de digerido

Fija los criterios generales y establece los requisitos mínimos que debe cumplir el digerido proveniente de plantas de digestión anaeróbica, a efectos de asegurar que su aplicación agrícola sea sustentable. Provee una metodología para definir la aptitud de la aplicación del digerido en un terreno de uso agrícola así como valores límites para una serie de parámetros de calidad. En la tabla 3.1, se vuelcan los valores de los parámetros que debe cumplir el digerido para su uso de acuerdo al Anexo V.

Tabla 3.1. Valores límites para la aplicación del digerido en terrenos de uso agrícola

Parámetro	Indicador	Valor límite	Metodología
Patógenos	Coliformes fecales	< 1000 NMP/g MF	TMECC 07.01-B
	Escherichia coli	Ausencia	TMECC 07.01-C ; APHA-AWWA-WPC F. Met. 9260
	Helmintos	1 huevo viable/l digerido	TMECC 07.04-A
	Salmonella	< 3 NMP/4g MF	TMECC 07.02-A; APHA-AWWA-WPC F. Met. 9260
Materia orgánica y nutrientes	pH	6,5-8,5	APHA-AWWA-WPC F. Met. 4500 B
	CE [dS/m]	declarar	APHA-AWWA-WPC F. Met 2510 B
	Materia orgánica	> 40 %	APHA-AWWA-WPC F. Met 2540 E
	N-Total	declarar	APHA-AWWA-WPC F. Met 4500 Norg B
	N-NH₄⁺	declarar	APHA-AWWA-WPC F. Met 4500-NH3 B y E; F
	P-Total	declarar	TMECC 04.12; EPA-M3015; TMECC 04.03; APHA-AWWAWPC F. Met 3111; 3120
	K⁺-Total	declarar	TMECC 04.12; EPA-M3015; TMECC 04.04; APHA-AWWAWPC F. Met 3111; 3120
	Na⁺ soluble	declarar	TMECC 04.05; TMECC 04.15; APHA-AWWA-WPC F. Met 3111; 3120
	Cl⁻ soluble	declarar	APHA-AWWA-WPC F. Met. 4500-Cl- B
Estabilidad (Se deben presentar al menos 2 métodos)	Ácidos Orgánicos Volátiles (AOT)	< 1500 mg/l	EPA, M204A; APHA-AWWA-WPC F. Met. 6210
	AT₄ (Consumo acumulado de oxígeno en 4 días)	< 10 mgO ₂ /gMS	ASTM, 1996
	Biogás Residual	< 0,25 l/gMO	Walker et al., 2010. OFW004-005-WRAP
	Índice Respirométrico Dinámico (IRD)	< 1 mgO ₂ /gMO h	Adani, F. et al, 2004.
	Índice Respirométrico Estático (IRE)	< 0,5 mgO ₂ /gMO h	TMECC 05.08

Continuación tabla			
Impurezas (> 2 mm)	Vidrio, plástico	metal,	< 0,5 % MS
			TMECC 02.02-C
Elementos potencialmente tóxicos [mg/kgMS]	Arsénico		15
	Cadmio		1,5
	Zinc		300
	Cobre		150
	Cromo total		100
	Mercurio		0,7
	Níquel		30
	Plomo		100
			TMECC 04.06

Resolución 1004/2023. Procedimiento de registro de bioinsumos (SENASA)

Aprueba el procedimiento para el registro de bioinsumos y de fertilizantes, enmiendas, sustratos, acondicionadores, protectores y materias primas, para quienes se encuentren interesados en elaborar, importar, exportar, tener, fraccionar, distribuir y/o vender bioinsumos, conforme lo establecido en la presente resolución. De esta manera, otorga el marco normativo para el registro de los productores de digerido, y su comercialización para uso agrícola.

3.2. Normativa a nivel provincial

A continuación se resume la normativa circunscripta a la provincia de La Rioja de interés en relación al proyecto de instalación del biodigestor.

Constitución provincial de La Rioja. Artículo 68

En línea con el Artículo 41 de la constitución nacional, establece el derecho de los ciudadanos de la provincia de La Rioja a gozar de un ambiente sano y equilibrado. Establece la necesidad de la realización de una evaluación de impacto ambiental para aquellas obras y/o actividades que alteren el medio ambiente. Se deja asentada la prohibición de la instalación de depósitos nucleares en todo el territorio provincial.

Ley 7.801 (Modificada por 8.355). Ley provincial de medio ambiente

Establece las normas para conservar y mejorar el patrimonio ambiental de la provincia, designando a la Dirección General de Medio Ambiente y Desarrollo Sustentable como autoridad de aplicación. Exige la realización de estudios de impacto ambiental previos a actividades que puedan alterar el entorno, protege los recursos naturales y la biodiversidad, y declara propiedad estatal los genomas autóctonos. Además, promueve el uso sustentable de los recursos, la recuperación de áreas degradadas y prohíbe la emisión de contaminantes que afecten la salud, el ambiente o los bienes.

Ley 4.295. Código de aguas

Regula el uso, conservación y distribución del agua en el territorio provincial, declarando de dominio público todas las aguas superficiales y subterráneas. Establece normas para su aprovechamiento en actividades como consumo humano, agrícola, industrial y energético, priorizando siempre el uso humano y doméstico. Además, dispone la protección de fuentes y cauces, promoviendo su uso racional y sustentable. La autoridad de aplicación tiene facultades para planificar, otorgar concesiones, fiscalizar y sancionar, con el objetivo de garantizar el acceso equitativo, evitar la contaminación y preservar este recurso vital para las generaciones presentes y futuras.

Ley 4.741 (Modificada por 6.460). Ley de depuración y fiscalización de descargas de los efluentes líquidos industriales

Define el marco regulatorio para la depuración y fiscalización de las descargas de efluentes líquidos industriales con el objetivo fundamental de defender y preservar el medio ambiente. Aplica a todos los establecimientos industriales de la provincia y designa al Ministerio de Desarrollo de la Producción y Turismo como autoridad de aplicación. La ley prohíbe la descarga de efluentes sin tratamiento en cuerpos receptores, exige la instalación de sistemas de depuración y la obtención de autorizaciones para dichas descargas. Además, establece un canon por el uso de cuerpos receptores y un régimen de sanciones para quienes incumplan sus disposiciones.

El Anexo V del decreto reglamentario de la presente ley (decreto 773/93) se encuentran definidos los límites permisibles de los parámetros fisicoquímicos para descarga de efluentes industriales en cuerpo receptor. En la tabla 3.2, se vuelcan dichos valores por parámetro y tipo de descarga.

Tabla 3.2. Valores límites permisibles de los parámetros fisicoquímicos para vuelco según cuerpo receptor. Decreto 773/93, Anexo V

Parámetro	Agua superficial	Capa freática	Conducto pluvial	Colectora cloacal	Terreno absorbente
pH	5,5-10	5,5-10	5,5-10	5,5-10	5,5-10
Temperatura [°C]	< 40	< 40	< 40	< 40	< 40
Sólidos sedimentables 10' [ml/l]	< 0,5	-	-	< 0,5	-
Sólidos sedimentables 2 h [ml/l]	-	< 1	< 1	-	< 1
Sust. solubles en frío de éter etílico [mg/l]	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Sulfuros totales [mg/l]	< 1	< 5	< 1	< 1	< 5
Cromo trivalente [mg/l]	< 2	*	< 2	< 2	*
Cromo hexavalente [mg/l]	< 0,2	*	< 0,2	< 0,2	*
Plomo [mg/l]	< 0,5	< 0,05	< 0,5	< 0,5	< 0,005
Mercurio total [mg/l]	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Arsénico [mg/l]	< 0,1	< 0,01	< 0,1	< 0,1	< 0,01
Cianuros [mg/l]	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Cadmio [mg/l]	< 0,1	< 0,05	< 0,1	< 0,1	< 0,05
DBO₅ [mg/l]	< 50	< 200	< 50	< 200	< 200
O₂ consumido [mg/l]**	< 20	< 80	< 20	< 80	< 80
Sust. fenólicas [mg/l]	< 0,05	< 0,2	< 0,5	< 0,5	< 0,2
S.R.A.O [mg/l]	1-2	< 0,5	< 1-2	< 2	< 0,5
Demanda de cloro [mg/l]	***	-	***	-	-

* Se determinará cromo total y su valor permisible será menor o igual a 0,05 ml/l

** En caso de que no se pueda medir DBO₅

***Se determinará y exigirá satisfacer la "Demanda de Cloro" en establecimientos tales como: mataderos, lavaderos de lana, productos lácteos en desagües donde el efluente industrial se mezcla con el cloacal.

Ley 8.190. Adhesión a la ley nacional 26.093 “Régimen de regulación y promoción para la producción y uso sustentables de biocombustibles”

Regula el uso y la gestión de las fuentes de energía renovable en la provincia, fomentando su desarrollo y aprovechamiento sostenible. Establece el marco legal para la promoción de proyectos que utilicen fuentes renovables como energía solar, eólica, hidráulica, geotérmica y biomasa, con el fin de diversificar la matriz energética provincial, preservar el medio ambiente y contribuir al desarrollo económico y social. La ley define como autoridad de aplicación a la Unidad Administrativa de "Energías Renovables".

En relación a la producción de biogás, la autoridad de aplicación procurará la reactivación y/o la puesta en funcionamiento de plantas de tratamiento de residuos. En cuanto a la producción de biocombustibles, la autoridad de aplicación promoverá intensivamente el cultivo de jatropha y/o de otro vegetal que por sus características se adapte a las condiciones físicas y climáticas de la provincia sin competir con el sector alimentos y sin degradar el medio ambiente. La autoridad de aplicación, además promoverá beneficios fiscales, soporte administrativo para gestión de financiamiento internacional, así como colaboración en tareas de preparación del terreno para emprendimientos de esta naturaleza.

Ley 9.818. Adhesión a la ley nacional 26.190 “Régimen de fomento nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinada a la producción de energía eléctrica”

Junto con el decreto reglamentario 580/17 establecen el marco normativo para la promoción y el desarrollo de fuentes de energía renovable en la provincia. Define los beneficios de los proyectos de tal naturaleza en La Rioja. Adicionalmente, la metodología para la solicitud para la explotación de terrenos para el emplazamiento de proyectos de generación de energía renovable.

Ley 10.150. Adhesión a la ley nacional 27.424 “Régimen de fomento a la generación distribuida de energía renovable integrada a la red eléctrica pública”

Declara de interés provincial la generación distribuida de energía eléctrica a partir de fuentes renovables, promoviendo el autoconsumo y la inyección de excedentes en la red de distribución. Bajo esta ley, la provincia adhiere a la Ley Nacional N° 27.424 en aspectos no regulados por esta ley. Se reconoce el derecho de los usuarios-generadores a producir energía para autoconsumo e inyectar excedentes a la red, cumpliendo requisitos técnicos específicos.

La Subsecretaría de Energía, dependiente del Ministerio de Infraestructura, es designada como autoridad de aplicación, encargada de establecer normas técnicas y administrativas para la aprobación de proyectos de generación distribuida. Además, se crea el Fondo para la Generación de Energía Renovable, destinado a otorgar préstamos, inversiones, incentivos y garantías para implementar sistemas de generación distribuida.

3.3. Higiene y seguridad

Ley Nacional 19.587. Ley de higiene y seguridad en el trabajo

Junto con los decretos reglamentarios 351/79 y 1338/96 determinan las condiciones de seguridad que debe cumplir cualquier actividad industrial en todo el territorio de la República Argentina. Al no existir normativa relacionada específica para la operación de planta de biogás, es la que se emplea como referencia. Entre los principales riesgos definidos en la normativa aplicables a esta actividad, se encuentran la contaminación biológica, el fuego y la atmósfera explosiva. Adicionalmente, existen riesgos inherentes a cualquier planta, como las caídas, descargas eléctricas y quemaduras.

TRAS 120. Technical Rules for Plant Safety: Safety Requirements for Biogas Plants

Esta norma técnica elaborada por la Comisión de Seguridad de los Procesos de Alemania (o KAS por sus siglas), contiene los requerimientos que debe cumplir una planta de biogás en su diseño y construcción para minimizar los riesgos por incendio, explosión y otros relacionados. Incluye especificaciones como materiales a emplear, sistemas de hermetización, dimensionamiento de unidades y conducciones, distancias entre unidades, y equipos de seguridad. Adicionalmente, provee indicaciones para el monitoreo de gases y temperatura, manejo de los sustratos, así como acciones frente a situaciones de emergencia.

Capítulo 4. Biodigestión anaeróbica

4.1. Introducción

La biodigestión anaeróbica es un complejo proceso bioquímico que ocurre bajo la ausencia de oxígeno. Este proceso involucra una gran diversidad de microorganismos estrictamente anaerobios y facultativos, los cuales convierten la materia orgánica en biogás. El metano es el principal componente de este gas (50-70%) seguido por el dióxido de carbono (30-50%) (Wellinger et al., 2013; FAO, 2019). El biogás también presenta sulfuro de hidrógeno, así como otros compuestos en bajas concentraciones.

El contenido calórico del biogás está dado principalmente por el metano, lo que le otorga un rendimiento energético de entre 19-26 MJ/Nm³. Cabe destacar que, durante el proceso de degradación anaeróbica, la mayor proporción de la energía se conserva en el metano, dejando una baja fracción disponible para el crecimiento y la reproducción de la biomasa (Wellinger et al., 2013).

4.2. Microbiología

En total se reconocen cuatro grupos tróficos intervinientes en el proceso de la biodigestión anaerobia (ver figura 4.1). La actividad en forma coordinada de estos grupos garantiza la estabilidad de todo el proceso.

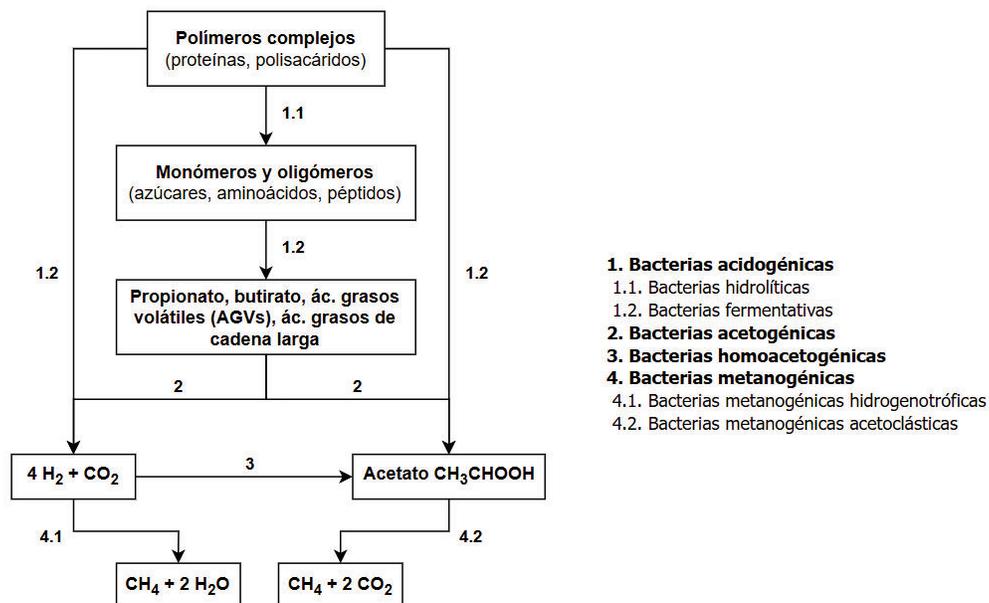


Figura 4.1. Diagrama de los procesos y comunidades microbianas involucradas en la biodigestión anaeróbica. Elaborado a partir de Wellinger et al. (2013)

Bacterias acidogénicas

Este grupo está conformado por bacterias hidrolíticas y fermentativas. En relación a las primeras, se encargan de hidrolizar la materia orgánica. Es decir, convertir polímeros en monómeros, y solubilizar el material particulado. Por otro lado, las segundas fermentan los monómeros resultantes en una gran variedad de productos. Como resultado final de la acidogénesis, se obtienen compuestos carbonados de cadena larga conocidos como ácidos grasos volátiles (AGVs o VFAs por sus siglas en inglés), tales como propionato, butirato y alcoholes (Wellinger et al, 2013).

Bacterias acetogénicas

Las bacterias acetogénicas protón-reductoras son únicas por su obligado comportamiento sintrófico. Es decir, su metabolismo requiere de la acción en conjunto con otro grupo de bacterias. La energía de las bacterias acetogénicas se deriva de los sustratos únicamente si se mantiene una baja presión parcial de hidrógeno. Este compuesto es un subproducto del metabolismo de las bacterias, aunque también es tóxico para ellas. La acción de las bacterias acetogénicas es crucial en el proceso de la biodigestión anaeróbica, ya que convierte a los AGVs en sustratos para las bacterias metanogénicas, ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono (Wellinger et al, 2013).

Bacterias metanogénicas

En este grupo se incluye a las bacterias metanogénicas hidrogenotróficas y las metanogénicas acetoclásticas. Las primeras están encargadas de tomar del medio el hidrógeno generado por las acetogénicas. Por su parte las bacterias acetogénicas son aquellas que convierten el acetato en metano. Alrededor del 70% se produce mediante esta vía (Wellinger et al, 2013).

Bacterias homoacetogénicas

En conjunto con las acetogénicas, se encargan de utilizar el hidrógeno producido. Esto, en un estado balanceado, permite que haya una baja presión parcial de hidrógeno. Como producto, las bacterias homoacetogénicas producen metano (Wellinger et al, 2013).

Bacterias sulfato reductoras

Convierten el sulfato a sulfuro. En altas concentraciones de sulfato, pueden metabolizar una gran variedad de compuestos a partir de los cuales es posible generar metano: dióxido de carbono, hidrógeno y acetato. Debido a la naturaleza sintrófica del proceso de biodigestión anaeróbica, cuando dicha situación ocurre, puede afectar a todos los grupos de bacterias involucrados (Wellinger et al, 2013).

4.3. Condiciones ambientales

4.3.1. Condiciones redox

Por definición, la biodigestión anaeróbica ocurre en ausencia de oxígeno. Bajo este estado, son otros compuestos químicos los cuales actúan como aceptores de electrones, reemplazando al oxígeno. Algunos compuestos de carbono se convierten en aceptores de los electrones reduciéndose, mientras otros se oxidan en dióxido de carbono y ácidos volátiles. El producto final es el metano, el cual almacena energía.

Pequeñas concentraciones de oxígeno, del orden de los 0,1 mg/l pueden inhibir el proceso anaeróbico. Adicionalmente, otros compuestos oxidados, también pueden generar el mismo efecto. Entre ellos es posible mencionar a los nitratos, los nitritos y los sulfatos (Wellinger et al, 2013).

4.3.2. pH, AGVs y bicarbonatos

Los microorganismos productores de metano tienen una tasa de crecimiento óptima en el rango entre 6,6-7,4. De todas maneras, estos microorganismos pueden permanecer estables a rango más amplios entre 6-8. Se deben evitar valores menores a 6 y mayores a 8,3, ya que pueden causar la inhibición del grupo de las metanogénicas (Chernicharo, 2007).

En un medio anaeróbico el pH es controlado por el sistema bicarbonato-ácido carbónico. En caso de aumento de la concentración de los ácidos grasos volátiles, el bicarbonato actúa neutralizándolos. En este sentido, es importante que exista un adecuado balance entre la alcalinidad y los AGVs. Una caída del pH a valores menores que 6 puede desionizar los AGVs, produciendo toxicidad sobre las bacterias metanogénicas. Por el contrario, un aumento del pH a valores mayores que 8 da lugar a la forma desionizada del amonio, la cual es tóxica para las bacterias formadoras de metano (Wellinger et al, 2013).

En la mayoría de los casos, los problemas en el proceso de biodigestión anaeróbica se deben a una acumulación de los AGVs y la baja del pH. Este fenómeno se explica de la siguiente manera. El crecimiento de las bacterias metanogénicas se inhibe a pH menor a 6,6. A pesar de esto, la actividad de las bacterias metanogénicas continúa funcionando hasta que el pH desciende a 4,5-5. Como resultado se produce una rápida acumulación de AGVs que, sin la capacidad buffer suficiente, no es posible neutralizar. Una forma práctica y operacional de hacer un seguimiento del proceso es a través de la medición de la relación FOS/TAC (o AGVs/Alcalinidad) (Wellinger et al, 2013). De forma simplificada, se pueden resumir los valores de dicha relación en:

- **FOS/TAC < 0,3**. Indica estabilidad del proceso
- **0,3 < FOS/TAC < 0,8**. Indica inestabilidad en el proceso y que se requieren acciones correctivas.
- **FOS/TAC > 0,8**. Indica falla del proceso debido a una caída del pH e inhibición de la metanogénesis

4.3.3. Nutrientes, elementos traza e inhibidores

Para garantizar que el proceso de biodigestión anaeróbica ocurra de forma correcta, se requiere una óptima relación C:N:P. Si bien, existe una gran variedad de rangos reportados, Filer et al. (2019) la define en 120:3:1. Adicionalmente, es necesaria la presencia azufre, potasio, calcio, magnesio, cloruros, y metales traza como hierro, cobre y zinc, entre otros compuestos, para el adecuado crecimiento celular (Wellinger et al, 2013).

El amoníaco y el ion amonio, especies del nitrógeno que aparecen por la degradación de sustratos asimilables a proteínas, pueden actuar como inhibidores en altas concentraciones. La predominancia de uno u otro depende del pH del medio. Concentraciones de amoníaco mayores a 150 mg/l son tóxicas para las bacterias metanogénicas, mientras que el ion amonio no se debe superar una concentración igual a 3000 mg/l (Chernicharo, 2007).

Los compuestos de sulfuro, los cuales son requeridos por algunos grupos de bacterias metanogénicas, actúan como inhibidores de estos mismos a altas concentraciones. Ciertas especies del azufre pueden ocasionar la precipitación de nutrientes esenciales como el hierro, níquel y otros, volviéndolos insolubles. Se ha encontrado que iones de metales pesados como Cu^{++} y Zn^{++} , y de metales alcalinos térreos como Na^+ , K^+ y Ca^{++} , actúan como inhibidores. Solventes clorados, biocidas, pesticidas y antibióticos, también han sido identificados como inhibidores del proceso de biodigestión anaeróbica.

Las bacterias metanogénicas constituyen el grupo más sensible a la acción de los inhibidores. De todas formas, la inhibición es reversible en la mayoría de los casos. Bajo las condiciones y el tiempo adecuado, estas bacterias son capaces de adaptarse a los compuestos que ejercen un efecto tóxico sobre ellas (Wellinger et al, 2013).

4.3.4. Temperatura

Según Chernicharo (2007), entre los factores físicos que afectan el mantenimiento y la reproducción de la biomasa, la temperatura es la más importante. Existen tres rangos de temperatura diferente a los cuales se pueden asociar los procesos biológicos:

- **Rango psicrófilico:** 4-15 °C
- **Rango mesófilico:** 20-40 °C
- **Rango termófilico:** 40-70 °C

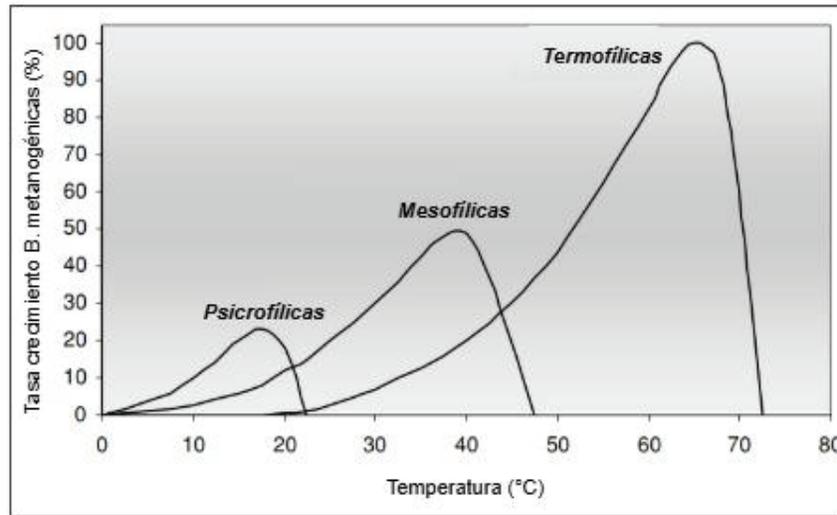


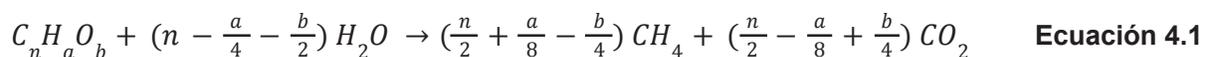
Figura 4.2. Tasa de crecimiento de los microorganismos en función del rango de temperatura de operación. Modificado de Chernicharo (2007)

La temperatura afecta a los procesos biológicos mediante dos mecanismos. Por un lado, influencia la actividad de las enzimas, y por el otro la difusión de los sustratos. Se han identificado dos temperaturas como las ideales para el correcto desarrollo de los procesos anaeróbicos. Uno de ellos es entre los 30-35 °C (rango mesofílico), mientras que el segundo entre los 50-55 °C (rango termofílico).

Cabe destacar que la mayoría de los reactores diseñados hasta la actualidad operan en el rango mesofílico. Resulta también importante resaltar la importancia de mantener constante la temperatura de operación, independientemente del rango para diseño elegido. En caso contrario, puede ocurrir un desbalance de las comunidades microbianas involucradas y afectar el proceso en su conjunto (Chernicharo, 2007).

4.4. Producción de gas

Los compuestos que pueden ser degradados por las comunidades microbianas intervinientes en el proceso de biodigestión anaeróbica son los carbohidratos, las proteínas y las grasas. Una relación C:N óptima de 25:1 garantiza un alto rendimiento de producción de biogás a partir de este proceso. Conociendo la composición elemental del sustrato, es posible estimar el rendimiento máximo teórico mediante estequiometría a través de la ecuación 4.1 (Wellinger et al, 2013).



Una segunda aproximación consiste en estimar la producción de metano a partir de los sólidos volátiles del sustrato. De acuerdo a Wellinger et al. (2013), se sugiere una relación de 406 ICH₄/kgSV. Un tercer método es utilizando una relación en función de la DQO del sustrato. Según el mismo autor, se puede asumir una generación de 350 ICH₄/kgDQO.

Los métodos previamente mencionados, constituyen una manera de cuantificar la producción de gas correspondiente a la fracción de metano, de manera teórica. Estos métodos asumen una relación lineal de conversión de materia orgánica a metano, y no consideran todos los procesos inherentes a la biodigestión anaeróbica. De esta manera, con el fin de obtener un valor de generación de metano y/o de biogás representativo, que considere la variabilidad de los procesos biológicos, se debe acudir a métodos estrictamente experimentales (ver capítulo 5).

4.5. Tipos de biodigestores

Los tipos de biodigestores que existen en la actualidad abarcan una gran variedad de tecnologías disponibles. Estas van desde construcción caseras hasta grandes plantas con alta tecnología y completamente automatizadas. La elección de la tecnología a adoptar depende del sustrato que alimentará al biodigestor, el objetivo del proyecto, y el dinero y financiamiento disponible (FAO, 2019).

De acuerdo a FAO (2019), la diversidad de biodigestores disponibles puede caracterizarse según:

- **Carga:** puede realizarse en lotes (batch) o administrarse de forma semicontinua o continua.
- **Contenido de materia seca en la mezcla:** determina la forma de operación del biodigestor según sea húmedo, semihúmedo o seco.
- **Grado de mezclado:** mezcla completa, parcial o nula.
- **Manejo del sustrato:** puede o no haber manejo del sustrato.
- **Etapas del manejo:** en caso de que haya manejo del sustrato, puede ser en una o dos etapas.

4.5.1. Biodigestores batch

Este tipo de biodigestores se suelen utilizar a pequeña escala para investigación en laboratorios. Los ensayos que se puedan realizar con ellos, incluyen conocer si un sustrato es apto para producir biogás o no, cuánto produce y en qué tiempo, lo que permite determinar su potencial de producción de biogás (FAO, 2019).

4.5.2. Biodigestores semicontinuos y continuos

Húmedos sin manejo del sustrato

Incluye a los biodigestores que trabajan con un contenido de materia seca de entre el 1 y el 17% de la mezcla. La agitación puede ser nula, parcial o completa (FAO, 2019).

Rurales o de baja tecnología

Este tipo de biodigestores se caracterizan por no disponer de sistemas de agitación continua. En algunos casos suelen contar con algún tipo de mezcla manual, por ejemplo, mediante manivelas o palancas. En otros casos, la misma carga del sustrato en el biodigestor genera la agitación.

En su mayoría, este tipo de reactores anaeróbicos, no cuentan con un sistema de calefacción. De esta manera, la temperatura del proceso depende del exterior. Existen métodos alternativos para garantizar una temperatura constante, como el uso de aislantes.

Existen dos tipos de sistemas muy populares que se clasifican bajo esta categoría. Uno de ellos son los biodigestores tubulares, taiwaneses o flexibles (figura 4.3.A). Estos se fabrican utilizando membranas, formando tubos largos que pueden estar enterrados o apoyados sobre el suelo. El segundo, se corresponde con los biodigestores chinos o rígidos (figura 4.3.B). En este caso, son construidos con materiales rígidos como tanques plasticos, ladrillos u hormigón. En algunos casos, es posible instalar un sistema de agitación (FAO, 2019).



Figura 4.3. Biodigestores rurales de pequeña escala. Obtenido de FAO (2019)

Lagunas cubiertas

En este grupo se incluye a los biodigestores construidos a partir de lagunas de tratamiento de efluentes que operan en forma anaeróbica, a las cuales se las cubrió con una membrana. El objetivo es capturar y aprovechar el biogás generado. Las lagunas suelen ser grandes y con poco o nulo sistema de agitación. No poseen un sistema de calefacción ni aislamiento, por lo que la temperatura del proceso y la eficiencia del mismo, dependen de la temperatura exterior así como de la del efluente que ingresa (FAO, 2019).

Mezcla completa

Estos biodigestores permiten trabajar, según el criterio adoptado para su diseño, en cualquiera de los tres rangos de temperatura (psico-, meso- o termofílico), bajo diferentes condiciones climáticas y con altas cargas de sólidos u orgánicas. Los materiales empleados para su construcción incluyen hormigón armado, acero al carbono o acero inoxidable. Tal como su nombre lo indica, poseen sistemas de mezcla que garantizan la homogeneidad del inocuo y el sustrato en el interior del biodigestor. Por otro lado, cuentan con equipos para el calentamiento de la mezcla, lo que garantiza que el proceso ocurra de forma óptima.

Un punto a considerar para este tipo de tecnologías es que asegura la producción de biogás y, consecuentemente, de energía térmica y eléctrica de manera constante. La vida útil de las plantas se estima entre 15 a 20 años, lo que permite hacer contratos de largo plazo de suministro de energía eléctrica. Una de sus desventajas son los altos costos de inversión que requieren. Se estima que se requiere una inversión inicial de entre 3500-5000 USD por kW de potencia instalada (FAO, 2019).



Figura 4.4. Biodigestor de mezcla completa. Obtenido de FAO (2019)

Húmedos con manejo del sustrato

Bajo esta categoría se incluye a los reactores UASB o RAFA, creados en Holanda en los años 70 por Gazte Lettinga. Estos biodigestores, operan bajo un régimen continuo, en el cual el afluente ingresa por la parte inferior y sale por la superior, recorriendo todo el largo del reactor. Son más altos que anchos, de forma que tienen un largo recorrido ascendente (ver figura 4.5). La velocidad con que ascienden debe evitar el lavado de la biomasa, aunque también debe evitar la precipitación de los sólidos.

La tecnología de los digestores UASB, permite una alta reducción de la DQO en efluentes muy diluidos, con porcentajes de materia seca inferiores al 1%. Otro punto de interés, es que mediante este sistema se logra reducir el TRH, lo que reduce el volumen de la unidad significativamente. En este sentido, es una alternativa eficiente para industrias que generan grandes caudales de efluente con alto contenido de sólidos y DQO. Una de las desventajas que presenta, es el largo tiempo que puede llevar la puesta en marcha hasta que se forma el manto de lodos con los microorganismos anaeróbicos (FAO, 2019).

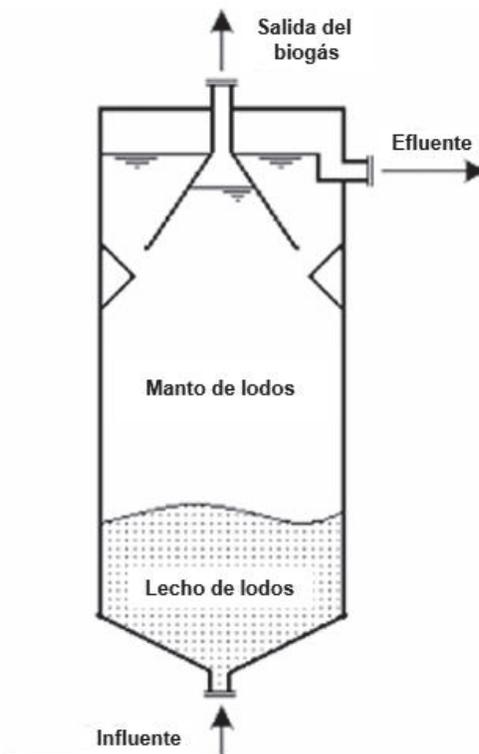


Figura 4.5. Esquema de biodigestor UASB. Modificado de Chernicharo (2007)

Semihúmedo sin manejo del sustrato

Esta tecnología se utiliza con mezcla de alimentación con un porcentaje de materia seca de entre el 25-30%. Son adecuados para trabajar con FORSU, sustratos con bajo contenido de humedad o en zonas con baja disponibilidad de recursos hídricos para diluir las mezclas. Los diseños de estos reactores pueden ser tanto de flujo vertical como horizontal (FAO, 2019).

Secos sin manejo del sustrato

En el caso de querer procesar sustratos con alto contenido de sólidos (hasta 50%), existen sistemas denominados como "bioceldas". Estos consisten en una serie de celdas hermetizadas mediante portones, lo que garantiza las condiciones de anaerobiosis. Es importante el manejo de los lixiviados, los que se recirculan de modo de mantener la humedad óptima para el desarrollo de las comunidades de microorganismos (FAO, 2019).

4.6. Productos de la biodigestión anaeróbica

La degradación de la materia orgánica por las comunidades de microorganismos anaeróbicos tiene como subproductos el biogás, correspondiente a la fracción que se volatiliza, y el digerido. A continuación se desarrollan las características de cada uno, así como sus potenciales usos y destinos.

4.6.1. Biogás**Composición química**

La composición química del biogás depende estrictamente de las características del sustrato de alimentación, de la temperatura del proceso y de la tecnología empleada. Los componentes que lo conforman, bajo diferentes proporciones, son CH₄ (45-70%), CO₂ (25-45%), H₂S (5.000-50.000 ppm), H₂ (< 5.000 ppm), N₂ (< 5%), O₂ (< 5%) y vapor de H₂O (FAO, 2019).

Las proporciones de los diferentes componentes del biogás, es lo que determina su poder calorífico y, por ende, de la energía que se podrá obtener mediante su combustión. El metano es el principal determinante del poder calorífico. Su poder calorífico inferior (PCI) varía entre 19-26 MJ/Nm³. Si bien es menor al de otros gases, es suficiente para usarse en calefacción, cocinas, e incluso grupos electrógenos y turbinas para la generación de energía eléctrica y térmica.

Purificación del biogás

El biogás tal como se genera, puede combustionarse sin ningún tipo de depuración o tratamiento. De todas maneras, hay ciertas impurezas que deben removerse para garantizar la vida útil de los equipos. Estos son el vapor de agua y el sulfuro de hidrógeno. En el caso del biogás obtenido en rellenos sanitarios, es fundamental también eliminar siloxanos. La remoción del dióxido de carbono se justifica, en el caso de que se quiera obtener biometano para inyectar a una red de distribución de gas natural (FAO, 2019).

Eliminación del vapor de agua

En instalaciones industriales, se emplean sistemas para secar el biogás mediante sistemas de enfriamiento (*chillers*) (ver figura 4.6), adsorción en carbón activado o sílica gel, o absorción en soluciones de glicol o sales higroscópicas. Debido a su simplicidad y menor costo operativo, el sistema más empleado es el de enfriamiento (FAO, 2019).



Figura 4.6. Sistema *chiller* para el secado del biogás. Obtenido de FAO (2019)

Remoción del sulfuro de hidrógeno

La importancia de la remoción del sulfuro de hidrógeno no solo radica en su naturaleza como compuesto tóxico, si no también en sus efectos corrosivos sobre cañerías y equipos. De acuerdo a FAO (2019) los métodos más utilizados son:

- **Agregado de cloruro ferroso o férrico con la alimentación del biodigestor:** produce la formación de sales insolubles que luego precipitan.
- **Agregado de oxígeno (microaireación):** consiste en el suministro de aire a tasas muy bajas en el *headspace* del reactor para permitir el desarrollo de microorganismos reductores del sulfuro de hidrógeno.
- **Filtros por absorción:** se hace pasar el biogás en contracorriente por columnas de absorción con una solución de hidróxido de sodio, lo que da lugar a la formación de Na_2S
- **Filtros por adsorción:** el sulfuro de hidrógeno es absorbido en superficies de materiales tales como carbón activado, silicagel, limaduras de hierros, entre otros.
- **Filtros biológicos:** son filtros en los cuales se desarrolla una biota capaz de remover el sulfato de hidrógeno mediante oxidación.

Eliminación del dióxido de carbono

La purificación de este compuesto se justifica en los casos en los cuales se quiera obtener biometano para la inyección en la red de gas natural. Algunos de los métodos que se pueden utilizar son el lavado químico con soluciones acuosas de aminas, solubilización del dióxido de carbono mediante lavado con agua bajo presión, separación con membranas, entre otros (FAO, 2019).

Almacenamiento del biogás

La mayoría de los biodigestores y plantas de biogás están diseñados para consumir el gas generado diariamente. Por este motivo, operan a baja presión (4-25 mbar) sin necesidad de compresión. El biogás se utiliza en calefacción, calderas para generación de vapor, producción de electricidad o cogeneración térmica (FAO, 2019).

El almacenamiento se lleva a cabo en gasómetros, los cuales mantienen una presión constante dentro del biodigestor y en la línea de consumo. Esto permite compensar fluctuaciones en la producción y garantizar el suministro en períodos no operativos. Según FAO (2019), existen diversos sistemas que pueden implementarse para este propósito, entre ellos:

- **Cámara de biogás en el biodigestor:** es el sistema más simple. Almacena el biogás en el headspace del reactor. Su mayor inconveniente es que no permite mantener constante la presión del biogás.
- **Gasómetro de campana flotante:** son principalmente empleados en biodigestores domiciliarios. Se utiliza una campana hidráulicamente sellada que almacena el biogás. Este método permite garantizar la presión constante.
- **Gasómetro de membrana:** sistema utilizado para el almacenamiento del biogás a presión constante. Suele estar montado sobre el biodigestor (ver figura 4.7.A) o en una platea de concreto (externo) (ver figura 4.7.B). Pueden ser de membrana simple o doble membrana. Lo más comunes son los últimos, los cuales tienen una membrana exterior y una interior que suele ser de PVC. Dicho material es resistente al ataque químico e impermeable al metano.

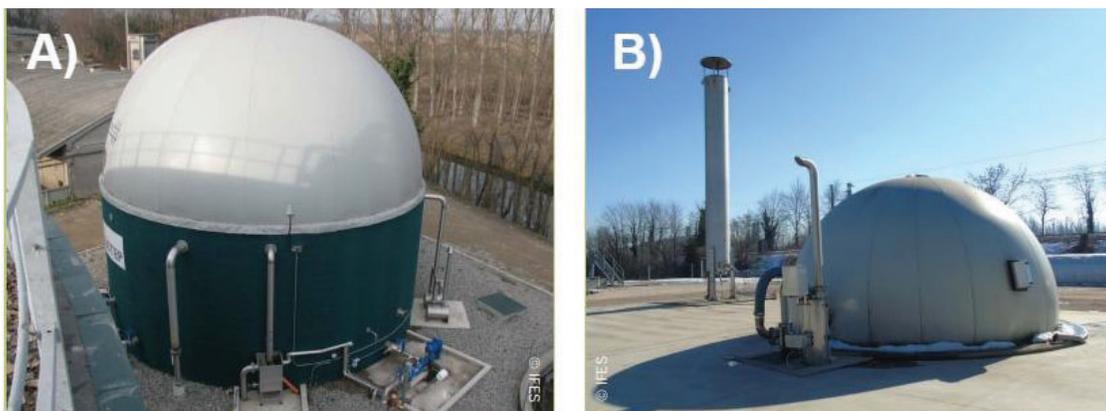


Figura 4.7. Diferentes configuraciones de gasómetros. Obtenido FAO (2019)

Usos del biogás

El biogás producido puede ser usado para diferentes fines empleando un amplio rango de equipos. Entre ellos se puede mencionar la combustión directa, la generación eléctrica y térmica (ver figura 4.8), la generación eléctrica mediante motores Otto, generación eléctrica con microturbinas, entre otros. Dentro del abanico de posibilidades, la forma más eficiente de utilizar el biogás en una central es realizando cogeneración eléctrica-térmica (CHP).

La cogeneración permite producir electricidad y energía calorífica en un mismo proceso. De este modo, es posible lograr eficiencias de hasta el 90% de la energía contenida en el biogás. Este alto porcentaje se debe a que se recupera el calor de los sistemas del motor y aceite, y de los gases de escape. En centrales de biogás que producen energía eléctrica para inyectar a la red, el empleo de CHP logra recuperar parte del calor para emplearlo en la calefacción de la mezcla en el biodigestor (FAO, 2019).



Figura 4.8. Motor cogenerador de energía eléctrica y térmica. Obtenido de FAO (2019)

4.6.2. Digerido

El digerido es la mezcla que se obtiene a la salida del biodigestor una vez transcurrido el tiempo de permanencia del sustrato de alimentación definido por diseño. Mediante tratamientos físicos, es posible separar del mismo una fracción líquida y una fracción sólida. En algunos casos, la fracción líquida puede ser vertida a un cuerpo de agua, aunque previamente requiere de un tratamiento secundario para cumplir con los parámetros de vuelco. El digerido, por otro lado, puede destinarse para su uso agronómico. En este caso, se pueden aplicar las fracciones por separado o directamente.

La calidad y composición de los digeridos depende del sustrato de alimentación del biodigestor, de la tecnología utilizada como reactor, y la operación. En el caso de que el digerido tenga como fin su uso agronómico, es preciso conocer ciertos parámetros de calidad para determinar la dosis y momento para su aplicación. La cantidad de líquido a utilizar en un terreno, se define en base a los kilogramos de nitrógeno por hectárea que se desea aplicar (FAO, 2019).

Tal como se mencionó, el digerido puede pasar por un tratamiento físico para separar las fracciones sólida y líquida. Algunas de las tecnologías que se pueden emplear son los lechos de secado, separadores rotativos, separadores helicoidales, separadores gravimétricos, centrífugas, entre otros. La elección dependerá de la disponibilidad de espacio, la cantidad de líquido y el porcentaje de sólidos.

Para poder utilizar el digerido en los periodos de mayor requerimiento por parte de los cultivos, es importante contar con un sistema de almacenamiento. Este debe garantizar la estanqueidad para evitar la percolación de líquido al suelo o cursos de agua subsuperficiales o superficiales. Pueden ser tanques de hormigón armado o acero, o lagunas impermeabilizadas con geomembranas (FAO, 2019).

Capítulo 5. Ensayo de Potencial Bioquímico Metanogénico

5.1. Introducción

En el siguiente capítulo se desarrolla el marco teórico y la experiencia de los ensayos de laboratorio realizados con el objetivo de generar información experimental. Durante las pruebas se realizó la determinación de parámetros fisicoquímicos de los sustratos purín de cerdo y cladodios de nopal (*Opuntia ficus-indica*), así como de su potencial bioquímico metanogénico. El objetivo fue obtener datos propios de los sustratos para realizar una evaluación más precisa al momento de definir la relación de codigestión a adoptar para el diseño de la planta.

5.2. Ensayo de Potencial Bioquímico Metanogénico

El ensayo de Potencial Bioquímico Metanogénico es una técnica experimental que permite evaluar el potencial de producción de metano a partir de efluentes y residuos sólidos orgánicos que en las últimas décadas ha ganado popularidad. La prueba consiste en mezclar un sustrato con inóculo anaeróbico, generalmente obtenido de un biodigestor en funcionamiento. Esta mezcla se coloca dentro de botellas equivalentes a reactores *batch* que incuban a temperaturas en el rango mesofílico y termofílico. En el proceso se genera biogás, al cual se le extrae el CO₂ y se termina obteniendo metano. El PBM se calcula a partir del volumen de metano cuantificado, que es estandarizado sobre la masa de sólidos volátiles o masa de DQO del sustrato (Filer et al, 2019).

Con la mejora en la complejidad y los modelos matemáticos para describir el proceso de la degradación anaerobia, se ha evidenciado que la información obtenida de los ensayos *batch* puede ser usada para predecir el comportamiento de biodigestores anaeróbicos a mayor escala. Uno de los principales problemas en torno de los ensayos de PBM es la falta de un procedimiento estandarizado para su realización. En las últimas décadas se ha intentado avanzar en este propósito, lo que dió como resultado la elaboración diferentes procedimientos con este fin (Angelidaki et al, 2009; V.D.I., 2016), aunque sin haber un criterio unificado todavía (Filer et al, 2019). La falta de una armonización en la metodología tiene como consecuencia una alta variabilidad en los resultados así como una baja comparabilidad.

Con el fin de garantizar la reproducibilidad y la representatividad de los resultados del ensayo de PBM, se han relevado las metodologías y criterios en torno al mismo. En los ítems a continuación se desarrollan los puntos más importantes que justifican el desarrollo experimental llevado a cabo para este proyecto.

5.2.1. Metodologías de medición del biogás

El ensayo de PBM es realizado en reactores batch a pequeña escala que contienen la mezcla de inóculo y sustrato. Dentro de los reactores ocurren las reacciones de degradación de la materia orgánica (ver sección 4.2) y consecuentemente se genera el biogás como subproducto. Es condición que, durante el tiempo que dure el ensayo, se garantice la hermeticidad con el fin de evitar el ingreso de aire.

Diferentes autores y grupos de investigación han reportado a lo largo de los años distintas metodologías para la cuantificación del volumen de biogás generado durante el proceso de biodigestión anaerobia. Las metodologías reportadas pueden clasificarse en *método manométrico*, *método volumétrico*, *método por cromatografía gaseosa* y *método caudalímetro* (Holliger et al, 2016; V.D.I, 2016; Bres et al., 2022). Cabe destacar que el método de medición del gas elegido, define el diseño del sistema de reactor experimental a utilizar. A continuación, se describe con detalle la implementación del método manométrico y dos alternativas para el volumétrico por su simplicidad y fácil acceso de los materiales.

Método manométrico (MM)

De acuerdo a Bres et al (2022), este método se fundamenta en la medición de la presión ejercida por el biogás que se acumula en el *headspace* del reactor. La presión se cuantifica empleando un manómetro que se inserta al interior del reactor (ver figura 5.1.A). Con el valor de la presión es posible determinar el volumen de biogás empleando la ley de los gases ideales.

Una vez que se mide la presión, se recomienda ventilar y liberar el gas que se había acumulado. De esta manera, el reactor queda listo para una siguiente medición del biogás. Un factor a tener en cuenta, es que la presión dentro del reactor no puede superar los 3 bar. Presiones iguales o superiores pueden producir la explosión del reactor así como el aumento de la solubilidad del CO₂ y, por ende, la disminución del pH del medio (Holliger et al, 2016).

Método volumétrico por jeringa (MVJ)

La medición del biogás se realiza conectando una jeringa invertida en la tapa del reactor. La presión dentro del *headspace* desplaza el émbolo de la jeringa hasta que se iguala la presión interna del reactor a la presión atmosférica (ver figura 5.1.B). El volumen de desplazamiento es equivalente al volumen de biogás generado (Bres et al, 2022).

Una de las ventajas que presenta este método es su sencillez. La segunda, es que minimiza las presiones dentro del reactor y, por ende, evita la solubilización del CO_2 . Un tercer punto a favor es que se reducen las posibilidades de fugas por las pocas conexiones entre instrumentos.

En relación a las desventajas, se destaca que para realizar la medición es necesario retirar el reactor de la incubación, induciendo un cambio en la temperatura del medio con la posible influencia en la medición del biogás. Por otro lado, el émbolo a emplear debe estar en buenas condiciones para que el se desplace correctamente y no se generen fugas.

Método volumétrico por desplazamiento (MVD)

De acuerdo a Bres et al. (2022), este método se basa en que el biogás producido se conduce hacia un sistema colector externo con agua o una solución, que desplaza un volumen de líquido en un reservorio invertido (ver figura 5.1.C). El volumen desplazado es igual al biogás generado.

Este procedimiento para la medición del biogás se caracteriza por ser una técnica sencilla de implementación y de bajo costo. Respecto de las desventajas que presenta, es preciso señalar la posible subestimación del biogás medido por la solubilización del CO_2 en el líquido del sistema colector (Filer et al, 2019). Otra desventaja no menor, es la posibilidad de fugas en las conexiones.

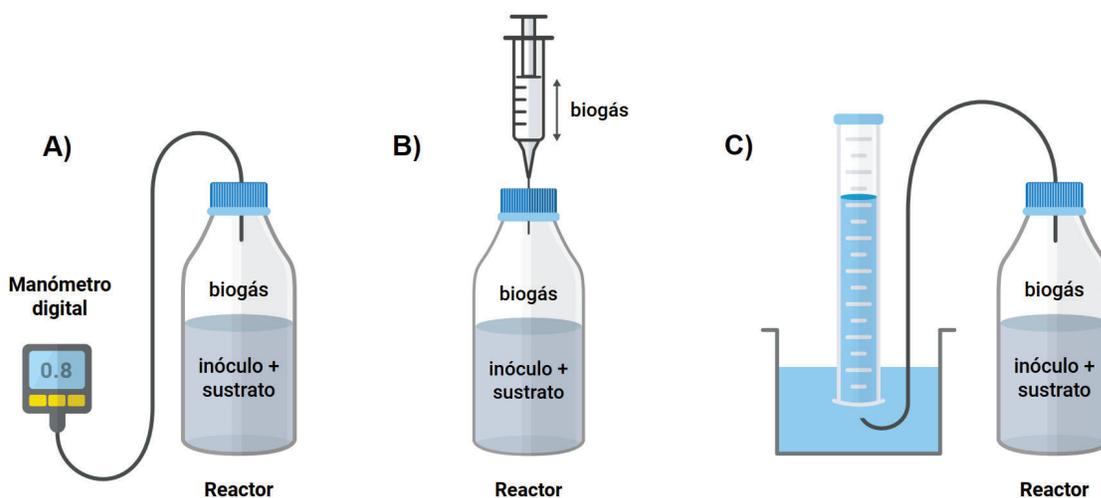


Figura 5.1. Ejemplos comunes de sistemas de medición del biogás. Obtenido de Bres et al. (2022)

5.2.2. Metodologías de medición del metano

Si bien es fundamental poder cuantificar el volumen de biogás producido por la degradación anaeróbica de un sustrato orgánico, en el caso de que se esté estudiando la degradación para el aprovechamiento energético, es necesario conocer la producción de metano a partir de dicho sustrato. Esto se debe a que es el componente que aporta el poder calorífico del biogás durante su combustión. Se estima que el porcentaje típico de CH₄ en el biogás se encuentra entre el 50 y el 70%.

Existen varias técnicas disponibles para la medición del metano. Una de ellas es la cromatografía gaseosa, la cual permite la identificación y cuantificación del CO₂ y el CH₄, así como de otros gases traza, con alta resolución y sensibilidad. Una segunda alternativa para la medición del metano aunque con menor resolución, consiste en la captura del CO₂ haciendo pasar el biogás por una trampa de solución alcalina. Dicha solución puede ser de NaOH, KOH o LiOH, y se aconseja una concentración mayor o igual a 3 M, lo que garantiza una purificación óptima del biogás (Maile et al, 2017). Según el sistema a emplear (ver sección 5.2.1), la implementación experimental puede variar. El fundamento de esta técnica se detalla en la reacción 5.1 que explica la captura del CO₂ por acción de los iones OH⁻.



Una de las configuraciones más prácticas para implementar la medición del metano empleando una trampa de solución alcalina, es la del método volumétrico por desplazamiento. En este caso, el gas que es purificado del CO₂ luego de pasar por la trampa, es conducido al sistema colector externo. El volumen desplazado por la presión del gas acumulado en el interior del reservorio, es equivalente al metano generado (ver figura 5.2)

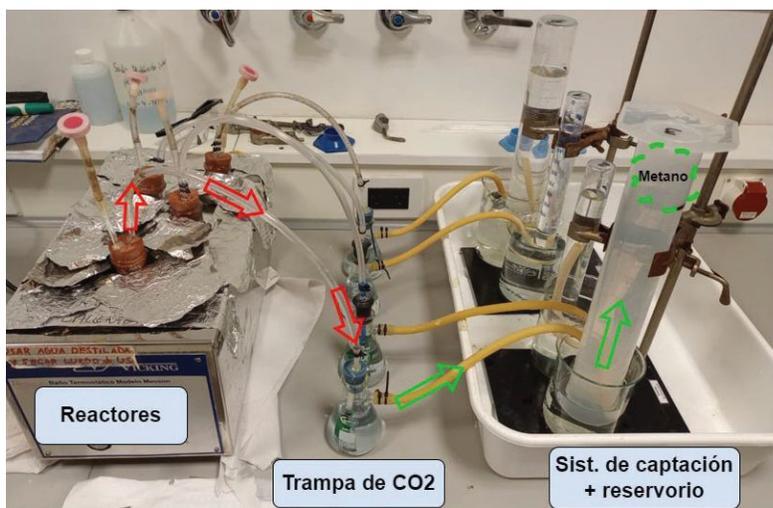


Figura 5.2. Medición del metano generado empleando el MVD en conjunto con una trampa de CO₂.

En rojo se marca la conducción del biogás, mientras que en verde se marca la conducción y acumulación del metano. Elaboración propia

5.2.3. Inóculo

El origen del inóculo a emplear en un ensayo de PBM es un punto fundamental que afecta a la variabilidad de los resultados de la prueba. De acuerdo a Holliger et al (2016), el inóculo a emplear debe ser extraído de un biodigestor anaeróbico activo, de manera que se garantice una alta diversidad de microorganismos capaces de degradar la variedad de moléculas orgánicas. Por otro lado, según este mismo autor, los tipos de inóculo a emplear recomendados son los provenientes de plantas de tratamiento de aguas residuales o el digerido producto de la biodigestión anaeróbica de purines de ganadería. Vale destacar que no es necesario que el inóculo esté adaptado al sustrato a ensayar, aunque en caso de contar con uno, puede contribuir a la reducción del tiempo de la prueba.

El inóculo a emplear debe ser fresco si se quiere conservar sus propiedades originales. Si fuese necesario almacenarlo, se recomienda hacerlo a una temperatura de 4°C. En caso de no disponer material para su correcto almacenamiento, se lo puede hacer a temperatura ambiente (alrededor de los 22°C), preferentemente hasta una semana. Pasada esta ventana de tiempo, se ha demostrado empíricamente que la actividad del inóculo desciende a una tasa constante. Esto puede tener como consecuencia resultados de PBM menores a los esperados (Astals et al, 2020).

A pesar de que el inóculo a emplear cumpla con las condiciones de origen y conservación descritas anteriormente, es necesario realizar pruebas de calidad del mismo con el fin poder garantizar resultados representativos. Los parámetros a verificar se pueden clasificar como *fisicoquímicos* y de *actividad metabólica*.

Calidad del inóculo: parámetros fisicoquímicos

El objetivo de la caracterización de la calidad del inóculo de acuerdo a parámetros fisicoquímicos radica en verificar que se garanticen las condiciones óptimas en el medio del mismo para que se pueda degradar la materia orgánica y producir biogás. En la tabla 5.1 se enumeran y describen los parámetros básicos de calidad y sus valores recomendados. Para mayor información sobre estos parámetros referirse a la sección 4.3.

Tabla 5.1. Parámetros fisicoquímicos de calidad del inóculo anaeróbico, valores límites y descripción

Parámetro	Valor recomendado	Referencias
Aspecto	-	Bres et al., 2022
Concentración de sólidos totales (ST)	< 10 gST _{inoc} /gInoc	V.D.I, 2016; Drogg, 2013
Concentración de sólidos volátiles (SV)	1,5-2 gSV _{inoc} /gInoc	V.D.I, 2016
	gSV _{inoc} /gST _{inoc} > 0,5	V.D.I, 2016
pH	7-8,5	Holliger et al. (2016); Chernicharo, 2007
Nitrógeno amoniacal (NH₄⁺)	< 2500 mg _{N-NH₄} /l	Holliger et al. (2016) y Sarker et al., 2019
Ácidos grasos volátiles (AGV)	< 1000 mg _{CH₃COOH} /l	Holliger et al. (2016) y Sarker et al., 2019
Alcalinidad (ALK)	> 3000 mg _{CaCO₃} /l	Holliger et al. (2016); Chernicharo, 2007
FOSTAC³	Proceso estable: < 0,3 Proceso inestable: > 0,8	Drogg, 2013

³ Debido a que no es posible comparar relaciones FOSTAC entre plantas, es difícil estandarizar los rangos óptimos. Entre 0,3 y 0,8, se considera que el proceso es estable, pero cuanto más se acerque al límite superior se va volviendo más inestable (Drogg, 2013)

Calidad del inóculo: Actividad metabólica. Ensayo de AME

El ensayo de actividad metanogénica específica (AME o SMA, por sus siglas en inglés), consiste en la evaluación de la capacidad máxima de las bacterias metanogénicas de convertir compuestos orgánicos solubles en CO_2 y el CH_4 (Chernicharo, 2007). Si bien son numerosas las reacciones de degradación de la materia orgánica que ocurren durante el proceso de digestión anaeróbica, existe un particular interés en estudiar las que involucran a la comunidad de bacterias metanogénicas por su alta sensibilidad a las condiciones del medio (Silveira, 2000).

En la práctica, para la realización del ensayo se emplea acetato de sodio como sustrato y se trabaja en el rango de temperaturas de mayor actividad de las bacterias mesofílicas (20-40 °C). De esta manera se garantiza evaluar la actividad de las bacterias mesofílicas, las cuales son capaces de ingresar el acetato y convertirlo en CO_2 y el CH_4 . La cuantificación del AME se realiza tomando la pendiente máxima de producción de metano, la cual se expresa como $\text{ml}_{\text{CH}_4}/\text{d}$. Luego se normaliza por la masa total de SV_{Inoc} . Finalmente, se sugiere expresarlo en términos de $\text{g}_{\text{DQO}}/\text{gSV}_{\text{Inoc}}\text{d}$, habiendo realizado las conversiones de unidades correspondientes (Chernicharo, 2007). De acuerdo a Angelidaki et al (2009), se considera una actividad aceptable para un barro semisólido (no granular) si el $\text{AME} > 0,1 \text{ g}_{\text{DQO}}/\text{gSV}_{\text{Inoc}}\text{d}$.

5.2.4. Sustrato

Composición del sustrato

La variedad de sustratos orgánicos que se pueden usar para la producción de biogás y/o metano abarca a los residuos industriales, los agrícolas y forestales, la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos (FORSU), efluentes domiciliarios y lodos de plantas de tratamiento, y residuos ganaderos. De acuerdo a sus características fisicoquímicas, diferirán en la producción y composición del biogás (Bres et al, 2022).

La composición química del sustrato a evaluar en términos de carbohidratos, proteínas, lípidos, celulosa, hemicelulosa y lignina es un factor importante a la hora de evaluar el rendimiento potencial de la generación de biogás o metano. Sustratos con altos contenidos de compuestos poco biodegradables, entre ellos la lignina, han mostrado tener potenciales de generación de metano bajos (ver tabla 5.2). La presencia de metales pesados y/o compuestos inhibidores también puede afectar el rendimiento de producción de metano (Bres et al, 2022).

Tabla 5.2. Efecto de la composición del sustrato en el potencial de generación de metano. Elaborado a partir de Meneses Quelal & Velazquez Martí (2020)

Sustrato	Celulosa [%]	Lignina [%]	Hemicelulosa [%]	PBM [ml _{CH4} /gSV _{sust}]
<i>Purín de cerdo</i>	22,0	9,8	22,0	111,0
<i>Purín de cerdo</i>	15,9	1,8	16,7	377,0
<i>Estiércol vacuno</i>	17,9	18,2	15,7	206,9
<i>Estiércol vacuno</i>	23,5	8,0	12,8	270,0
<i>Estiércol avícola</i>	37,2	8,4	25,5	163,2
<i>Estiércol avícola</i>	44	1,7	11,8	410,0

Otro factor a considerar del sustrato es la disponibilidad de nutrientes. El nitrógeno, el fósforo y el azufre constituyen los elementos básicos de la biomasa microbiana y por lo tanto es necesario que se encuentren disponibles para su correcto desarrollo. El rango óptimo de C/N se encuentra entre 20 y 40 (Tabatabaei & Ghanavati, 2018; Filer et al., 2019; Bres et al, 2020). Igual de importante es la presencia de micronutrientes como el hierro, níquel, molibdeno y cobalto entre otros. Mayormente, los residuos complejos contienen estos micronutrientes en concentraciones suficientes para no tener que adicionarlos de manera externa (Bres et al, 2020).

Algunos sustratos pueden contener sustancias inhibitorias del proceso de la biodigestión anaeróbica. Entre estas sustancias, se pueden mencionar al nitrógeno amoniacal libre (NH₄⁺), el sulfuro de hidrógeno (H₂S) y los metales pesados como el cromo (Cr). A esta lista, se le pueden sumar los agroquímicos, desinfectantes y antibióticos por sus efectos negativos sobre el metabolismo de los microorganismos anaeróbicos (Bres et al, 2020).

En concreto, el rendimiento de biogás y/o metano está directamente relacionado a la composición y degradación de la materia orgánica y la potencial presencia de compuestos que puedan inhibir la actividad microbiana. En la práctica, la materia orgánica capaz de ser degradada se la cuantifica en términos de SV (SSV si la matriz es líquida) o DQO. El análisis de composición elemental del sustrato es una caracterización de interés alternativa (Bres et al, 2020; Holliger et al, 2016).

Estado del sustrato

El sustrato a ensayar en el test de PBM debe encontrarse en las condiciones lo más representativas posibles de lo que sería una operación a mayor escala. De esta manera, es recomendable que el sustrato cumpla con una serie de requisitos que abarcan desde la toma de muestra hasta la conservación.

En cuanto al muestreo del sustrato, el mismo debe ser representativo de la fuente de la cual se obtiene. Es por ello que se sugiere seguir metodologías estandarizadas que garanticen esta condición. La norma V.D.I. 4630 (2016) ofrece un procedimiento de muestreo aceptado por diferentes autores tal como Holliger et al (2016). En caso de que la muestra presente sólidos de gran tamaño como piedras, arena o piezas de plástico, deberán ser removidas.

El tamaño de los materiales que componen el sustrato a analizar pueden afectar la cinética y velocidad de generación del biogás, debido a que esto influye sobre la superficie de contacto de los microorganismos sobre la materia orgánica. Con el objetivo de analizar la máxima capacidad de generación, Holliger et al (2016) sugiere procesar las muestras hasta que las partículas poseen un tamaño menor a 10 mm. Los detalles del procedimiento empleado deben ser provistos con el fin de garantizar la reproducibilidad de los resultados.

Al igual que con el inóculo, el sustrato a emplear debe ser fresco. En caso de que no sea usado en las primeras 24 hs luego de extraído, puede ser almacenado hasta 5 días a una temperatura de 4 °C (Holliger et al, 2016). Si fuese necesario, conservar la muestra por periodos prolongados, una opción es su congelamiento o su almacenamiento al vacío (V.D.I., 2016).

Algunos sustratos, tal como se ha desarrollado previamente, presentan en su composición complejos lignocelulósicos recalcitrantes a la degradación por los microorganismos anaerobios. Estos disminuyen su rendimiento de biogás y, por ende, de metano. Esta situación ha motivado el desarrollo y aplicación de diferentes pretratamientos que vuelven disponible la materia orgánica para su degradación. Las técnicas pueden clasificarse en físicas, bioquímicas, químicas o una combinación de ellas (Bochmann & Montgomery, 2013). Es pertinente aclarar que el potencial de generación obtenido del ensayo es válido para el sustrato bajo una condición de pretratamiento, y las metodologías empleadas deben detallarse para garantizar su reproducibilidad.

Concentración del sustrato

De acuerdo a Bres et al (2022), la concentración del sustrato es uno de los parámetros de mayor importancia al momento de diseñar un ensayo de PBM. La norma V.D.I. 4630 (2016) sugiere que para garantizar una adecuada transferencia de masa, la concentración de ST dentro de la mezcla sustrato-inóculo sea menor al 10% m/m. De esta manera, la concentración de ST del sustrato debe ser menor a este porcentaje para garantizar dicha condición.

5.2.5. Condiciones experimentales

Con el objetivo de garantizar la reproducibilidad y la comparabilidad de los resultados obtenidos en un ensayo de PBM, es necesario establecer valores fijos y/o rangos para diferentes parámetros del ensayo. Es condición, además, de que se cumplan los requisitos del inóculo y el sustrato descritos en las secciones 5.2.3 y 5.2.4, respectivamente. A continuación se describen los parámetros más importantes y los rangos recomendados.

Temperatura

El ensayo de PBM puede realizarse tanto bajo condiciones mesofílicas como termofílicas. Las temperaturas de incubación típicas para ambos casos son 35/37°C y 55°C, respectivamente. En caso de que se desee evaluar el potencial de generación de metano de un sustrato con un inóculo cuya operación ocurre a una temperatura diferente, se deberá adoptar esta temperatura en el ensayo Holliger et al (2016).

Los sistemas para mantener la temperatura necesaria del ensayo son diversos. Uno de los más comunes, y generalmente utilizado, es un baño termostático. Este sistema permite mayor libertad para el seguimiento y manipulación de los reactores.

pH

El pH de la mezcla de inóculo y sustrato debe mantenerse cercano a la neutralidad durante el ensayo. Un pH bajo puede producir la acumulación de AGV, y un pH alto a un aumento de la concentración de nitrógeno amoniacal libre. En ambos casos, la degradación del sustrato a evaluar, se verá afectada como consecuencia de la inhibición de las bacterias metanogénicas (Bres et al, 2022). Ante esta posible situación, es importante medir el pH previo al inicio del ensayo y corregir con solución ácida o básica según corresponda.

Relación inóculo-sustrato (RIS)

Un buen balance entre microorganismos y sustrato asegura la eficiente biodegradabilidad del mismo bajo condiciones anaeróbicas. Una carga baja de sustrato se traducirá en una baja actividad metabólica y por ende una baja producción de biogás. En cambio, si la carga de sustrato es demasiada alta, la generación del biogás y su cuantificación será más confiable, pero puede dar como resultado una inhibición del proceso degradativo por acumulación de sustancias inhibitorias. Ante la posibilidad de alguna de estas situaciones, la relación inóculo-sustrato (RIS o ISR, por sus siglas en inglés) es un parámetro clave del ensayo de PBM (Bres et al, 2022; Holliger et al, 2016).

La relación entre el inóculo y el sustrato con el que se carga el reactor, se calcula sobre la base de los SV (ver sección 5.6). Si bien el rendimiento de metano es independiente al RIS (Raposo et al, 2011), según Holliger et al (2016), la masa total correspondiente al inóculo debe ser mayor que la del sustrato para evitar la acidificación del medio y la consecuente alteración del proceso de biodegradación. De esta manera, el rango recomendado varía entre 1 y 4. Para sustratos de fácil biodegradación se recomiendan relaciones mayores o igual a 4 para evitar la acumulación de intermediarios que puedan inhibir el proceso de degradación de la materia orgánica. En caso de sustratos de difícil degradación, como los lignocelulósicos, se recomiendan relaciones menor o igual a 1.

Con el ánimo de armonizar la realización de los ensayos de PBM, se sugiere trabajar con valores altos de RIS. Teniendo en cuenta que pruebas con una $RIS \geq 2$ no han presentado condiciones de inhibición, Raposo et al. (2011) propone dicha relación para la estandarización de los resultados.

Agitación

La agitación de los reactores puede realizarse de diferentes maneras: manual, agitadores magnéticos, agitadores orbitales, agitación mecánica, entre otros. De acuerdo a Raposo et al. (2011), los factores principales a considerar de la agitación elegida durante el ensayo son la intensidad y la duración.

Según el mismo autor, el efecto de la agitación durante la biodigestión anaeróbica es contradictorio. Por una lado, la agitación favorece el contacto entre el sustrato y los microorganismos, así como la liberación del biogás que se va generando y acumulado en la cámara de gas. Por otro lado, una agitación excesiva puede romper los *flocs* o gránulos de microorganismos, dificultando la interacción entre las diferentes comunidades de microorganismos que componen el agregado.

De acuerdo a Wang et al (2017), en el caso de muestras de mayor viscosidad la agitación a 160 rpm de forma continua garantiza la mayor producción de metano diaria. Para el caso de sustratos de menor viscosidad, no es necesario agitar o con una agitación diaria de manera manual es suficiente.

Blanco y control

El montaje experimental de la realización de un ensayo de PBM debe incluir un blanco y uno o más controles. El blanco consiste en un reactor cargado únicamente con inóculo, mientras que el control en la incubación del inóculo con un sustrato estándar cuyo rendimiento teórico es conocido. Tanto el control como el blanco se exponen a las mismas condiciones de operación y ambientales de los reactores con el sustrato a evaluar. En el caso del control, se debe emplear el mismo RIS del sustrato en análisis (Bres et al, 2022)

La inclusión del blanco tiene como fin cuantificar el volumen de metano generado por la degradación de la materia orgánica remanente en el inóculo. Al finalizar el ensayo, este volumen debe ser restado de la producción total generada por el sustrato a evaluar (Filer et al, 2019).

El empleo de un control en el ensayo de PBM permite evaluar la precisión del ensayo así como validar la medición del gas. Los sustratos estándares empleados comúnmente son la celulosa y la gelatina. La celulosa se puede emplear para evaluar restos o residuos agrícolas y biorresiduos municipales. En cambio, la gelatina es preferible para residuos proteicos como carnes o derivados animales y residuos similares. De acuerdo a Holliger et al (2016), el control debe ser rechazado en caso de que el valor de PBM obtenido se encuentre por fuera del rango entre el 85% y el 100% del valor teórico (ver tabla 5.3).

Tabla 5.3. Tabla resumen sustratos control y PBM teórico. Elaborado a partir de Bres et al (2022)

Sustrato control	PBM teórico [ml _{CH₄} /gSV _{sust}]	Sustrato de análisis
Celulosa	414	Restos o residuos agrícolas y biorresiduos municipales
Gelatina	433	Residuos proteicos como carnes o derivados animales

Volumen de *headspace* y condiciones anaeróbicas

Un aumento de la presión en el interior del reactor puede derivar en un aumento de la solubilización del CO₂ con la consecuente caída del pH del medio. Esto puede afectar los resultados del PBM del sustrato a evaluar. Un factor a considerar frente a esta situación potencial es el volumen de la cámara de gas o volumen de *headspace*, particularmente cuando se emplea el método manométrico. Los volúmenes comúnmente utilizados se encuentran en el rango entre el 20-60% sobre el volumen total del reactor (Bres et al, 2022)

Previo al inicio del ensayo de PBM es necesario asegurar condiciones de anaerobiosis dentro del reactor. En este sentido, se recomienda la realización de pruebas de estanqueidad para verificar que no haya fugas. Por otro lado, una metodología complementaria que se puede implementar es el barrido del oxígeno (*flushing*) en el *headspace*. Los gases más utilizados para realizar el barrido son el nitrógeno molecular (N₂), el dióxido de carbono (CO₂), el helio (He), alguna de sus combinaciones o en forma pura como en el caso del nitrógeno. De acuerdo a Bres et al (2022) no existe un consenso claro sobre el flujo y la duración del procedimiento.

Nutrientes

La operación óptima de un biodigestor anaeróbico requiere de concentraciones balanceadas de C:N:P:S(~600:15:5:1), macronutrientes (K, Na, Ca y Mg) y metales traza (Fe, Zn, Mn, entre otros). La falta de alguno de estos elementos, puede derivar en una inhibición del proceso (Filer et al, 2019).

En la mayoría de los casos, no resulta claro si la mezcla de inóculo y sustrato tiene suficientes nutrientes o si es necesario suplementarlos. En situaciones en las cuales el inóculo proviene de barros anaeróbicos de un biodigestor, no es necesario adicionar nutrientes. Puede ocurrir también que, ante un exceso de nutrientes, pueda haber inhibición de los microorganismos (Filer et al, 2019).

Frecuencia de registros y fin del ensayo

La frecuencia con que se debe registrar el volumen de gas generado debe ser pautado y organizado previamente al inicio del ensayo. De acuerdo a Bres et al. (2022), se recomienda hacer más de una medición diaria durante la primera semana. Luego, es posible reducir la frecuencia a una o dos veces por semana. La frecuencia con que se toman los registros también depende del sistema de medición del metano generado.

Respecto del tiempo de incubación, *a priori* no debe ser fijado. El tiempo del ensayo va a depender de qué tan biodegradable sea el sustrato a ensayar, aunque generalmente suele extenderse entre los 30 y 60 días (Bres et al, 2022). Los plazos, igualmente, pueden variar llegando incluso a acortarse. Un criterio a considerar para finalizar el ensayo es el propuesto por V.D.I (2016) y Holliger et al (2016), el cual consiste en dar por terminada la prueba cuando la generación diaria de metano sea menor al 1% del volumen acumulado por tres días consecutivos.

5.2.6. Cálculos

A continuación se describen las ecuaciones más importantes para el desarrollo experimental y el cálculo del potencial de metano de los sustratos en análisis.

Sólidos totales (SV), Sólidos Fijos y Sólidos Volátiles (ST)

La caracterización del inóculo y el sustrato en términos de concentración de los sólidos, se llevó a cabo siguiendo la metodología APHA 2540 G. A continuación se describen las ecuaciones empleadas para su cálculo.

Sólidos Totales

$$ST = \frac{P_E - P_T}{m_m} \quad \text{Ecuación 5.1}$$

Donde:

ST : Concentración de sólidos totales [g/g o g/mL]

P_E : Peso estufa [g]

P_T : Peso tara [g]

m_m : Masa de la muestra [g]

Sólidos fijos y volátiles

$$SF = \frac{P_M - P_T}{m_m} \quad \text{Ecuación 5.2}$$

$$SV = ST - SF = \frac{P_E - P_M}{m_m} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

Donde:

SV : Concentración de sólidos volátiles [g/g o g/mL]

P_E : Peso estufa [g]

P_M : Peso mufla [g]

SF : Concentración de sólidos fijos [g/g o g/mL]

Calculo de masa de sustrato y masa de inóculo

La cantidad de masa de inóculo y sustrato, a volumen fijo de mezcla en el reactor, se calcula a partir de la concentración de SV de cada uno de ellos y la relación I/S adoptada de acuerdo a Bioprocess Control (2016). Es importante aclarar que se asume que la densidad de la mezcla es igual a 1 kg mezcla/ L mezcla.

$$m_T = m_S + m_I \quad \text{Ecuación 5.4}$$

$$I/S = \frac{m_{IS} SV_I}{m_S SV_S} \quad \text{Ecuación 5.5}$$

$$m_I = \frac{m_T \frac{I}{S} SV_S}{SV_I + \frac{I}{S} SV_S} \quad \text{Ecuación 5.6}$$

$$m_S = m_T + m_I \quad \text{Ecuación 5.7}$$

Donde:

m_T : Masa total de la mezcla I-S [g]. Se asume una densidad de la mezcla igual a 1 kg/l

m_I : Masa de inóculo [g]

m_S : Masa de sustrato [g]

I/S : Relación inóculo-sustrato

SV_S : Concentración de sólidos volátiles del sustrato [g/g]

SV_I : Concentración de sólidos volátiles del inóculo [g/g]

Cálculo del PBM

El PBM del sustrato se calcula a partir del volumen acumulado de metano normalizado por la masa total de SV del sustrato agregado. El volumen de metano producido por el sustrato debe ser corregido por el volumen del blanco. A continuación se muestra la expresión para su cálculo propuesta por Bioprocess Control (2016).

$$PBM = \frac{V_{CH_4,IS} - V_{CH_4,I}}{m_S \cdot SV_{S,M}} = \frac{V_{CH_4,IS} - V_{CH_4,B} \frac{m_{I,M}}{m_{I,B}}}{m_S \cdot SV_{S,M}} \quad \text{Ecuación 5.8}$$

Donde:

PBM : Potencial bioquímico metanogénico [mlCH_4/gSV]

$V_{CH_4,IS}$: Volumen acumulado de metano generado en el reactor que contiene el sustrato más el inóculo [mlCH_4]

$V_{CH_4,I}$: Volumen acumulado de metano producido por el inóculo [mlCH_4]

$V_{CH_4,B}$: Volumen acumulado de metano del reactor blanco [mlCH_4]

SV_S : Concentración de sólidos volátiles del sustrato [gSV]

SV_I : Concentración de sólidos volátiles del inóculo [gSV]

$m_{S,M}$: Masa de sustrato en el reactor con muestra [g]

$m_{I,M}$: Masa total de inóculo en el reactor con muestra [g]

$m_{I,B}$: Masa total de inóculo en el reactor del blanco [g]

Corrección por flushing

Con el objetivo de evitar la sobrestimación de la generación de metano, en el caso de que se realice un barrido de la atmósfera en el volumen de *headspace* con un gas inerte, se debe corregir el volumen total de metano registrado por volumen de sobreestimación. Este valor se calcula a partir de la siguiente ecuación adaptada de Bioprocess Control (2016).

$$V_{SE} = X_{CO_2}^{HS} V_{HS} \frac{P_{HS} T_{Norm}}{P_{Norm} T_{HS}} \quad \text{Ecuación 5.9}$$

Donde

V_{SE} : Volumen de metano sobrestimado [mlCH_4/gSV]

$X_{CO_2}^{HS}$: Fracción molar de CO_2 en la mezcla de gases en el *headspace*

V_{HS} : Volumen de *headspace* [ml]

P_{HS} : Presión en el *headspace* [kPa]

T_{Norm} : Temperatura normal [273 K]

P_{Norm} : Presión normal [1 kPa]

T_{HS} : Temperatura en el *headspace* [K]

5.2.7. Evaluación cualitativa

En algunos casos, no resulta fácil distinguir el origen de las anomalías en los ensayos. En ciertas ocasiones, pueden deber a problemas en la fermentación, y en otras a diversos factores. Un problema común, es cuando la biomasa no es capaz de degradar inmediatamente a la materia orgánica provista como sustrato. En el caso de inhibición, esta suele ser limitada en el tiempo y tiene como resultado la desaceleración del proceso de degradación.

De acuerdo a cómo se desarrolle el proceso de conversión del sustrato en biogás/metano y subproductos, la curva de medición del gas generado neto va a variar. Según V.D.I. (2016), se pueden distinguir cuatro tipos de comportamientos comunes:

- **Normal:** los sustratos que son fácilmente biodegradables, la curva de biogás generado se caracteriza por una marcada pendiente al principio.
- **Degradación retardada:** sustancias que se degradan con dificultad (ej, sustancias con lignina o grasas) exhibe un retraso en el inicio del periodo de máxima tasa de generación de gas. La forma de esta curva puede estar dada por una leve inhibición del proceso.
- **Diauxia:** la degradación ocurre en dos etapas, y la forma de la curva adquiere un aspecto escalonado.
- **Inhibición:** la inhibición del proceso da como resultado un valor neto de generación de gas.

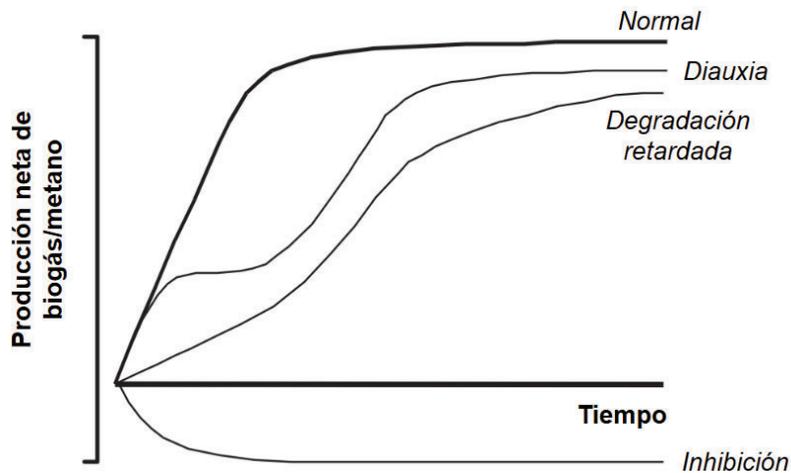


Figura 5.3. Comportamientos típicos de las curvas de generación neta de gas. Elaborado a partir de V.D.I (2016)

5.3. Ensayos de laboratorio

Con el fin de contar con datos experimentales para la realización del análisis para la elección de la relación de codigestión del sustrato de alimentación del biodigestor, se han llevado a cabo ensayos experimentales. Los ensayos involucraron realizar la caracterización de parámetros fisicoquímicos del purín de cerdo y de cladodios de nopal, y evaluar el potencial de generación de metano de los sustratos de forma independiente, así como la codigestión de los mismos.

Los ensayos para el presente proyecto final fueron realizados en el laboratorio del Departamento de Evaluación y Control de la Contaminación del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (DEyCC-INTI). Dicho departamento se encuentra en la sede del Parque Tecnológico Migueletes (PTM), el cual posee un convenio con la Universidad Nacional de San Martín (UNSAM).

5.3.1. Desarrollo experimental

Inóculo

El inóculo empleado utilizado para la realización de los ensayos fue obtenido de la cámara de almacenamiento de digerido de un reactor anaeróbico que procesa residuos de frutas y hortalizas de un mercado concentrador. Una vez muestreado, fue transportado a temperatura ambiente. Su almacenamiento también se realizó a temperatura ambiente debido a que iba a ser usado en los días posteriores al muestreo.

Previo al inicio de los ensayos, el inóculo fue caracterizado en términos de ST y SV siguiendo la metodología descrita en la norma APHA 2540 G, pH, Alcalinidad, AGV y FOSTAC. Una vez finalizadas estas primeras pruebas, se realizó la prueba de AME del inóculo de acuerdo a Astals et al (2015).

Sustratos

Los sustratos a los cuales se evaluó su PBM fueron purín de cerdo, pencas de cactus *Opuntia ficus-indica* y el sustrato de codigestión que fue preparado a partir de una mezcla de los dos anteriores. Los sustratos fueron enviados desde la provincia de La Rioja, y fueron transportados en su correspondiente heladera refrigerante para evitar su descomposición. El correcto almacenamiento, entre las caracterizaciones y la largada del ensayo PBM, se garantizó guardando la muestra en una heladera a una temperatura menor a 4 °C.

La muestra de purín recibida estaba constituida por tres partes iguales de los efluentes de las fosas de almacenamiento de las naves de gestación, maternidad y engorde. Dicha muestra no recibió ningún tipo de pretratamiento previo a su uso en los ensayos. A este sustrato se le asignó la denominación *purín de cerdo* (ver figura 5.4).



Figura 5.4. Purín de cerdo en cápsula de cerámica. Elaboración propia

Las pencas o cladodios de nopal recibidas se encontraban enteras. Para su utilización en los ensayos, fueron procesadas mecánicamente en una picadora de la marca Moulinex Modelo AR6863AR durante 5 minutos, el cual fue suficiente para obtener un sustrato homogéneo. El sustrato obtenido del procesamiento de las pencas de cactus fue denominado como *cactus opuntia* (ver figura 5.5).



Figura 5.5. Cladodios de cactus *Opuntia ficus-indica*. Cladodios sin procesar (izquierda). Pencas procesadas en cápsula de cerámica (derecha). Elaboración propia

El sustrato de codigestión fue elaborado mezclando los sustratos purín de cerdo y cactus opuntia en una proporción 1:1 en términos de masa de sustrato. Este sustrato no recibió ningún tratamiento adicional. La denominación que se le asignó a este sustrato fue la de *purín + cactus 50:50* (ver figura 5.6).



Figura 5.6. Sustrato de codigestion en cápsula de cerámica. Elaboración propia

Una vez listos los sustratos fueron caracterizados en términos de los ST, SV y pH. En el caso del sustrato cactus opuntia, para la medición del pH se preparó una suspensión al 10 % m/v debido a su consistencia semisólida. Respecto del sustrato purín + cactus, el valor de la concentración de sólidos fue calculado a partir de los resultados obtenidos para los sustratos independientes.

Medición del metano

El ensayo de PBM fue llevado a cabo empleando el equipo AMPTS-II (por las siglas de *Automatic Methane Potential Test System*) de la marca Bioprocess Control (BPC) el cual se halla en el laboratorio del DEyCC-INTI. El sistema para la medición del metano del equipo consiste en el método volumétrico el cual ha sido adaptado para la medición en forma continua. El biogás que se genera en el interior del reactor, compuesto principalmente por una mezcla de CH_4 y CO_2 , es conducido a una trampa de CO_2 , y luego a un sistema formado por una tecla cuyo desplazamiento en sentido vertical permite cuantificar el metano generado (ver figura 5.7). El principio de funcionamiento consiste en que al acumularse suficiente metano en cada una de las teclas, las mismas pueden vencer la presión de la columna de agua en la cual están sumergidas, y desplazarse. Cada tecla está calibrada según un volumen definido, de forma que cada pulso es equivalente a dicho volumen, que posteriormente se reporta normalizado.

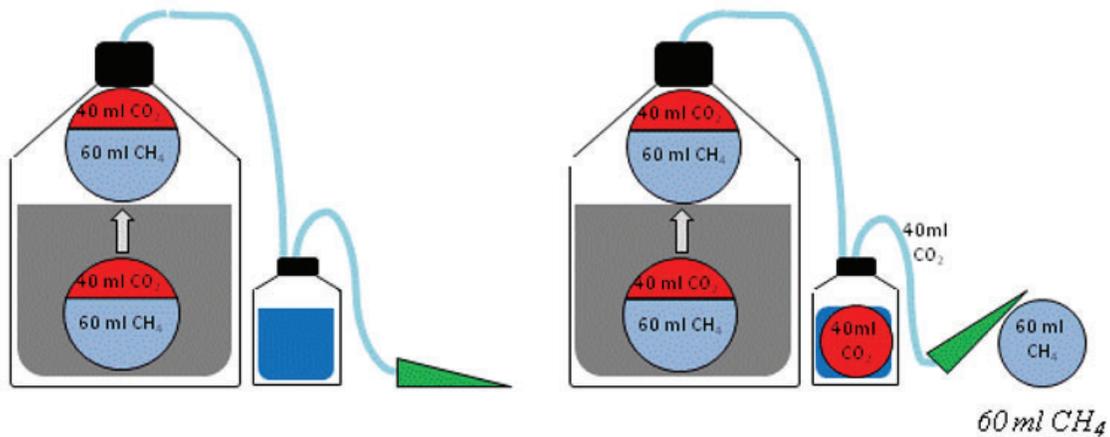


Figura 5.7. Demostración del principio de medición del metano en equipo AMPTS-II. Obtenido de Bioprocess Control (2013)

Los diferentes instrumentos que conforman el equipo AMPTS-II se pueden dividir en tres unidades: A, B y C (ver figura 5.8). La unidad A (unidad de incubación) consiste en un baño termostatzado en el cual se ubican los reactores con el inóculo, el sustrato y la mezcla de ambos de acuerdo a la prueba a realizar. El equipo cuenta con espacio para un total de 15 reactores. Cada uno de los reactores posee un cabezal con un agitador el cual es configurado desde el software. La unidad B (unidad de captura del CO₂) contiene los frascos con las soluciones trampa, una para cada reactor de la unidad A. La unidad C (unidad de medición) contiene el sistema de medición del metano de acuerdo al principio explicado anteriormente. A medida que se registran los pulsos por desplazamiento de las teclas, la unidad cuenta con un sistema integrado de adquisición de los datos generados. De esta forma, los datos pueden ser extraídos para su posterior procesamiento y análisis.



Figura 5.8. Unidades que componen el equipo AMPTS-II. Obtenido de Bioprocess Control (s.f.)

Condiciones de ensayo PBM

Para el desarrollo del ensayo de PBM se aprovechó toda la capacidad del equipo AMPTS-II, que permite hasta 15 reactores funcionando en simultáneo. De esta manera se pudieron incluir en una misma tanda los blancos y controles necesarios, así como las pruebas con los sustratos por triplicado (ver figura 5.9). Los detalles de la carga de los reactores se pueden encontrar en el anexo 5.1.

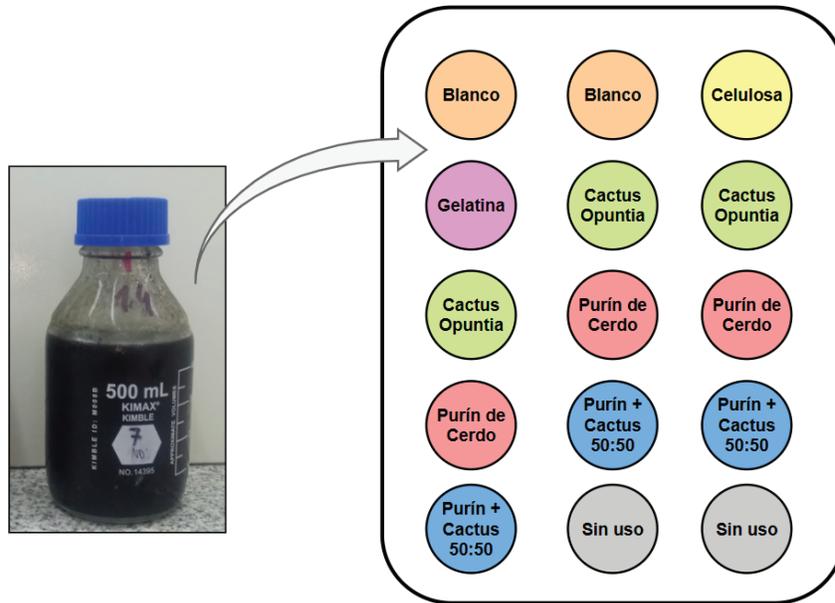


Figura 5.9. Ejecución del ensayo de PBM en equipo AMPTS-II. Reactor cargado con la mezcla de inóculo y sustrato (izquierda). Esquema de la unidad A del equipo AMPTS-II durante la realización de los ensayos de PBM (derecha)

A continuación se describen las condiciones fijadas para el desarrollo del ensayo de PBM. Estas condiciones se adecuaron en su mayoría a las definidas en los esfuerzos por estandarizar la metodología tal como ha hecho Holliger et al. (2016).

- **Volumen útil del reactor:** 400 ml
- **Volumen de headspace:** 100 ml
- **Inóculo:** previo al inicio del ensayo el inóculo se almacenó a temperatura ambiente y no fue preincubado.
- **Temperatura del baño:** 37 °C
- **Réplicas:** el blanco se ejecutó por duplicado, los controles fueron únicos, mientras que los sustratos se evaluaron por triplicado.
- **Control:** se empleó celulosa microcristalina y gelatina sintética como sustratos de control.
- **pH mezcla:** se verificó que el pH de la mezcla inóculo-sustrato fuese entre 7 y 8.
- **Agitación:** se garantiza la agitación y homogeneización de la mezcla en los reactores mediante agitadores automáticos programado para activación intermitente cada 28 minutos, durante 2 minutos a 160 rpm con cambio de sentido de giro en cada activación.
- **RIS:** tanto en los controles como en los sustratos se adoptó una RIS igual a 2.
- **Barrido del headspace:** se barrió la atmósfera en el volumen de headspace con N₂ de 99,999% de pureza.
- **Duración del ensayo:** el ensayo se dió por finalizado una vez que la generación de metano de los controles y el sustrato fuese menor al 1% por tres días consecutivos.

Digerido

Una vez finalizado los ensayos de acuerdo al criterio definido para su terminación, los digeridos de los sustratos evaluados fueron unificados y homogeneizados. De este *pool* obtenido se separaron submuestras para su caracterización en términos de ST, SV, pH, y remoción de sólidos.

5.3.2. Resultados

Inóculo

Las caracterizaciones hechas al inóculo empleado en los ensayos de PBM respondieron a la necesidad de verificar que los parámetros más importantes estuvieran dentro de los rangos de calidad sugeridos (ver sección 5.2.3) además de contar con los datos para el cálculo de inóculo a colocar en los reactores. En la tabla 5.4 se vuelcan los resultados obtenidos. A partir de estos, y comparándolos con los rangos recomendados para los diferentes parámetros de la tabla 5.1, se puede afirmar que el inóculo se hallaba en condiciones óptimas para la realización del ensayo.

Tabla 5.4. Resultados de la caracterización del inóculo utilizado en los ensayos de PBM

Parámetro	Unidad	Valor
<i>pH</i>	-	7,48
<i>ST</i>	$\text{gST}_{\text{Inoc}}/\text{g}_{\text{Inoc}}$	0,0315
<i>SV</i>	$\text{gSV}_{\text{Inoc}}/\text{g}_{\text{Inoc}}$	0,0189
<i>SV/ST</i>	-	0,6
<i>ALK</i>	$\text{mg}_{\text{CaCO}_3}/\text{l}$	4000
<i>AGV</i>	$\text{mg}_{\text{CH}_3\text{COOH}}/\text{l}$	500
<i>FOSTAC</i>	-	0,32
<i>AME</i>	$\text{g}_{\text{DQO}}/\text{gSV}_{\text{Inoc}}\text{d}$	0,29

Sustratos

Las caracterizaciones del sustrato tuvieron como objetivo principal obtener los datos necesarios para el cálculo de la cantidad de masa a colocar en el reactor y la normalización del volumen de metano para el cálculo del PBM. En la tabla 5.5 se vuelcan los resultados obtenidos.

Tabla 5.5. Resultados de la caracterización de los sustratos estudiados en los ensayos de PBM

Sustrato	<i>pH</i>	<i>ST</i> [$\text{gST}_{\text{Sust}}/\text{g}_{\text{Sust}}$]	<i>SV</i> [$\text{gSV}_{\text{Sust}}/\text{g}_{\text{Sust}}$]	Densidad [kg/l]	Observaciones
<i>Purín de Cerdo</i>	7,33	0,017	0,011	1	-
<i>Cactus Opuntia</i>	5,34 ⁴	0,137	0,106	0,88	-
<i>Purín + Cactus 50:50</i> ⁵	6,83	0,077	0,059	S/D	$\text{gSV}_{\text{PdeC}}/\text{gSV}_{\text{CO}} = 9,8$

⁴ El pH se midió a partir de una suspensión de la muestra 10 % m/v

⁵ Los valores de ST y SV se calcularon de forma teórica a partir de los resultados de los sustratos independientes

Volumen de metano y PBM

Durante el transcurso de un ensayo de PBM, la información que se obtiene y registra es el volumen de metano generado. En el caso del equipo AMPTS-II, al realizar la medición en forma continua, se logra obtener una mayor cantidad de datos, lo cual permite apreciar la cinética del proceso. En total, el ensayo tuvo una duración de 20 días. Una vez finalizado, se extrajeron los datos a nivel horario para su posterior análisis e interpretación.

Un primer análisis que se realizó a partir de graficar el volumen neto generado de metano para el blanco, los controles y los sustratos (ver figura 5.10). Esto permitió hacer una evaluación cualitativa del proceso de degradación en condiciones anaerobias de los sustratos en estudio. A partir de los gráficos es posible observar que no hubo inhibición del proceso (volumen de $\text{CH}_4 < 0$), y que las diferencias en las curvas se debió a la mayor o menor biodegradabilidad propia de los sustratos analizados.

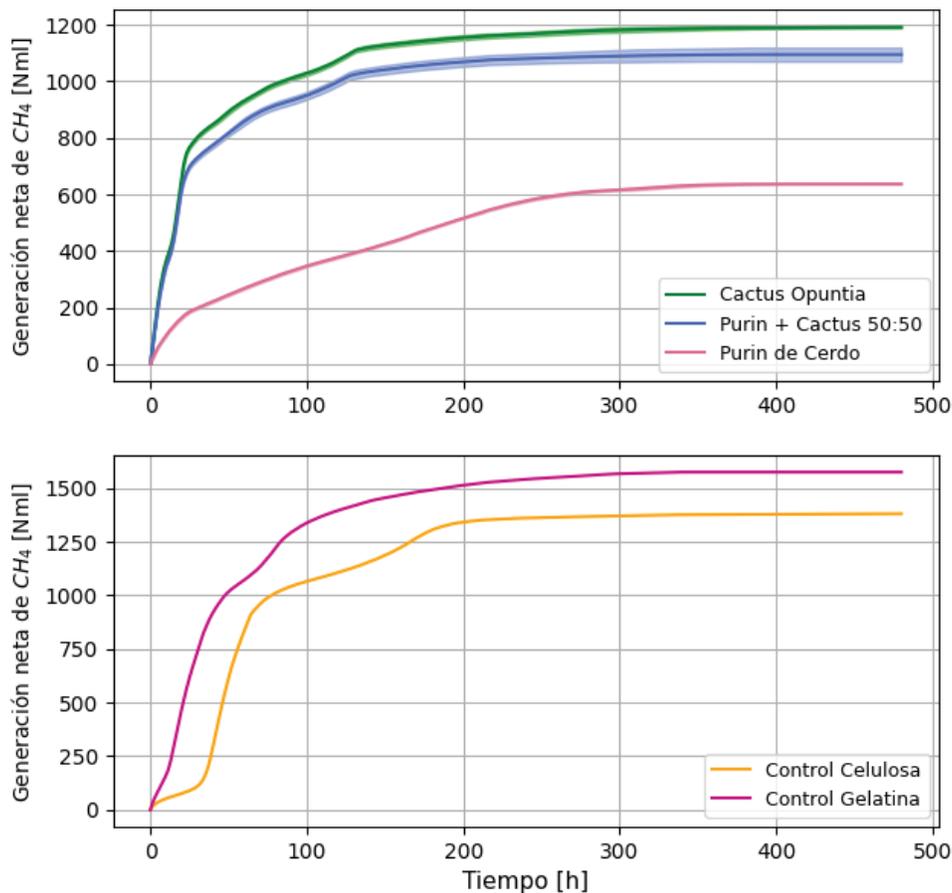


Figura 5.10. Gráfico de volumen acumulado neto de CH_4 , definido el volumen neto en función del tiempo de ensayo. En línea continua se grafican los valores medios para los casos con réplicas y en sombreado el desvío estándar punto a punto. En el gráfico superior se incluyen los registros para los sustratos en estudio, mientras que en el gráfico inferior los registros de los controles. Elaboración propia

Empleando el último valor registrado de volumen neto, el cual es equivalente al máximo volumen de metano medido, se calculó el PBM para los sustratos en estudio y los de control. Para ello, dichos volúmenes fueron primero corregidos por el volumen de sobreestimación (ver ecuación 5.9) y luego se los normalizó por unidad de masa de SV del sustrato colocado en el reactor. Finalmente se obtuvo el PBM promedio y su desvío estándar para los casos en los cuales se realizaron réplicas. En la tabla 5.6, se vuelcan los resultados.

Tabla 5.6. Resultados del cálculo del PBM para los sustratos control y en estudio

Sustrato	PBM promedio [Nml _{CH4} /gSV _{Sust}]	Desvío estándar [Nml _{CH4} /gSV _{Sust}]
<i>Purin de Cerdo</i>	256,7	0,9
<i>Cactus Opuntia</i>	295,3	0,8
<i>Purin + Cactus 50:50</i>	288,2	9,0
<i>Celulosa</i>	326,4	s/ réplicas
<i>Gelatina</i>	374,8	s/ réplicas

Digerido

Una vez dado por finalizado el ensayo de PBM, el digerido obtenido como subproducto de la biodigestión de los sustratos en estudio, fue caracterizado en términos de su pH, ST, SV, y remoción de sólidos. Para ello, se unificó y homogeneizó el digerido de las réplicas. Los resultados se plasman en la tabla 5.7.

Tabla 5.7. Resultados caracterización de los digeridos

Digerido	pH	ST [gST _{Dig} /gDig]	ST [gSV _{Dig} /gDig]	Remoción ST [%]	Remoción SV [%]
<i>Purin de Cerdo</i>	S/D	S/D	S/D	S/D	S/D
<i>Cactus Opuntia</i>	7,71	0,032	0,018	22,0	32,4
<i>Purin + Cactus 50:50</i>	7,68	0,030	0,017	22,0	31,2

Capítulo 6. Elección de la relación de codigestion óptima

6.1. Introducción

El presente trabajo tiene el carácter de prefactibilidad técnica para el proyecto de instalación de una planta de biogás destinada al procesamiento del purín de cerdo generado en las naves de cría de los animales, en codigestion con cladodios de nopal mecánicamente procesados. La mezcla de ambos sustratos, de ahora en adelante se denominará *sustrato de codigestión*. La viabilidad técnica de la planta a diseñar se ha definido bajo tres criterios que debe cumplir. En primer lugar, debe tener la capacidad de tratar la totalidad del purín generado diariamente. En segundo lugar, el balance de energía térmica del biodigestor debe ser positivo, evitando el consumo adicional de biogás para calefacción. Como resultado, tras descontar los consumos internos, se obtendría un excedente de energía eléctrica para su inyección y venta en la red de distribución. Por último, el área de cultivo de nopal requerida no debe superar la superficie disponible.

El dimensionamiento de las unidades de una planta de este tipo se realiza sobre la base del caudal volumétrico y la carga de sólidos a tratar. En este sentido, como primer paso se deben definir dichos parámetros. A su vez, para el presente caso, estos se encuentran determinados por la relación de codigestión entre los sustratos de alimentación del biodigestor. La elección de la proporción entre los sustratos, sobre la base de la masa total, responderá al criterio expuesto anteriormente. De esta forma, se garantizará que la planta tenga un balance de energía térmica positivo

Para el cómputo del balance de energía térmica, de acuerdo a los flujos de materia y energía de la figura 6.1, se contemplaron tres términos. El primero son las pérdidas de calor desde el interior del biodigestor hacia el ambiente que deberán ser compensadas. El segundo término, es el calor que deberá aportarse al sistema por el ingreso del sustrato a temperatura ambiente. Finalmente, el último término corresponde a la generación de energía térmica por la combustión del biogás empleando un equipo de cogeneración (CHP por sus siglas en inglés).

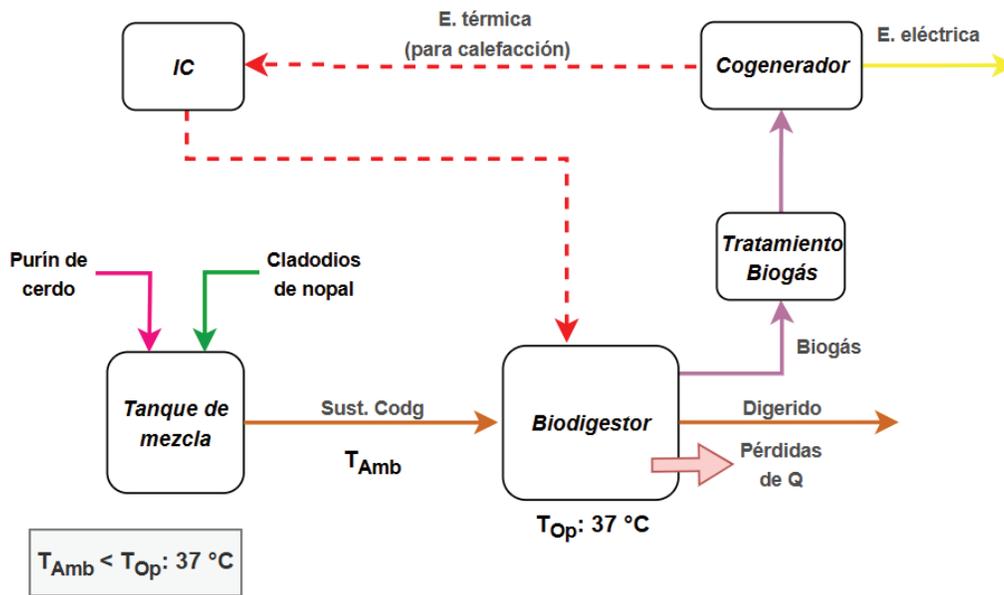


Figura 6.1. Esquema de la planta de biodigestión, unidades y flujos de energía calorífica considerados en el balance.

La metodología para determinar la proporción de codigestión entre el purín y los cladodios de nopal se basó en el cálculo y análisis teórico del balance energético para todas las relaciones de codigestión (*o relación Nopal/Sust. Mezcla*), y la elección de aquella permite cumplir con los criterios de viabilidad técnica definidos. Para tal fin, considerando el tratamiento de la totalidad del purín generado, primero se determinaron los caudales volumétricos y másicos de nopal a incorporar según las posibles relaciones de codigestión. Luego, conociendo las concentraciones, se calculó el caudal másico teórico de sólidos totales y volátiles de alimentación.

Con los datos de los caudales de sólidos, fue posible estimar la generación de metano y biogás. Para ello, los valores experimentales de PBM de los sustratos (ver Sección 5.3.2) se ajustaron a un modelo que permitió estimar la producción de metano y, asumiendo su composición, la de biogás para todas las relaciones de codigestión posibles. A partir de estos resultados, se pudo estimar la generación de energía eléctrica y térmica por la combustión de dicho gas.

A continuación, una vez determinados los caudales y el potencial de generación de biogás y energía, se calcularon los requerimientos térmicos de la planta. Como se mencionó anteriormente, estos dependen de las pérdidas de calor del biodigestor por intercambio con el ambiente y del calor necesario para calefaccionar el sustrato. La demanda energética estará determinada por la cantidad de sustrato a procesar y, en consecuencia, por el tamaño del biodigestor. A mayor dimensión, mayor será el área de intercambio térmico y, por lo tanto, mayores las pérdidas de calor a compensar.

Una vez obtenido el balance energético para todas las combinaciones evaluadas, se determinó a partir de qué proporción de codigestión el balance es positivo, asegurando el cumplimiento del criterio de viabilidad del proyecto. Finalmente, considerando las restricciones de espacio, se seleccionó la opción que requiere una superficie de cultivo de nopal dentro del área disponible. En la figura 6.2 se resume la metodología brevemente descrita anteriormente y que se desarrolla a lo largo de este capítulo.

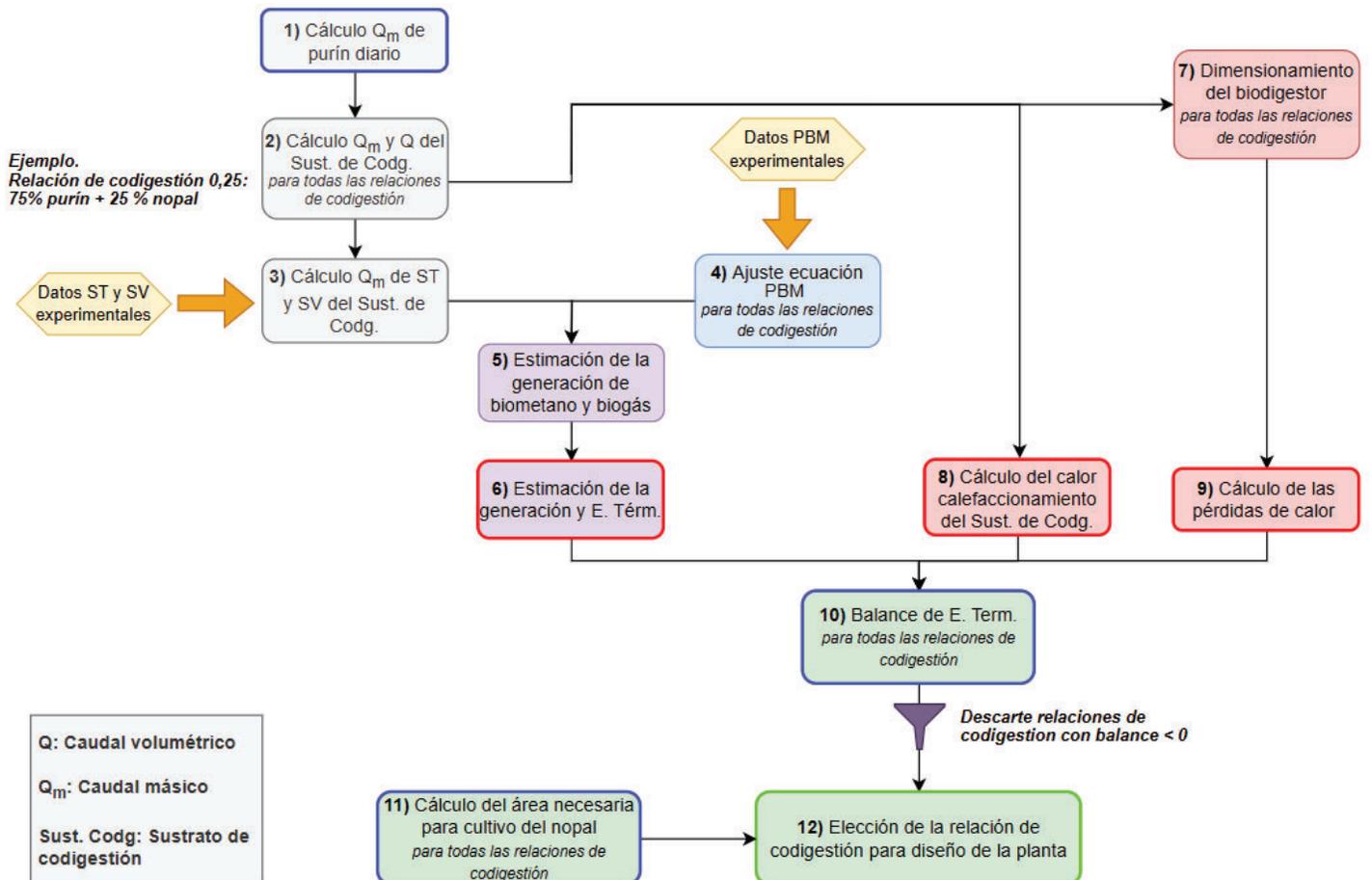


Figura 6.2. Resumen de la metodología para la elección de la relación de codigestión

6.2. Cálculo de generación de sustratos

6.2.1. Generación de purín de cerdo

Para estimar la cantidad de purín generado, se consideró un total de 13,320 animales, correspondiente al promedio de ejemplares en el establecimiento. Estos se encuentran distribuidos en cinco categorías según su tipo y estadio. La generación de purín por animal se calculó utilizando las relaciones propuestas por Millares (s.f.) y Maisonave et al. (s.f.). La tabla 6.1 presenta la información detallada sobre la generación de purín según la clasificación de los porcinos, así como el total estimado en función de la cantidad de animales del establecimiento.

Tabla 6.1. Distribución del total de porcinos según tipo y estadio, y generación de purín.

Tipo/estadio porcino	Generación de purín [kg/d animal] ⁶	Cantidad de cerdos [animal]	Generación de purín total [t/d]
<i>Cerdas en gestación</i>	21,5 ⁷	1200	25,80
<i>Cerdas en lactancia</i>			
<i>Lechones destetados</i>	1,4	3600	5,04
<i>25-100 kg</i>	7	8400	58,80
<i>Machos</i>	9	120	1,08
Total	-	13320	90,72

De acuerdo a los datos empleados y los cálculos planteados previamente, se estimó una generación diaria de 90,72 t de purín por día. Asumiendo una densidad de 1 t/m³, dicha generación en términos de caudal volumétrico se puede reexpresar como 90,72 m³/d. En cuanto a su composición, se adoptaron los resultados para su caracterización generados de forma experimental (ver sección 5.3.2).

⁶ Millares, s.f. y Maisonave s.f.

⁷ Se toma el valor promedio para ambos tipos de cerdas

6.2.2. Cálculo del nopal (*Opuntia ficus-indica*) a adicionar

El agregado de cladodios de nopal mecánicamente procesados responde a dos objetivos principales

- Mantener un pH óptimo para las bacterias metanogénicas y así evitar la inhibición por producción de amoníaco, y optimizar la relación C/N del sustrato a ingresar al biodigestor (Xie et al, 2009)
- Potenciar la generación de energía térmica y lograr un balance positivo

La cantidad de cladodios de nopal a ingresar junto al purín va a estar dada por la fracción de nopal sobre el total del sustrato de codigestión en términos de masa (*relación de codigestión o relación Nopal/Sust. Mezcla*). Siendo la masa de purín una cantidad fija, la masa de cladodios procesados a ingresar se calculó a partir de la ecuación 6.1. Los resultados de la cantidad de pencas de nopal necesaria, así como el caudal másico total, para las posibles relaciones de codigestión se muestran en el gráfico de la figura 6.2.

$$Q_{m,i}^{nopal} = \frac{Q_{m,purín} (100\% - \% purín_i)}{\% purín_i} \quad \text{Ecuación 6.1}$$

Donde:

$Q_{m,i}^{nopal}$: Caudal másico de nopal según relación Nopal/Mezcla Sust. (i) [t/d]. **Ver resultados en la figura 6.3**

$Q_{m,purín}$: Caudal másico de purín de cerdo generado. Valor: 90,72 t/d

$\% purín$: Porcentaje que representa el purín de cerdo sobre la masa total del sustrato de codigestión según relación Nopal/Mezcla Sust. (i). *Ejemplo: para $i = 0,1$, el $\% purín$ es equivalente al 90 % de la masa total del sustrato de codigestion.*

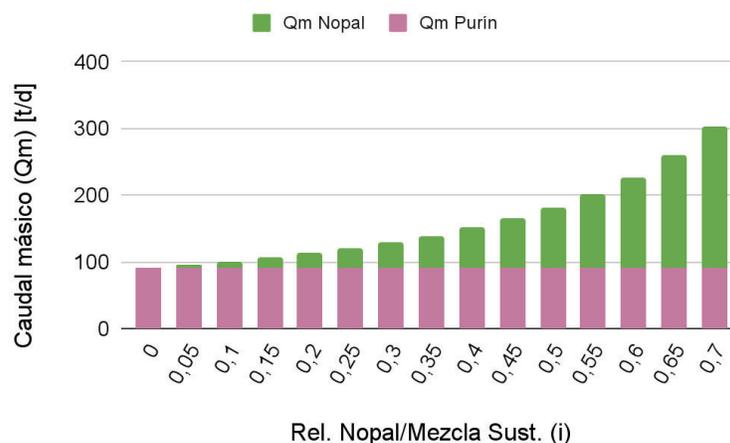


Figura 6.3. Caudal másico del sustrato de codigestion según la relación Nopal/Mezcla de Sustrato (i). Acotado entre las relaciones 0-0,7

6.2.3. Cálculo del sustrato de codigestión

El dimensionamiento del biodigestor, así como de las unidades y equipos anexos, depende del volumen y/o de la cantidad de sólidos a ingresar de forma diaria. De esta manera, es preciso calcular dichas cantidades de la manera más estricta posible. Habiendo determinado la generación diaria de purín, y el la masa de cladodios de nopal a adicionar de acuerdo a la relación de codigestion, se ha calculado el caudal de sustrato de codigestión mediante la ecuación 6.2. Los resultados obtenidos para las diferentes relaciones se muestran en el gráfico de la figura 6.4.

$$Q_{i, SustCodg} = \frac{Q_{m, purín}}{\rho_{purín}} + \frac{Q_{m, i}^{nopal}}{\rho_{nopal}} \quad \text{Ecuación 6.2}$$

Donde:

$Q_{i, SustCodg}$: Caudal volumétrico de sustrato de codigestión según relación Nopal/Mezcla Sust. (i) [m³/d]. **Ver resultados en la figura 6.4**

$Q_{m, purín}$: Caudal másico de purín de cerdo generado. *Valor: 90,72 t/d*

$Q_{m, i}^{nopal}$: Caudal másico de cladodios de nopal según relación Nopal/Mezcla Sust. (i) [t/d]. *Ver valores en la figura 6.3.*

$\rho_{purín}$: Densidad del purín de cerdo. *Valor: 1 t/m³ (ver tabla 5.5)*

ρ_{nopal} : Densidad de los cladodios de nopal. *Valor: 0,88 t/m³ (ver tabla 5.5)*

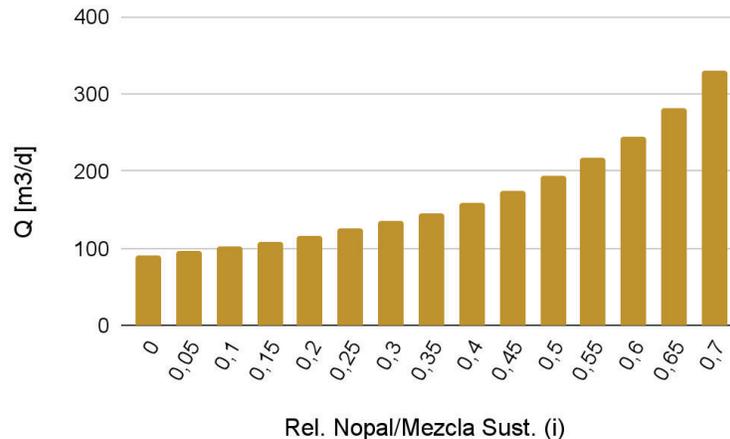


Figura 6.4. Caudal volumétrico del sustrato de codigestion según la relación Nopal/Mezcla de Sustrato (i). Acotado entre las relaciones 0-0,7

Habiendo calculado el caudal másico del sustrato de codigestión para las relaciones de codigestión posibles, se ha obtenido el caudal másico de sólidos mediante la ecuación 6.3. Los resultados de los caudales másicos tanto de sólidos totales como volátiles, se vuelcan en el gráfico de la figura 6.5.

$$Q_{S,i}^{SustCodg} = Q_{m,purín} S_{purín} + Q_{m,i}^{nopal} S_{nopal} \quad \text{Ecuación 6.3}$$

Donde:

$Q_{S,i}^{SustCodg}$: Caudal másico de sólidos totales o volátiles del sustrato de codigestión según relación Nopal/Mezcla Sust. (i) [tST/d]. **Ver resultados en la figura 6.5**

$Q_{m,purín}$: Caudal másico de purín de cerdo generado. *Valor: 90,72 t/d*

$Q_{m,i}^{nopal}$: Caudal másico de cladodios de nopal según relación Nopal/Mezcla Sust. (i) [t/d]. *Ver valores en la figura 6.3.*

$ST_{purín}$: Concentración de sólidos (totales o volátiles) del purín de cerdo. *Ver valores en tabla 5.5*

ST_{nopal} : Concentración de sólidos (totales o volátiles) de los cladodios de nopal. *Ver valores en tabla 5.5*

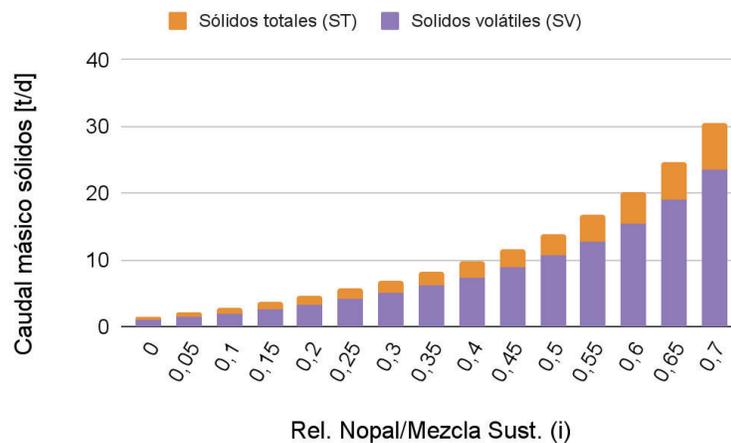


Figura 6.5. Caudal másico de sólidos (ST y SV) del sustrato de codigestión según la relación Nopal/Mezcla de Sustrato (i). Acotado entre las relaciones 0-0,7

6.3. Cálculo de la generación de biogás

La estimación del caudal de biogás a generar por la biodigestión anaeróbica de la mezcla de sustratos, se realizó sobre la base de los resultados obtenidos en el ensayo de PBM (ver tabla 5.6). Aunque no es recomendable extrapolar los resultados de un ensayo *batch* a un reactor que operará de manera continua, es posible utilizar esta información para obtener una primera aproximación que permita realizar un análisis de prefactibilidad técnica.

Bajo el criterio mencionado, se corrigieron los valores de PBM obtenidos experimentalmente por un factor de 0,8, correspondiente al 80% del total de volumen acumulado de metano (V_{80}). El tiempo en el que se generó el 80% del total de metano registrado (t_{80}) se utilizará posteriormente como criterio para el diseño del biodigestor (ver capítulo 8). Los resultados recalculados del volumen, se vuelcan en la tabla 6.2.

Tabla 6.2. Resultados del cálculo del PBM a partir del volumen total acumulado de metano y del volumen corregido.

Sustrato	$V_{m\acute{a}x}$ [Nml CH ₄]	$PBM_{m\acute{a}x}$ [Nml CH ₄ / gSV _{sust}]	V_{80} [Nml CH ₄]	PBM_{80} [Nml CH ₄ / gSV _{sust}]	t_{80} [d]
Purin de Cerdo	637,2	256,7	509,8	218,0	8,2
Cactus Opuntia	1191,8	295,3	953,4	241,1	2,8
Purin + Cactus 50:50	1095,5	288,2	876,4	236,1	2,6

Tal como se puede observar en la tabla anterior, únicamente se cuenta con datos de tres pruebas: purín de cerdo y cladodios de nopal (Cactus Opuntia) de manera independiente, y la codigestion bajo una relación 50:50 entre ambas. Ante esta situación, y frente a la necesidad de poder estimar el potencial de metano para todas las posibles relaciones de codigestion, se probó de ajustar los valores experimentales a diferentes funciones matemáticas.

El modelo que permitió ajustar los datos experimentales se obtuvo graficando en el eje Y el $PBM_{t_{80}}$, y en el eje X la relación de nopal sobre la masa total de la mezcla de codigestion (*Rel. Nopal/Sust. mezcla*). Como se puede observar en el gráfico de la figura 6.6, el valor de PBM_{80} obtenido para el purín monodigerido fue considerado como el correspondiente a la relación 0, el de codigestion 50:50 a la relación 0,5, y el de los cladodios de nopal monodigeridos a la relación 1. La función que mejor ajustó los datos fue la función logarítmica con un $R^2 = 0,995$ (ver ecuación 6.4).

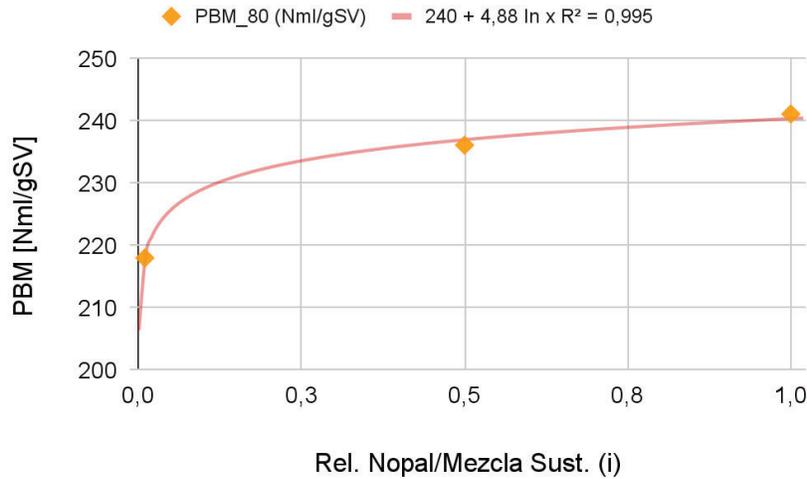


Figura 6.6. Ajuste de los datos de PBM_{80} a una función logarítmica. Acotado entre las relaciones 0-0,7

$$PBM_{SustCodg,i} = 240 \frac{Nml CH_4}{gSV_{Sust}} + 4,88 \ln(R_i) \quad \text{Ecuación 6.4}$$

$PBM_{SustCodg,i}$: Potencial de metano del sustrato de codigestión. Nopal/Mezcla Sust. (i)

[Nml_{CH4}/gSV_{Sust}]. **Ver resultados en la figura 6.6**

R_i : Relación de codigestión en base a la masa de nopal sobre la masa total del sustrato de codigestión. *Valores: 0-1*

Una vez hallada la función que permite estimar el potencial de metano según las posibles relaciones de codigestión de los sustratos, y conociendo el caudal de sólidos volátiles de ingreso al biodigestor (ver figura 6.5), fue posible calcular la generación de metano de acuerdo a la ecuación 6.5. Por otro lado, asumiendo que el metano representa el 60% de la composición del biogás, mediante la ecuación 6.6 se estimó su producción. Los resultados de la generación de biogás según la relación entre los sustratos a codigerir, se plasman en el gráfico de la figura 6.7.

$$Gen_{CH_4,i} = PBM_{SustCodg,i} Q_{SV,i}^{SustCodg} \quad \text{Ecuación 6.5}$$

$$Gen_{biogás,i} = \frac{Gen_{CH_4,i}}{\frac{\%CH_4}{100}} \quad \text{Ecuación 6.6}$$

Donde:

$Gen_{CH_4,i}$: Generación de metano según relación Nopal/Mezcla Sust. (i). [Nm³ CH₄/d]. **Ver resultados en la figura 6.7**

en la figura 6.7

$PBM_{SustCodg,i}$: Potencial de generación de metano según relación Nopal/Mezcla Sust. (i)

[Nm_{CH₄}/gSV_{Sust.}]. *Ver valores en la figura 6.6*

$Q_{SV,i}^{SustCodg}$: Caudal másico de sólidos volátiles del sustrato de codigestion según relación Nopal/Mezcla Sust. (i) [tSV/d]. *Ver valores en la figura 6.5*

$Gen_{biogás,i}$: Generación de biogás según relación Nopal/Mezcla Sust. (i) [Nm³ Biogás/d]. **Ver resultados en la figura 6.7**

resultados en la figura 6.7

$\%CH_4$: Porcentaje de la composición del biogás correspondiente a metano. *Valor: 60 %*

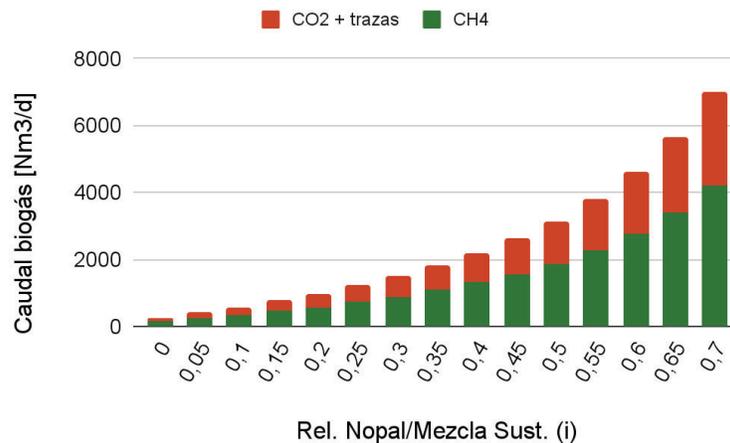


Figura 6.7. Caudal de biogás a generar estimado según la relación Nopal/Mezcla de Sustrato (i). Acotado entre las relaciones 0-0,7

6.4. Cálculo de la generación de energía

Las aplicaciones del biogás para la generación energética son diversas. Entre ellas se pueden mencionar su utilización en calderas, cogeneradores y celdas de combustible (Wellinger et al., 2013). La elección dependerá del objetivo y los recursos disponibles.

En el caso de este proyecto, el biogás será empleado para la producción de energía tanto eléctrica como en forma de calor. Para ello se instalará un equipo de cogeneración en el cual se quemará el gas para la generación de energía eléctrica. El calor liberado será recuperado y destinado a proveer de energía calorífica a la mezcla del biodigestor. De acuerdo a Wellinger et al. (2013) los motores empleados para la cogeneración poseen una eficiencia de conversión entre el 70 y el 80%. Dicha eficiencia total se reparte entre la generación eléctrica (30-42 %) y la generación de calor (40-50 %)

La estimación de la energía calórica a generar por la quema del biogás en el cogenerador, se realizó adoptando una serie de parámetros. Estos se encuentran relacionados al poder calorífico del metano contenido en el biogás y la eficiencia de generación de energía calórica del equipo cogenerador. Tomando los resultados obtenidos para la generación de biogás (ver figura 6.7) y los valores de los parámetros adoptados, se estimó la producción de energía calórica de acuerdo a la ecuación 6.7 para las diferentes relaciones de codigestion. Los resultados se vuelcan en la figura 6.8.

$$E_{C,i}^{cog} = Gen_{biogás,i} \frac{\% CH_4}{100 \%} PCI_{CH_4} \frac{\eta_{term}}{100 \%} \quad \text{Ecuación 6.7}$$

Donde:

$E_{C,i}^{cog}$: Energía calórica producida en la unidad de cogeneración según relación Nopal/Mezcla Sust.

(i) [MWh/año]. **Ver resultados en la figura 6.8**

$Gen_{biogás,i}$: Generación de biogás según relación Nopal/Mezcla Sust. (i) [Nm³ Biogás/año]. Ver

valores en la figura 6.7. Se considera que cada año posee 360 días

$\% CH_4$: Porcentaje de la composición del biogás correspondiente a metano. Valor: 60 %

PCI_{CH_4} : Poder calorífico inferior del metano. Valor 37,8 MJ/Nm³ CH₄

η_{cal} : Eficiencia calórica/térmica del equipo cogenerador. Valor: 40 %

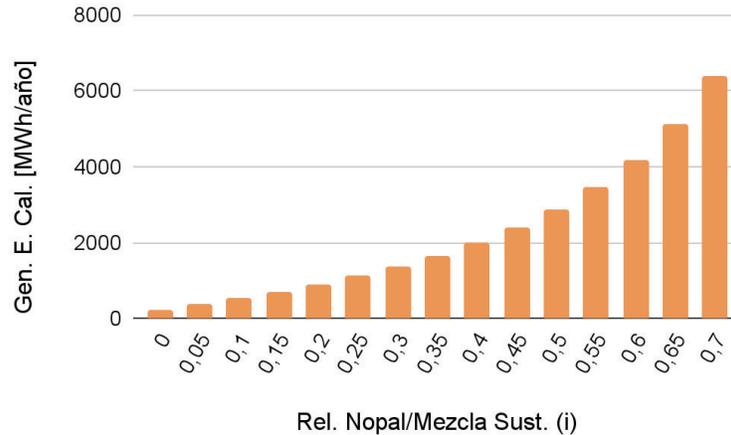


Figura 6.8. Energía calórica producida de forma anual por la quema del biogás en el cogenerador según la relación Nopal/Mezcla de Sustrato (i). Acotado entre las relaciones 0-0,7

6.5. Dimensionamiento del biodigestor

Según Wellinger et al. (2013), el volumen del biodigestor anaeróbico se debe adaptar tanto a la cantidad de sustrato a ingresar, así como a su tasa de degradación. Dicho de otra manera, por un lado, los microorganismos deben estar en contacto el tiempo suficiente para la correcta degradación de la materia orgánica. Por otro lado, la concentración de la materia a procesar no debe superar niveles que inhiban a la actividad metabólica de los microorganismos.

Con el fin de lograr un correcto balance, existen dos parámetros comúnmente empleados para calcular el volumen del biodigestor. Uno de ellos es la carga orgánica volumétrica (COV, u OLR por sus siglas en inglés), mientras que el otro es el tiempo de retención hidráulico (TRH, o HRT por sus siglas en inglés).

La COV está relacionada a la cantidad de sólidos volátiles que se ingresan al biodigestor por día y por unidad de volumen. En el caso de reactores de agitación continua (CSTR, por sus siglas en inglés), de acuerdo a Wellinger et al. (2013) la COV se encuentra en el rango entre 2 y 3 kgSV/m³d. Este tipo de reactores es posible diseñarlos hasta con una carga de entre 4 o 5 kgSV/m³d, aunque el sistema requiere un continuo monitoreo para evitar desbalances. Para reactores de flujo pistón, la carga puede alcanzar los 10 kgSV/m³d. La ecuación 6.9 permite calcular el volumen útil del reactor corregido por un factor de seguridad a partir de este parámetro.

$$COV_i = \frac{Q_{m,i}^{SustCodg} SV_{i,SustCodg}}{V_{UtilBiodg,i}} = \frac{Q_{SV,i}^{SustCodg}}{V_{UtilBiodg,i}} \quad \text{Ecuación 6.8}$$

$$V_{UtilBiodg,i} = \frac{Q_{SV,i}^{SustCodg}}{COV_i} f_{seg} \quad \text{Ecuación 6.9}$$

Donde:

$V_{UtilBiodg,i}$: Volumen útil del biodigestor corregido por un factor de seguridad según relación

Nopal/Mezcla Sust. (i) [m³]. **Ver resultados en la figura 6.9**

$Q_{SV,i}^{SustCodg}$: Caudal másico de sólidos volátiles del sustrato de codigestion según relación

Nopal/Mezcla Sust. (i) [tSV/d]. *Ver valores en la figura 6.5*

COV_i : Carga orgánica volumétrica. *Valor: 2,5 kgSV/m³d*

f_{seg} : Factor de seguridad. *Valor: 1,1. Equivalente a una corrección del 10%*

El TRH es el tiempo teórico que debe permanecer la materia orgánica contenida en los sustratos y la biomasa dentro del reactor. En la práctica, el TRH es el tiempo medio de permanencia en la unidad. Este punto es de particular importancia en los reactores del tipo CSTR debido a la potencial existencia de cortocircuitos.

Al momento de adoptar un TRH, es preciso evitar el lavado de los microorganismos dentro del reactor. De esta manera, teóricamente este parámetro no debe ser menor a 10 días (Wellinger et al., 2013), y se puede extender hasta 50 días (FAO, 2019). Por otro lado, también tiene que haber un balance entre evitar dicho lavado y no sobredimensionar la unidad. La ecuación 6.11 permite calcular el volumen útil del reactor corregido por un factor de seguridad a partir de este parámetro.

$$TRH_i = \frac{V_{UtilBiodg,i}}{Q_{i,SustCodg}} \quad \text{Ecuación 6.10}$$

$$V_{UtilBiodg,i} = TRH_i Q_{i,SustCodg} f_{seg} \quad \text{Ecuación 6.11}$$

Donde:

$V_{UtilBiodg,i}$: Volumen útil del biodigestor corregido por un factor de seguridad según relación

Nopal/Mezcla Sust. (i) [m³]. **Ver resultados en la figura 6.9**

$Q_{i,SustCodg}$: Caudal volumétrico de sustrato de codigestión según relación Nopal/Mezcla Sust. (i) [m³/d]. *Ver valores en la figura 6.4*

TRH_i : Tiempo de retención hidráulico. *Valor: 24 d. Criterio: triple del t_{80} del purín de cerdo (ver tabla 6.2)*

f_{seg} : Factor de seguridad. *Valor: 1,1. Equivalente a una corrección del 10%*

Empleando los caudales volumétricos y los valores de caudal de sólidos calculado para las diferentes relaciones de codigestión (ver figuras 6.4 y 6.5), se ha estimado el volumen útil que debería tener la unidad mediante los dos parámetros de dimensionamiento previamente descritos. Los resultados se plasman en el gráfico de la figura 6.9 a continuación.

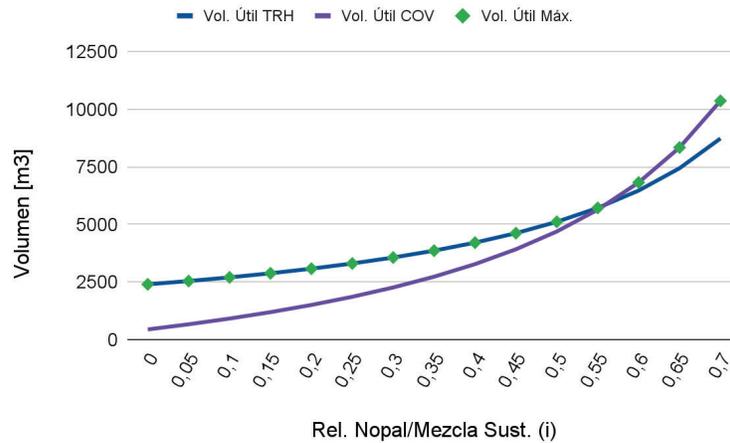


Figura 6.9. Volumen útil del biodigestor calculado a partir de la COV, el TRH y volumen máximo según la relación Nopal/Mezcla de Sustrato (i). Acotado entre las relaciones 0-0,7

De acuerdo al gráfico de la figura anterior, es posible observar que los volúmenes calculados según el parámetro de diseño difieren en la mayoría de las relaciones de codigestión, excepto en su punto de intersección. Con el ánimo de cumplir ambos criterios de forma simultánea, el volumen útil a adoptar será el máximo obtenido para cada caso.

6.6. Consumo de energía calorífica

6.6.1. Cálculo de la energía calorífica para calentamiento del sustrato de codigestión

El sustrato de codigestión ingresará al biodigestor a temperatura ambiente, generalmente inferior a la de operación (ver tabla 6.3). Al incorporarse a la mezcla dentro del reactor, provocará un descenso térmico que deberá ser compensado, ya que la temperatura de operación debe mantenerse en 37 °C. La energía requerida para cada relación de codigestión y su respectivo caudal de sustrato de forma anualizada, se calculó a partir de la ecuación 6.12, asumiendo un régimen de operación en estado estacionario.

$$E_{C,i}^{SustCodg} = Q_{m,i}^{SustCodg} C_{p_{SustCodg}} \sum_{estación} (T_{e, estación}^{SustCodg} - T_{operación})$$

Ecuación 6.12

Donde:

$E_{C,i}^{SustCodg}$: Energía calorífica equivalente para el calentamiento del sustrato de codigestión según relación Nopal/Mezcla Sust. (i) [MWh/año]

$Q_{m,i}^{SustCodg}$: Caudal másico del sustrato de codigestión según relación Nopal/Mezcla Sust. (i) [t/estación]. Ver valores en la figura 6.3. Se considera que cada mes dura 30 días y, por ende, cada estación 90 días

$C_{p_{SustCodg}}$: Calor específico del sustrato de codigestion. Valor: $1,16 \cdot 10^{-3} \text{ kWh/kg } ^\circ\text{C}$. Se adopta el

$C_{p_{agua}}$

$T_{e, estación}^{SustCodg}$: Temperatura de entrada al sistema de calefacción del sustrato de codigestion por estación del año [$^\circ\text{C}$]. Ver valores en la tabla 6.3

$T_{operación}$: Temperatura de operación del biodigestor. Valor: $37 \text{ } ^\circ\text{C}$

Tabla 6.3. Temperatura mínima promedio por estación del año registrada en la estación meteorológica Chemical Aero⁸, La Rioja. Elaborado a partir de datos del SMN (periodo 1991-2010) (ver anexo 6.1)

Estación del año	Temperatura mínima promedio [$^\circ\text{C}$]
Ver (Ene, Feb y Mar)	19,4
Oto (Abr, May, Jun)	10,3
Inv (Jul, Ago, Sep)	7,8
Prim (Oct, Nov, Dic)	17,5

Conociendo las temperaturas promedio por estación del año, se ha computado el calor necesario a aportar. En el gráfico de la figura 6.10 se vuelcan los resultados obtenidos para la energía calorífica que se debe aportar de forma desagregada y de manera anualizada, de acuerdo a las posibles relaciones de codigestión.

⁸ Se elige esta estación meteorológica de la red del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) debido a su cercanía a la localidad de Chepes

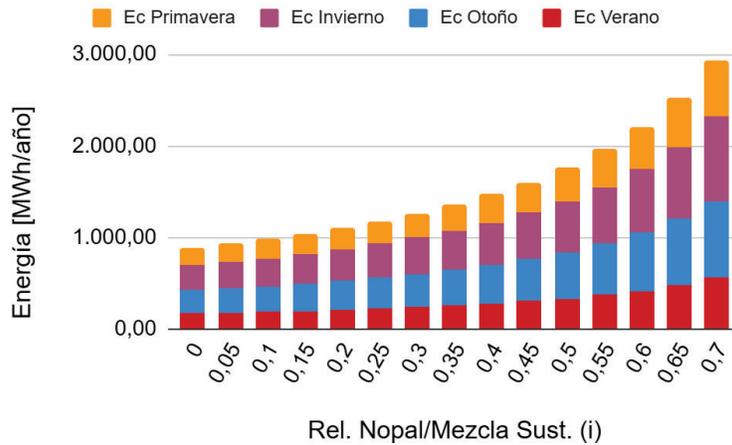


Figura 6.10. Energía necesaria de compensar por la caída de la temperatura en el biodigestor por ingreso del sustrato según la relación Nopal/Mezcla de Sustrato (i). Acotado entre las relaciones 0-0,7

6.6.2. Cálculo de las pérdidas de calor en el biodigestor

Como consecuencia del intercambio de calor entre el interior del reactor y el ambiente, va a haber una pérdida de energía térmica. En este sentido, además de la energía calórica que se deberá aportar por el ingreso del sustrato, será necesario adicionar la energía para contrarrestar las pérdidas.

Para estimar las pérdidas de calor, el biodigestor se modela como un reactor de tanque agitado en estado estacionario. En este sentido, sólo se considerarán las pérdidas por conducción a través de las paredes, despreciando la transferencia por convección, bajo el supuesto de la existencia de un equilibrio térmico con el exterior y vientos predominantemente débiles. Asimismo, se descarta la contribución de la radiación térmica. La figura 6.11 muestra esquemáticamente los flujos de energía térmica en la unidad.

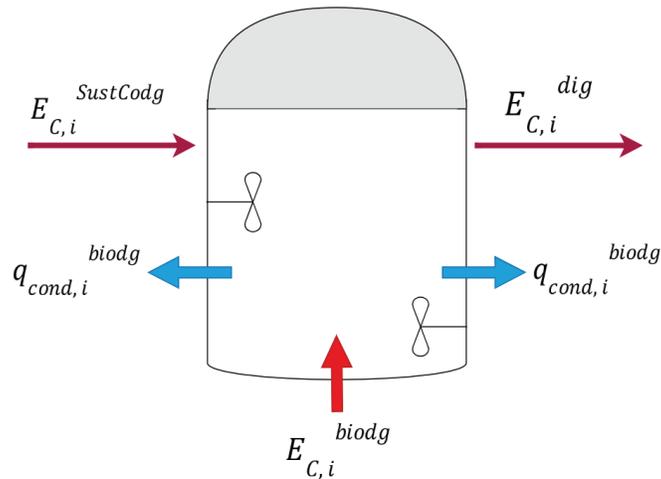


Figura 6.11. Esquema del balance de materia y energía calórica en el biodigestor. Elaboración propia
 A partir del balance de energía calórica del biodigestor (ecuación 6.13) es posible derivar la ecuación 6.14, que permite calcular la energía térmica necesaria de aportar a la unidad. Las suposiciones adoptadas fueron:

- **Volumen constante**
- **Propiedades constantes.** Se asume $\rho C_p = cte$
- **Mezcla completa**
- **Sistema en estado estacionario**

$$E_{C,i}^{SustCodg} + E_{C,i}^{biodg} = E_{C,i}^{dig} + q_{cond,i}^{biodg} + q_{conv,i}^{biodg} + q_{rad,i}^{biodg}$$

Ecuación 6.13

Se asume que $E_{C,i}^{SustCodg} = E_{C,i}^{dig}$

$$E_{C,i}^{biodg} = q_{cond,i}^{biodg} \quad \text{Ecuación 6.14}$$

Donde:

$E_{C,i}^{SustCodg}$: Energía calórica del sustrato de codigestión que ingresa al biodigestor según relación

Nopal/Mezcla Sust. (i)

$E_{C,i}^{biodg}$: Energía calórica necesaria a aportar para contrarrestar las pérdidas por conducción por

las paredes del biodigestor según relación Nopal/Mezcla Sust. (i)

$E_{C,i}^{dig}$: Energía calórica del digerido que sale del biodigestor según relación Nopal/Mezcla Sust. (i)

$q_{cond,i}^{biodg}$: Energía calórica que se pierde por conducción a través de las paredes del biodigestor

según relación Nopal/Mezcla Sust. (i)

$q_{conv,i}^{biodg}$: Energía calórica que se pierden por convección según relación Nopal/Mezcla Sust. (i).

Valor: ~ 0 . Se asume que es despreciable

$q_{rad,i}^{biodg}$: Energía calorífica que se pierde/gana por radiación según relación Nopal/Mezcla Sust. (i).
Valor: ~ 0 . Se asume que es despreciable

Como primera aproximación para el cálculo de las pérdidas de calor, se considera la construcción de un único biodigestor de forma cilíndrica. El material de construcción se asume que es hormigón armado, y la parte superior va a estar hermetizada por un gasómetro. Adicionalmente, se colocará material aislante en las paredes laterales.

Debido a las diferencias en la geometría de las diferentes partes del biodigestor (paredes laterales, piso y cúpula), las pérdidas de calor han sido calculadas de forma separada. En la ecuación 6.15, se formaliza la pérdida de calor por conducción como suma de los tres componentes considerados.

$$E_{C,i}^{biodg} = q_{cond,i,lat}^{biodg} + q_{cond,i,piso}^{biodg} + q_{cond,i,cúp}^{biodg} \quad \text{Ecuación 6.15}$$

Donde:

$E_{C,i}^{biodg}$: Energía calorífica que se pierde por conducción a través de las paredes del biodigestor según relación Nopal/Mezcla Sust. (i)

$q_{cond,i,lat}^{biodg}$: Energía calorífica que se pierde por conducción a través de la pared lateral del biodigestor según relación Nopal/Mezcla Sust. (i)

$q_{cond,i,piso}^{biodg}$: Energía calorífica que se pierde por conducción a través del piso del biodigestor según relación Nopal/Mezcla Sust. (i)

$q_{cond,i,cúp}^{biodg}$: Energía calorífica que se pierde por conducción a través de la cúpula del biodigestor según relación Nopal/Mezcla Sust. (i)

Pérdidas por conducción en la pared lateral

Para el cálculo de la pérdida de calor por la pared lateral de la unidad se asume que la misma, tal como se mencionó previamente, posee una geometría cilíndrica. En ese sentido la ecuación 6.16 permite computar la transferencia de calor entre el interior y el exterior por conducción para unidades que poseen dicha forma (ver figura 6.12).

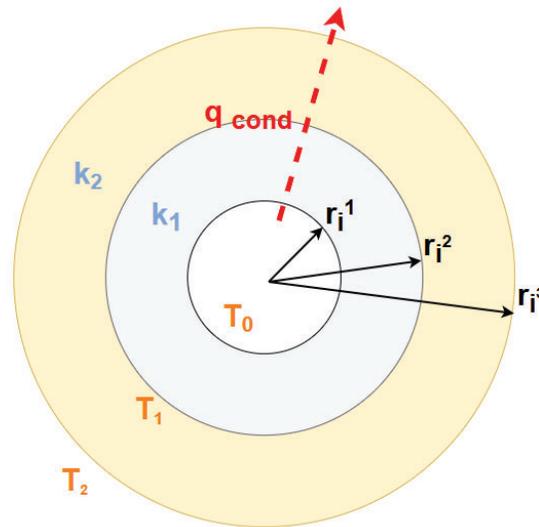


Figura 6.12. Esquema de transferencia de calor por conducción a través de la pared lateral de una unidad cilíndrica. Elaboración propia

$$q_{cond, i, lat}^{biodg} = U_{lat}^{biodg} A_{i, lat}^{biodg} \sum_{estación} (T_0^{biodg} - T_{0, estación}^{biodg}) d_{estación} \quad \text{Ecuación 6.16}$$

$$\text{Vale la siguiente igualdad } \frac{1}{U_{lat}^{biodg} A_{i, lat}^{biodg}} = \sum_m \frac{\ln(r_{i, m+1}/r_{i, m})}{2\pi h_{biodg} k_m}$$

Donde:

$q_{cond, i, lat}^{biodg}$: Energía calórica que se pierde por conducción a través de la pared lateral del biodigestor según relación Nopal/Mezcla Sust. (i) [MWh/año]

U_{lat}^{biodg} : Coeficiente de transferencia de calor de las paredes laterales del biodigestor [$W/m^2 \text{ } ^\circ C$]

$A_{i, lat}^{biodg}$: Área de intercambio a través de las paredes laterales del biodigestor según relación Nopal/Mezcla Sust. (i) [m^2]

T_0^{biodg} : Temperatura en el interior del biodigestor. Valor: $37 \text{ } ^\circ C$

$T_{0, estación}^{biodg}$: Temperatura ambiente en las inmediaciones del biodigestor [$^\circ C$]. Ver valores en tabla 6.3

$d_{estación}$: Días por estación del año [d]. Se considera que cada mes dura 30 días y, por ende, cada estación 90 días

h_{biodg} : Altura del biodigestor [m]. Valor: 7 m

$r_{i, m+1}$: Radio externo de la pared/material (m) aislante definido para un volumen de biodigestor según relación Nopal/Mezcla Sust. (i) [m]

$r_{i, m}$: Radio interno de la pared/material aislante (m) definido para un volumen de biodigestor según relación Nopal/Mezcla Sust. (i) [m]

k_m : Conductividad térmica de la pared/material aislante (m) [$kWh/d \text{ m } ^\circ C$]

A continuación se detalla la estructura adoptada para la pared lateral, y por ende la considerada en el cálculo de las pérdidas de calor a través de la misma. Se incluyen los valores de los coeficientes correspondientes a los materiales constructivos.

- **Estructura de la pared lateral (interno a externo):**

1) Hormigón armado: 0,2 m

2) Aislamiento térmico: 0,1 m

- **Material de las paredes: Hormigón armado.**

$$k_{HormArmd} = 1,63 \text{ W/m } ^\circ\text{C} = 3,912 \cdot 10^{-2} \text{ kWh/d m } ^\circ\text{C}$$

- **Material del aislante: Espuma de poliuretano.**

$$k_{poliuretano} = 0,022 \text{ W/m } ^\circ\text{C} = 5,28 \cdot 10^{-4} \text{ kWh/d m } ^\circ\text{C}$$

Pérdidas por conducción a través del piso

El modelado de la pérdida de calor por conducción desde el interior de la unidad hacia el ambiente a través del piso, se realizó considerándolo como una pared plana. Debido a la forma cilíndrica del biodigestor, este posee una geometría circular. La ecuación 6.17 permite calcular la transferencia de energía calórica hacia el exterior basada en el esquema de la figura 6.13 para dichas formas.

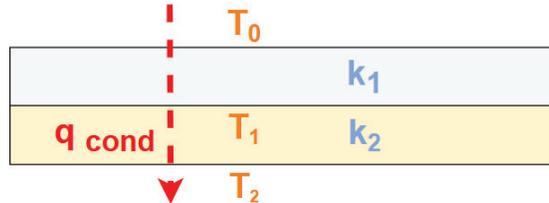


Figura 6.13. Esquema de la transferencia de calor por conducción a través de una pared plana.
Elaboración propia

$$q_{cond, i, piso}^{biodg} = U_{piso}^{biodg} A_{i, piso}^{biodg} (T_0^{biodg} - T_2^{biodg}) d_{anual} \quad \text{Ecuación 6.17}$$

$$\text{Vale la siguiente igualdad } \frac{1}{U_{piso}^{biodg} A_{i, piso}^{biodg}} = \sum_m \frac{e_m}{k_m} \pi r_i^2$$

Donde:

$q_{cond, i, piso}^{biodg}$: Energía calórica que se pierde por conducción a través del piso del biodigestor según relación Nopal/Mezcla Sust. (i) [MWh/año]

U_{lat}^{biodg} : Coeficiente de transferencia de calor de las paredes laterales del biodigestor [$W/m^2 \text{ } ^\circ C$]

$A_{i, lat}^{biodg}$: Área de intercambio a través de las paredes laterales del biodigestor según relación Nopal/Mezcla Sust. (i) [m^2]

T_0^{biodg} : Temperatura en el interior del biodigestor. *Valor: 37 °C*

T_2^{biodg} : Temperatura del suelo en las inmediaciones del biodigestor. *Valor: 15 °C*

d_{anual} : Días por estación del año [d]. *Se considera un año de 360 d*

e_m : Espesor de la pared/material aislante (m) [$kWh/d \text{ m } ^\circ C$]

k_m : Conductividad térmica de la pared/material aislante (m) [$kWh/d \text{ m } ^\circ C$]

r_i : Radio interno de la pared/material aislante definido para un volumen de biodigestor según relación Nopal/Mezcla Sust. (i) [m]

A continuación se detalla la estructura adoptada para el piso, y por ende la considerada en el cálculo de las pérdidas de calor a través del mismo. Se incluyen los valores de los coeficientes correspondientes a los materiales constructivos.

- **Estructura piso (interno a externo):**

- 1) Hormigón armado: 0,1 m

- 2) Aislamiento térmico: 0,1 m

- 3) Hormigón armado: 0,2 m

- **Material de las paredes: Hormigón armado.**

$$k_{HormArmd} = 1,63 \text{ W/m } ^\circ C = 3,912 \cdot 10^{-2} \text{ kWh/d m } ^\circ C$$

- **Material del aislante: Poliestireno.**

$$k_{poliestireno} = 0,037 \text{ W/m } ^\circ C = 8,9 \cdot 10^{-4} \text{ kWh/d m } ^\circ C$$

Pérdidas por conducción en la cúpula

El modelado de la pérdida de calor por conducción desde el interior de la unidad hacia el ambiente a través de la cúpula del biodigestor, se realizó considerándolo como casquete esférico. La ecuación 6.18 permite calcular la transferencia de energía calórica hacia el exterior basada en el esquema de la figura 6.14 para dichas formas.

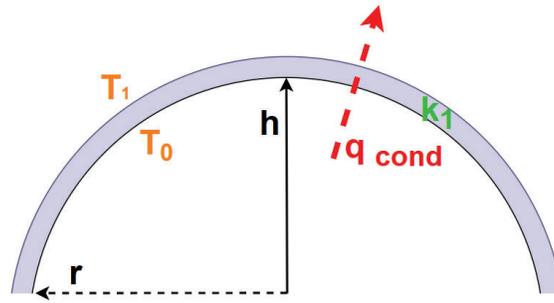


Figura 6.14. Esquema de transferencia de calor por conducción a través de la cúpula. Elaboración propia

$$q_{cond, i, cúp}^{biodg} = U_{cúp}^{biodg} A_{i, cúp}^{biodg} \sum_{estación} (T_0^{biodg} - T_{1, estación}^{biodg}) d_{estación} \quad \text{Ecuación 6.18}$$

$$\text{Vale la siguiente igualdad } A_{i, cúp}^{biodg} = \pi (r_i^2 + h_{cúp}^2)$$

Donde:

$q_{cond, i, cúp}^{biodg}$: Energía calórica que se pierde por conducción a través del piso del biodigestor según relación Nopal/Mezcla Sust. (i) [MWh/año]

$U_{cúp}^{biodg}$: Coeficiente de transferencia de calor de la cúpula de caucho EPDM del biodigestor. *Valor:* 2,08 W/m² °C (Obtenido de Teleszewski & Zukowski, 2018)

$A_{i, cúp}^{biodg}$: Área de intercambio a través de la cúpula del biodigestor según relación Nopal/Mezcla Sust. (i) [m²]

T_0^{biodg} : Temperatura en el interior del biodigestor. *Valor:* 37 °C

$T_{1, estación}^{biodg}$: Temperatura ambiente en las inmediaciones del biodigestor [°C]. *Ver valores en tabla 6.3*

$d_{estación}$: Días por estación del año [d]. *Se considera que cada mes dura 30 días y, por ende, cada estación 90 días*

r_i : Radio interno de la cúpula definido para un volumen de biodigestor según relación Nopal/Mezcla Sust. (i) [m]

$h_{cúp}$: Altura de la cúpula del biodigestor. *Valor:* 3 m

A continuación se detallan los criterios y consideraciones adoptadas para la cuantificación de la pérdida de calor, y por ende la necesaria a aportar, a través de la cúpula del biodigestor.

- **Espesor de la cúpula:** 0,002 m
- **Material del gasómetro:** Polietileno de alta densidad (HDPE).

$U_{HDPE} = 2,08 \text{ W/m}^2 \text{ °C} = 5,0 \cdot 10^{-2} \text{ kWh/d m}^2 \text{ K}$ (Obtenido de Teleszewski & Zukowski, 2018)

Pérdidas de calor por conducción total en el biodigestor

Una vez estimadas las pérdidas de calor por conducción a través de las diferentes partes del biodigestor por estación del año, se ha computado el total de energía calórica que se transfiere al exterior empleando la ecuación 6.15. Los resultados obtenidos para las diferentes relaciones de codigestión posibles se vuelcan en el gráfico de la figura 6.19.

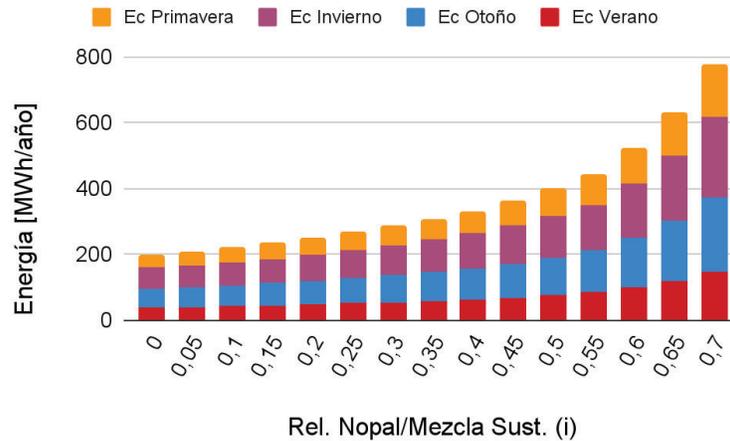


Figura 6.19. Energía necesaria de aportar para contrarrestar las pérdidas de calor por conducción por las paredes del biodigestor según la relación Nopal/Mezcla de Sustrato (i). Acotado entre las relaciones 0-0,7

6.7. Balance de energía calorífica total de la planta

Tal como se ha descrito anteriormente, el balance de energía calorífica contempla tres términos, correspondientes a los requerimientos y la generación de energía térmica. Este balance se formaliza mediante la ecuación 6.19 presentada a continuación.

$$BECT_i = E_{C,i}^{cog} - E_{C,i}^{SustCodg} - E_{C,i}^{bioldg} \quad \text{Ecuación 6.19}$$

Donde:

$BECT_i$: Balance de energía calorífica total de la planta según relación Nopal/Mezcla Sust. (i)

[MWh/año]. **Ver resultados en la figura 6.14**

$E_{C,i}^{cog}$: Energía calorífica producida por la quema del biogás en la unidad de cogeneración según relación Nopal/Mezcla Sust. (i) [MWh/año]. *Ver resultados en la figura 6.8*

$E_{C,i}^{SustCodg}$: Energía calorífica equivalente para el calentamiento del sustrato de codigestión según relación Nopal/Mezcla Sust. (i) [MWh/año]. *Ver resultados en la figura 6.10*

$E_{C,i}^{bioldg}$: Energía calorífica requerida para contrarrestar las pérdidas de calor según relación Nopal/Mezcla Sust. (i) [MWh/año]. *Ver resultados en la figura 6.19*

Una vez estimados los consumos y la generación de energía calorífica, se ha computado el balance para cada una de las relaciones de codigestion posibles según la ecuación 6.19. El objetivo de este análisis preliminar permitió descartar los casos en los cuales el balance es negativo o el remanente es muy pequeño. Los resultados se plasman en el gráfico de la figura 6.20.

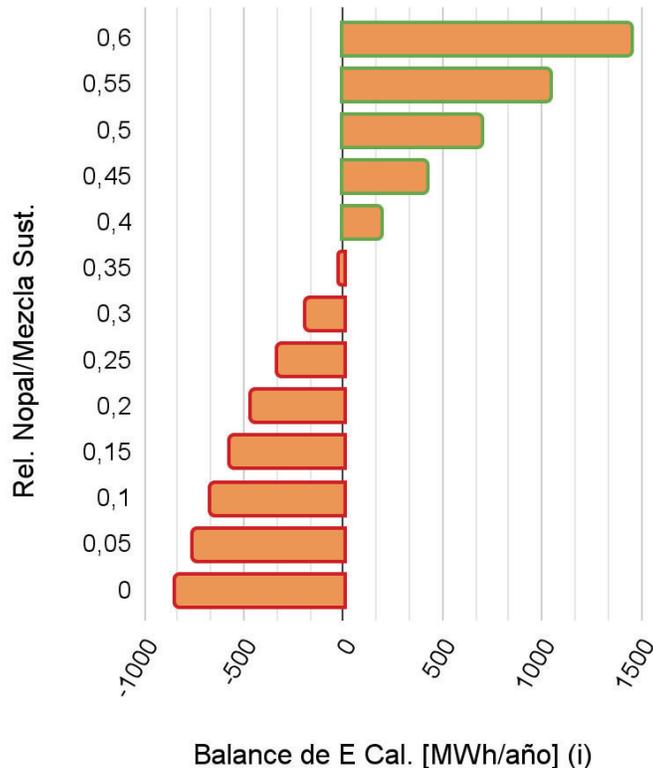


Figura 6.20. Balance de energía calorífica anualizado de la planta según la relación Nopal/Mezcla de Sust. Acotado entre las relaciones 0-0,6

Como se puede evidenciar en el gráfico anterior, hasta la relación 0,35 de Nopal/Mezcla de Sust. el balance de energía calorífica es negativo. A partir de este punto el balance se vuelve positivo, de manera que bajo estas relaciones la planta a diseñar sería autosuficiente. Como resultado de este análisis, los casos con balance negativo fueron descartados.

Si bien las relaciones de codigestion intermedias a altas ($> 0,5$ Nopal/Mezcla de Sust.) son interesantes desde el punto de vista de la obtención de energía, tienen una serie de contrapuntos que no es posible obviar. Estos radican, entre otros, en la alta demanda de cladodios de nopal y los volúmenes de las unidades que se traducen en espacio necesario para el emplazamiento de la planta (ver figuras 6.3 y 6.9). La decisión final será tomada en un siguiente nivel de análisis que considerará la limitación existente en relación al área de cultivo disponible para la producción del nopal.

6.8. Elección de la relación de codigestión

El análisis del balance de energía calorífica permitió obtener el rango de relaciones de codigestión que cumplen con los primeros dos criterios de viabilidad técnica del proyecto. Como siguiente paso de análisis, para definir la relación final para el diseño se considerará el área total disponible a destinar para el cultivo del nopal, que es el tercer criterio definido para el análisis de viabilidad técnica. El establecimiento Granja Chepes cuenta para este propósito con un total de 260 ha.

Tal como se ha desarrollado previamente en el capítulo 3, el cactus *Opuntia ficus-indica* se caracteriza por su adaptabilidad a zonas áridas y semiáridas. El nopal es una planta capaz de crecer en condiciones de escasez de agua, lo que lo hace un insumo interesante para zonas donde no es posible desarrollar plantaciones de cultivos energéticos convencionales como el maíz. A pesar de ello, la productividad del nopal varía según la densidad de plantas, edad del cultivo, formato de la plantación, el agregado de nutrientes, suplementos de riego, entre otros. Con el fin de hacer una estimación lo más representativa posible, se han relevado valores de productividad a partir de bibliografía los cuales se vuelcan en la tabla 6.4.

Tabla 6.4. Relevamiento bibliográfico de datos de productividad de nopal bajo diferentes condiciones

Productividad cladodios Nopal [t MS/ha año]⁹	Observaciones	Fuente
2,4	<u>Sitio:</u> Los Llanos, La Rioja, Argentina <u>Trazo plantación:</u> 3x3 <u>Edad plantación:</u> 5-7 años	Guevara & Estevez (2003)
1,7	<u>Sitio:</u> Los Llanos, La Rioja, Argentina <u>Trazo plantación:</u> 4x4 <u>Edad plantación:</u> 10 años	
6,8	<u>Sitio:</u> Región del Chaco Semiárido, Argentina <u>Edad plantación:</u> 4 años	Cavallero et al. (2022)
24,5	<u>Sitio:</u> Texcoco, México <u>Edad plantación:</u> 2 años	Ramírez-Arpide et al. (2019)
26	<u>Sitio:</u> Región Sur de Santiago, Chile <u>Edad plantación:</u> 4 años	Cortazar & Nobel (1992)
Productividad promedio adoptada	11	

⁹ Se considera que materia seca (MS) es equivalente a sólidos totales (ST)

Ante el amplio rango de valores obtenidos para la productividad *Opuntia*, se adoptó el promedio de los mismos para las estimaciones. Posteriormente, se empleó la ecuación 6.20 para poder calcular el área necesaria a destinar al cultivo de nopal de acuerdo a la relación entre los sustratos a codigerir. En el gráfico de la figura 6.21 se pueden observar los resultados obtenidos de las estimaciones para los casos posibles.

$$A_{i, CultvNopal} = \frac{Q_{m,i}^{nopal} ST_{nopal}}{Pd_{Nopal}} \quad \text{Ecuación 6.20}$$

Donde:

$A_{i, CultvNopal}$: Área necesaria a destinar para el cultivo de nopal según según relación Nopal/Mezcla Sust. (i) [ha]. **Ver resultados en la figura 8.21**

$Q_{m,i}^{nopal}$: Caudal másico de nopal según relación Nopal/Mezcla Sust. (i) [t/d]. *Ver valores en la figura 6.3*

ST_{nopal} : Concentración de sólidos totales de los cladodios de nopal. *Valor: 0,137 tST/t nopal*

Pd_{Nopal} : Productividad del nopal en términos de materia seca (o sólidos totales). *Valor: 11 t ST/ha año*

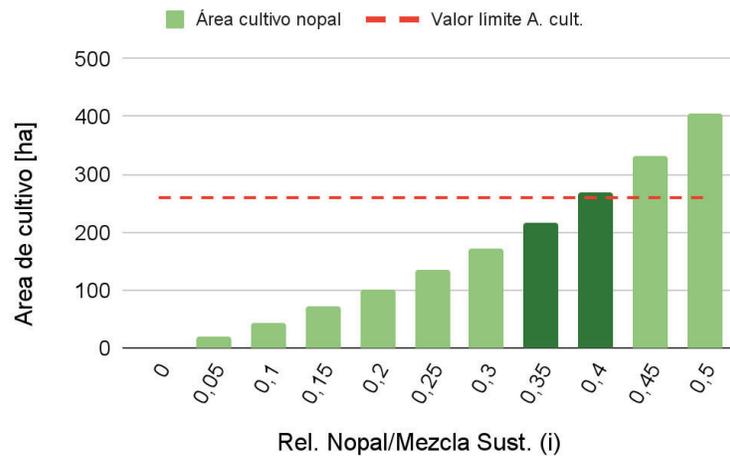


Figura 6.21. Área necesaria a destinar al cultivo de nopal según la relación Nopal/Mezcla de Sust. Valor límite del área a destinar al cultivo de nopal (Valor límite A. cult.): 260 ha. Acotado entre las relaciones 0-0,5

De acuerdo a la figura 6.21, la relación entre los sustratos a codigerir que requiere de un área de cultivo del nopal menor o igual a la disponible, se halla entre la relación 0,35 y 0,4. Con el objetivo de encontrar aquella que permita la mayor generación de biogás y cumpla con las restricciones planteadas, se han analizado los casos de codigestion intermedios en el rango previamente señalado. En la figura 6.22, se vuelcan los resultados obtenidos para el área necesaria para el cultivo del nopal en el rango mencionado.

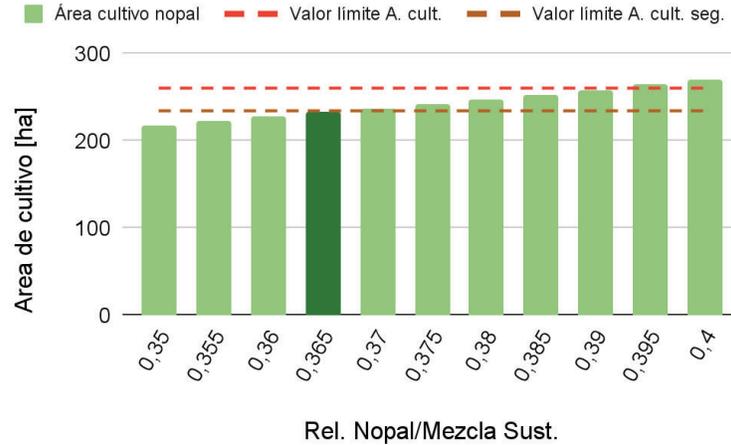


Figura 6.22. Área necesaria a destinar al cultivo de nopal acotado entre las relaciones 0,35-0,4 según la relación Nopal/Mezcla de Sust. Valor límite del área a destinar al cultivo de nopal (Valor límite A. cult.): 260 ha. Valor límite de seguridad del área a destinar al cultivo de nopal (Valor límite A. cult. seg.): 234 ha.

Habiendo realizado los análisis correspondientes, el valor de la relación de codigestion a emplear es la de 0,365 m Nopal/m Mezcla. de Sust. La elección definitiva satisface los tres criterios definidos para que la planta a diseñar sea viable técnicamente. Estos son:

- El total del purín generado de forma diaria es tratado mediante biodigestión anaeróbica
- El balance de energía calorífica del biodigestor conjunto es positivo
- El área de cultivo de nopal necesaria para codigerir con el purín es levemente menor al área disponible en el establecimiento para destinar a esta actividad

La relación entre los sustratos que ingresarán como *input* al biodigestor, tal como se ha desarrollado previamente, está asociado a un caudal volumétrico y de sólidos, y a una generación de biogás y energía estimada. Adoptado estos valores, se desarrollará el dimensionamiento de las unidades y los equipos asociados de la planta bajo la relación aquí definida.

6.9. Resumen parámetros para diseño de la planta

A partir del análisis realizado a lo largo de las secciones anteriores, se ha podido definir la relación de codigestión entre los sustratos de alimentación del biodigestor. La planta a diseñar bajo los parámetros derivados de la relación de codigestión definida, será viable técnicamente bajo los términos definidos. En la tabla 6.5, se resumen los valores de los parámetros más importantes que serán utilizados en el capítulo 8 para el dimensionamiento de las unidades, así como para la elección de los equipos mecánicos y electromecánicos.

Tabla 6.5. Valores adoptados para los parámetros de diseño de la planta de biogás

Parámetro		Unidad	Valor
Símbolo	Descripción		
$\% \text{ nopal}$	Porcentaje de los cladodios nopal sobre el total del sustrato de codigestión	%	36,5
$\% \text{ purín}$	Porcentaje del purín sobre el total del sustrato de codigestión	%	63,5
$Q_{m, \text{SustCodg}}$	Caudal másico del sustrato de codigestión	t/d	142,9
Q_{SustCodg}	Caudal volumétrico del sustrato de codigestión	m ³ /d	149,8
$Q_{m, \text{SV}}^{\text{SustCodg}}$	Caudal másico de sólidos volátiles del sustrato de codigestión	t/d	6,55
$Gen_{\text{biogás}}$	Generación de biogás	Nm ³ /d	2565,4
$\% \text{ CH}_{4, \text{biogás}}$	Porcentaje de metano en el biogás	%	60
$A_{\text{CultvNopal}}$	Área requerida para el cultivo de nopal	ha	232,2

Capítulo 7. Memoria descriptiva

La planta final diseñada ocupa un área total de 1,35 ha. Como se observa en el diagrama de flujo (ver figura 7.1), cuenta con dos biodigestores de mezcla completa, que constituyen las unidades principales para el tratamiento del sustrato en codigestión. Además, dispone de una serie de sistemas y equipos auxiliares que garantizan las condiciones óptimas de operación, así como el manejo adecuado de insumos y subproductos generados durante el proceso de biodigestión anaeróbica.

El sustrato de alimentación (o *sustrato de codigestión*) está compuesto por purín de cerdo y cladodios de nopal, en una proporción de 63,5% y 36,5% en masa, respectivamente. Diariamente, se generan 90,7 t de purín, a las que se suman 52,2 t de cladodios de nopal, alcanzando un procesamiento total de 142,9 t/d (equivalente a 149,8 m³/d).

El purín se acumula temporalmente en un pozo de bombeo con capacidad de 80 m³, donde llega desde las fosas de almacenamiento ubicadas en las naves de gestación, maternidad y engorde. Luego, es impulsado hacia el tanque de mezcla mediante una bomba sumergible de 1,5 HP, que opera 9 horas al día con un caudal de 10,6 m³/h.

Los cladodios de nopal, tras su cosecha, se almacenan temporalmente en un área específica, procurando que ingresen lo más frescos posible para minimizar la pérdida de humedad. Diariamente, se procesan 52,1 m³ (54,7 t), los cuales primero pasan por un molino de martillos y luego se incorporan al tanque de mezcla, junto con el purín. Todo el proceso se lleva a cabo en 9 horas, asegurando el cumplimiento de la proporción establecida entre los sustratos.

En el tanque de mezcla, los sustratos se homogeneizan y se almacenan temporalmente antes de ser enviados a los biodigestores. Esta unidad ha sido diseñada para un tiempo de retención de 3 días, con un volumen útil de 450 m³. Desde allí, el sustrato de codigestión es impulsado mediante una bomba de tornillo de 10 HP hacia los dos biodigestores, operando durante 9 horas diarias, con un caudal total de 149,8 m³/d. La distribución del sustrato se realiza de manera alternada: 4,5 horas hacia el biodigestor 1 y el resto del tiempo hacia el biodigestor 2.

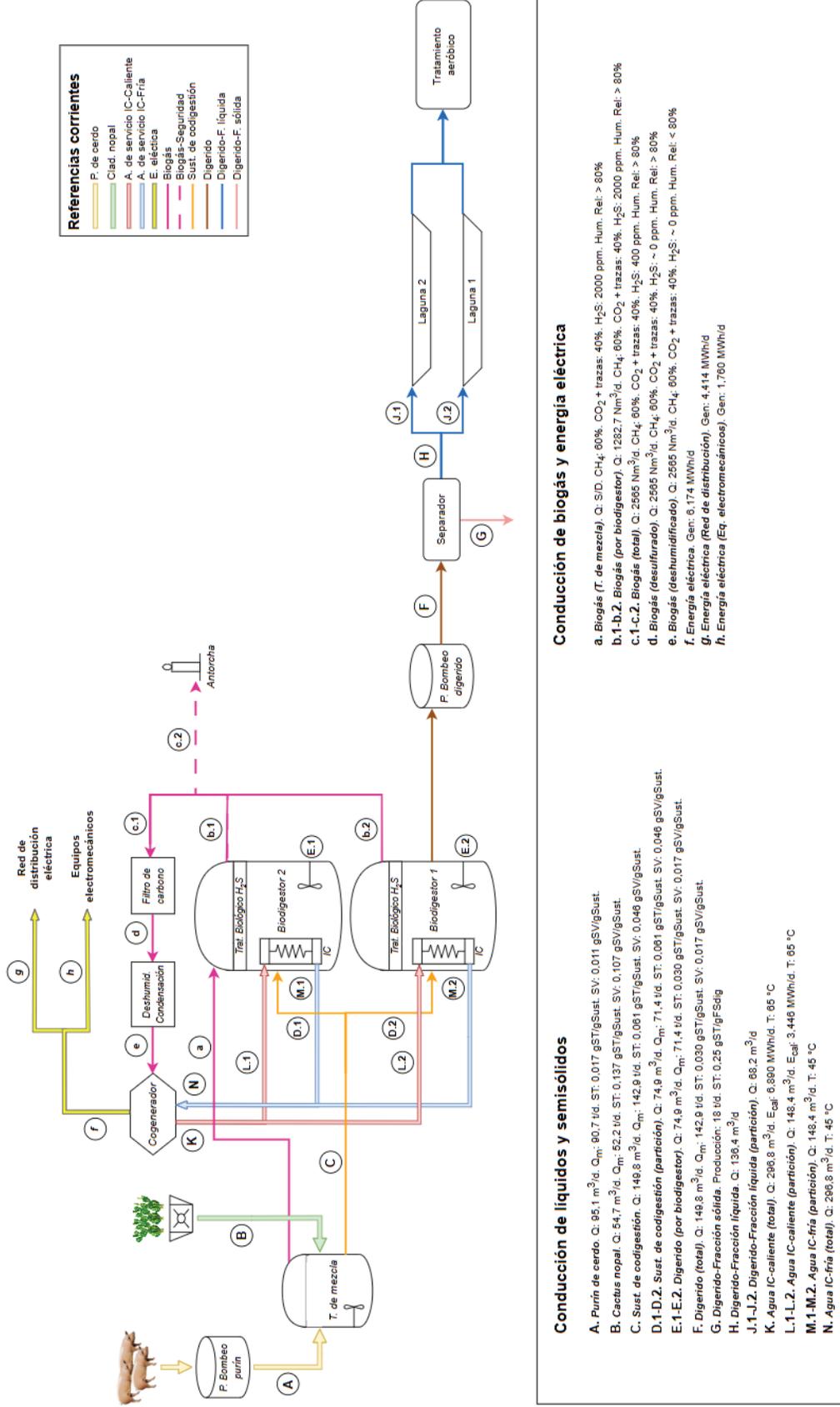


Figura 7.1. Diagrama de flujo de la planta de biogás a instalar en el predio de Granja Chepas

Dentro del tanque de mezcla, la homogeneización se lleva a cabo mediante un agitador sumergible de 4 kW, asegurando una distribución uniforme del sustrato. Además, la unidad cuenta con un gasómetro de caucho EPDM en su parte superior, ya que la interacción entre el purín y los cladodios puede generar degradación parcial de la materia orgánica. El biogás liberado en este proceso se canaliza hacia el biodigestor 2.

El sustrato de codigestión llega a los biodigestores en forma secuencial, a temperatura ambiente y con una concentración inicial de 0,061 gST/gSust y 0,046 gSV/gSust. Cada reactor posee un volumen útil de 1800 m³, y su dimensionamiento responde a dos criterios. Uno de ellos es que el tiempo de permanencia del sustrato sea de 24 d. El segundo, que puedan tolerar una carga orgánica equivalente menor o igual a 2,5 kgSV/m³ d. La temperatura de operación es de 37 °C.

La mezcla y homogeneización dentro de cada biodigestor es realizada por tres mezcladores sumergibles, con una potencia total de 15,5 kW. Para mantener la temperatura óptima del proceso, la calefacción del sustrato y el inóculo se logra mediante un serpentín helicoidal sumergido de 322 m de largo, que suministra una energía térmica de 3,446 MWh/d. De esta manera, se garantizan las condiciones ideales para la degradación de la materia orgánica.

Por cada biodigestor anaeróbico se generan aproximadamente 1282,7 Nm³/d de biogás, lo que da un total de 2565,4 Nm³/d de dicho gas. La composición estimada es de 60% CH₄, y 40 % de CO₂ y trazas. Dentro de las trazas está incluido el H₂S, que puede alcanzar una concentración máxima de 2000 ppm. El biodigestor 2 recibe el biogás que se pueda generar en el tanque de mezcla.

A medida que se va produciendo, el biogás inicialmente atraviesa el sistema de tratamiento biológico para una primera desulfuración. Se estima una remoción del 80% del sulfuro de hidrógeno, con una concentración a la salida de alrededor de 400 ppm. Las condiciones de aerobiosis, necesarias para el crecimiento de la biomasa, es garantizada mediante aireadores de bajo caudal. Una vez tratado, el gas es almacenado en los gasómetros instalados en la parte superior, con una capacidad de 373 m³.

Desde los gasómetros, el biogás es conducido al tren de tratamiento previo a su combustión en el equipo de cogeneración. El sistema de tratamiento está constituido por un filtro de carbón y por un deshumidificador por condensación. A la salida del tren, el biogás tratado posee una concentración H₂S menor a 50 ppm y una humedad relativa menor al 80%. Ante picos de producción, paradas por reparación de equipos u otro motivo que lo amerite, el gas puede ser desviado para su quema en la antorcha de biogás.

El biogás tratado es finalmente combustionado en un equipo de cogeneración o CHP (*Combined Heat and Power*). El equipo tiene un funcionamiento de 24 hs al día, suministrando energía de forma continua. De esta manera, a partir de la quema de los 2565,4 Nm³/d de gas generados se obtienen 6,174 MWh/d de energía eléctrica y 7,742 MWh/d de energía térmica, por recuperación de calor.

En cuanto a la energía eléctrica que se produce, del total unos 1,760 MWh/d son destinados al suministro de electricidad general y el funcionamiento de los equipos electromecánicos de la planta. A saber: triturador, agitadores, bombas, entre otros. De esta forma, queda un excedente de 4,414 MWh/d que son inyectados a la red de distribución para su venta.

La energía calorífica se destina principalmente a la calefacción de la mezcla de inóculo y sustrato dentro de cada biodigestor. Para ello, cada unidad dispone de un serpentín helicoidal de acero inoxidable, por donde circulan 148,4 m³/d de agua caliente, transfiriendo 3,446 MWh/d de calor. Este proceso compensa la pérdida térmica y mantiene una temperatura de operación estable de 37 °C.

El agua caliente al atravesar el serpentín se enfría hasta 45°C. y luego retorna al equipo de cogeneración. Allí, por la quema del biogás, es nuevamente calentado a 65°C y conducido al serpentín. De esta manera, se cierra el circuito. Dos bombas centrífugas de 2,5 HP de potencia instaladas a la entrada de cada reactor, que funcionan las 24 horas del día, aportan la energía necesaria para que el agua pueda circular a través de todo el circuito y compensar las pérdidas de carga.

La producción de digerido, el segundo subproducto de la biodigestión anaeróbica, es de 74,9 m³/d por reactor. Su concentración de sólidos totales y sólidos volátiles estimada es de 0,030 gST/gSust y 0,017 gSV/gSust, respectivamente, lo que equivale a una remoción de alrededor del 20 y 30% en el proceso de biodigestión. El lodo es evacuado desde cada biodigestor hacia el pozo de bombeo del digerido mediante gravedad. Dicha unidad tiene un volumen útil de 149,8 m³, y allí se homogeneiza el barro previo a su tratamiento físico.

Con el objetivo de separar las fracciones del digerido para su aprovechamiento, este es dirigido hacia un separador de tornillo. De esta forma se obtiene la fracción líquida y la fracción sólida. La conducción desde el pozo de bombeo hacia el equipo separador se hace mediante una bomba de tornillo de 10 HP que funciona 12 horas al día.

La producción de fracción sólida es de 18 t/d, y el barro posee una concentración porcentual de sólidos aproximada de 25%. Este es almacenado en un espacio acondicionado, y posteriormente retirado para su uso agrícola. En cuanto a la fracción líquida, se generan 136,4 m³/d. Inmediatamente son conducidos por gravedad hacia lagunas de almacenamiento con un tiempo de permanencia de 30 días. Esto permite estabilizar y almacenar la fracción líquida para su posterior uso para riego y fertilización. Aquella parte que no es usada, es enviada a un tratamiento aeróbico para su posterior vuelco en pozo absorbente.

La operación de la planta incluye el monitoreo del biogás producido, la determinación de las propiedades fisicoquímicas de los sustratos, el inóculo y el digerido, así como la seguimiento de parámetros de funcionamiento del proceso de biodigestión anaeróbica. De esta manera, se evalúa el proceso en su conjunto, lo que permite aplicar acciones correctivas en caso de ser necesario. Para ello se cuenta con un laboratorio donde se realiza la determinación de sólidos del inóculo y los sustratos, FOSTAC y alcalinidad de la mezcla de los biodigestores, entre otros. Adicionalmente, se deriva con una frecuencia mensual la determinación del AME del inóculo, y del PBM con una frecuencia estacional.

Capítulo 8. Memoria de cálculo

8.1. Parámetros iniciales de diseño

En la tabla 8.1 se vuelcan los valores de los parámetros a adoptar para el dimensionamiento de las unidades y los equipos mecánicos y electromecánicos de la planta, así como para el cálculo de la generación de energía calorífica y eléctrica. Estos valores surgen tanto de información de bibliografía, así como de los resultados obtenidos del análisis de la mejor relación de codigestión de los sustratos a ingresar en el biodigestor, el purín de cerdo y los cladodios de nopal. Para más detalles sobre este análisis ver capítulo 6.

Tabla 8.1. Valores adoptados para los parámetros de diseño más importantes de la planta de biogás

Parámetro		Unidad	Valor
Símbolo	Descripción		
$\% \text{ nopal}$	Porcentaje de los cladodios l nopal sobre el total del sustrato de codigestión	%	36,5
$\% \text{ purín}$	Porcentaje del purín sobre el total del sustrato de codigestión	%	63,5
$Q_{m, \text{SustCodg}}$	Caudal másico del sustrato de codigestión	t/d	142,9
Q_{SustCodg}	Caudal volumétrico del sustrato de codigestión	m ³ /d	149,8
$Q_{m, \text{SV}}^{\text{SustCodg}}$	Caudal másico de sólidos volátiles del sustrato de codigestión	t/d	6,55
$Gen_{\text{biogás}}$	Generación de biogás	Nm ³ /d	2565,4
$\% \text{ CH}_{4, \text{biogás}}$	Porcentaje de metano en el biogás	%	60
$A_{\text{CultvNopal}}$	Área requerida para el cultivo de nopal	ha	232,2

8.2. Tratamiento mecánico del nopal

Con el fin de mejorar la homogeneización con el purín de cerdo, así como el contacto de la materia orgánica con los microorganismos, los cladodios de nopal serán procesados mecánicamente previamente a su ingreso al tanque de mezcla. Una vez cosechados, los cladodios serán almacenados temporalmente en un espacio reservado para dicho propósito, para posteriormente ser usados en la alimentación de los biodigestores.

Para el procesamiento mecánico de los cladodios de nopal, se ha elegido el modelo de triturador Standard Model 760 Tub Grinder fabricado por la compañía Roto Grind (ver figura 8.1). Las características técnicas principales de este equipo se vuelcan en la tabla 8.2.



Figura 8.1. Imagen ilustrativa de la trituradora modelo Standard Model 760 Tub Grinder. Obtenida de www.rotogrind.com

Tabla 8.2. Resumen características del triturador modelo Standard Model 760 Tub Grinder. Ver detalles en anexo 8.1

Parámetro	Unidad	Valor
Modelo	-	Standard Model 760 Tub Grinder
Tecnología	-	Molino de martillos
Potencia nominal	kW	67
Capacidad de procesamiento	t/h	Triturado fino: 5-12

Con el fin de optimizar los costos y el proceso de operación de la trituración de los cladodios, a continuación se calculan las horas de funcionamiento. Asumiendo la compra e instalación de un único equipo, mediante la ecuación 8.1 se formalizó dicho cálculo

$$t_{op, trit} = \frac{Q_{m, SustCodg} \frac{\% nopal}{100\%}}{Capc_{trit}} \quad \text{Ecuación 8.1}$$

Donde:

$t_{op, trit}$: Horas operativas del equipo de trituración. **Valor: 9 h/d**

$Q_{m, SustCodg}$: Caudal másico del sustrato de codigestión. **Valor: 142,9 t/d**

$\% nopal$: Porcentaje de nopal sobre la masa total del sustrato de codigestión. **Valor: 36,5 %**

$Capc_{trit}$: Capacidad de procesamiento del triturador. **Valor: 6 t/h. Criterio: Se opera al equipo a un 50% de su capacidad máxima.**

8.3. Tanque de mezcla y homogeneización

El objetivo del tanque de mezcla y homogeneización es recibir y almacenar los sustratos a codigerir. La relación adoptada fue 0,365 nopal/sust. mezcla, lo que equivale que el 36,5 % de la masa del sustrato de codigestion se corresponde a cladodios de nopal procesados, mientras que el 63,5 % a purín de cerdo. En esta unidad los sustratos, una vez que ingresa, serán mantenidos en mezcla completa garantizando la homogeneidad del sustrato de input al reactor.

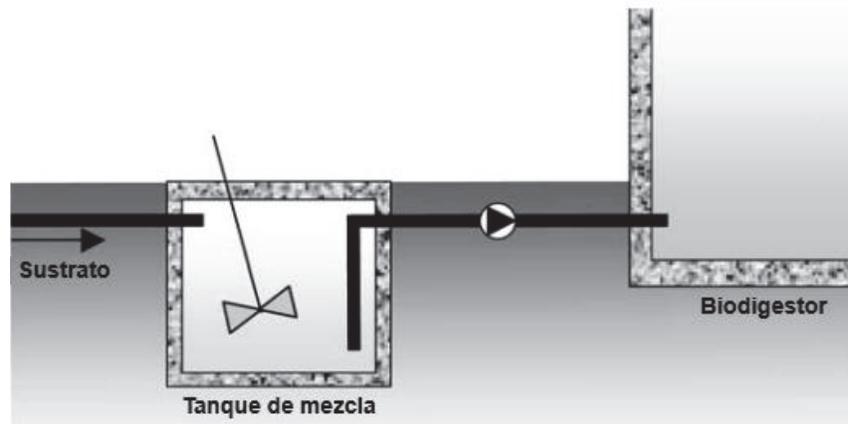


Figura 8.2. Esquema de tanque de mezcla en una planta de biogás. Adaptado de Wellinger et al. (2013)

8.3.1. Dimensionamiento del tanque de mezcla

Para calcular el volumen útil de la unidad se empleó la ecuación 8.2, tomando como parámetro de dimensionamiento el tiempo de permanencia en el tanque de los sustratos. De acuerdo a Wellinger et al. (2013) se recomienda que tenga una capacidad para el almacenamiento de sustrato entre 1 y 3 días.

El diámetro del tanque se obtuvo a partir de la ecuación 8.3, habiendo definido una geometría cilíndrica y una altura en 5 m. Vale resaltar que toda la unidad va a estar construida en hormigón armado, y en la parte superior que estará hermetizada mediante un gasómetro de caucho EPDM. Esto tiene como objetivo almacenar provisoriamente el biogás que se pueda ir generando. En la tabla 8.3, se resumen los parámetros de diseño más importantes del tanque de mezcla.

$$V_{\text{útil, mezcla}} = Q_{\text{SustCodg}} \theta \quad \text{Ecuación 8.2}$$

Donde:

$V_{\text{útil, mezcla}}$: Volumen útil del tanque de mezcla. **Valor: 450 m³**

Q_{SustCodg} : Caudal volumétrico de sustrato de codigestión. **Valor: 149,8 m³/d**

θ : Tiempo de permanencia del sustrato en la cámara. **Valor: 3 d**

$$D_{\text{mezcla}} = 2 \sqrt{\frac{V_{\text{útil, mezcla}}}{\pi h_{\text{útil, mezcla}}}} \quad \text{Ecuación 8.3}$$

Donde:

D_{mezcla} : Diámetro del tanque de mezcla. **Valor: 10,8 m**

$V_{\text{útil, mezcla}}$: Volumen útil del tanque de mezcla. **Valor: 450 m³**

$h_{\text{útil, mezcla}}$: Altura del útil del tanque de mezcla. **Valor: 5 m**

Tabla 8.3. Resumen de los parámetros de dimensionamiento más importantes del tanque de mezcla

Parámetro de diseño	Unidad	Valor	Observación
Geometría	-	Cilíndrica	-
Cantidad de unidades	-	1	-
Volumen útil	m ³	450	Valor redondeado
Altura útil	m	5	-
Altura de diseño		5,5	Se corrige la altura útil por un factor de seguridad de 0,5 m
Diámetro de diseño	m	10,8	-
Volumen de diseño	m ³	510	-
Material construcción	-	Hormigón armado	No se agrega material aislante en las paredes La parte superior se hermetiza mediante un gasómetro de caucho EPDM
Espesor paredes	m	0,2	-

8.3.2. Sistema de mezcla

El sistema de mezcla en esta unidad es su componente más importante. A esta llegarán los sustratos por separado, respetando la relación adoptada, y deberán ser mezclados adecuadamente para garantizar la homogeneidad. De no ocurrir eficientemente, el proceso de degradación del sustrato de codigestion en el biodigestor se puede ver afectado.

El parámetro que se consideró para el cálculo de la cantidad de agitadores necesarios, fue la potencia volumétrica. De acuerdo a Grady et al. (2011), el rango de potencia necesaria de ser entregada para garantizar la mezcla en un biodigestor se encuentra entre los 0,005 y 0,008 kW/m³. Para el tanque de mezcla se adoptó dicho rango. Una vez calculado el requisito de potencia según el volumen útil de sustrato, se eligió un modelo de equipo y se calculó la cantidad de unidades necesaria.

La potencia necesaria a entregar por los agitadores dentro del homogeneizador, se computó empleando la ecuación 8.4. Para ello se asumió una eficiencia mecánica del agitador y se consideró el valor promedio del rango de potencia volumétrica previamente adoptado.

$$P_{mezcla} = V_{\text{útil, mezcla}} P_{vol} \frac{\eta_{eje}}{100\%} \frac{\eta_{mec}}{100\%} \quad \text{Ecuación 8.4}$$

Donde:

P_{mezcla} : Potencia a entregar necesaria para la mezcla. **Valor: 3,84 kW**

$V_{\text{útil, mezcla}}$: Volumen del tanque de mezcla. *Valor: 450 m³*

P_{vol} : Potencia volumétrica adoptada para garantizar la mezcla dentro de la unidad. *Valor: 0,0065 kW/m³*

η_{eje} : Eficiencia mecánica eje del agitador. *Valor: 95 %*

η_{mec} : Eficiencia mecánica del agitador. *Valor: 80 %*

Una vez calculada la potencia necesaria a entregar, se seleccionó el equipo agitador a instalar. Para este propósito se eligió el agitador adaptativo compacto Flygt 4230 de la empresa Xylem (ver figura 8.3). Las características principales de este equipo se vuelcan en la tabla 8.4.



Figura 8.3. Imagen ilustrativa del mezclador sumergible Flygt 4230 de la empresa Xylem. Obtenido de www.xylem.com

Tabla 8.4. Resumen características del mezclador sumergible Flygt 4230 de la empresa Xylem. Elaborado a partir de anexo 8.2

Parámetro	Unidad	Valor
Modelo	-	Agitador adaptativo compacto Flygt 4230 4 kW
Potencia nominal	kW	4
RPM	rev/min	Regulable. Máxima: 290
Diámetro hélices	mm	770

Finalmente, conociendo la potencia necesaria a entregar y la del mezclador, se pudo calcular la cantidad de unidades del equipo mediante la ecuación 8.5.

$$n_{mezcla} = \frac{P_{mezcla}}{P_{eq. mezcla}} \quad \text{Ecuación 8.5}$$

Donde:

n_{mezcla} : Unidades del equipo mezclador a instalar en el tanque de mezcla. **Valor: 1**

P_{mezcla} : Potencia a entregar necesaria para la mezcla. *Valor: 3,84 kW*

$P_{eq. mezcla}$: Potencia que entrega el equipo mezclador. *Valor: 4 kW*

8.4 Biodigestor

El biodigestor constituye la unidad principal de la planta. Allí la materia orgánica de los sustratos a codigerir ingresarán y serán degradados en condiciones anaeróbicas para su transformación en dos subproductos, biogás y digerido. Tal como se ha discutido en la sección 6.4, el dimensionamiento de esta unidad debe cumplir con dos criterios fundamentales:

- Los microorganismos deben estar en contacto el tiempo suficiente para la correcta degradación de la materia orgánica
- La concentración de la materia a procesar no debe superar niveles que inhiban a los microorganismos

Para cumplir con los requisitos anteriormente mencionados, de acuerdo a Wellinger et al. (2013) comúnmente se emplean los parámetros de diseño denominados como Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) y Carga Orgánica Volumétrica (COV). Esto determina el volumen necesario y por ende el resto de las dimensiones.

La tecnología adoptada para esta unidad corresponde a un reactor de mezcla continua (CSTR, por sus siglas en inglés). Para asegurar condiciones óptimas en la degradación de la materia orgánica, es fundamental mantener una mezcla homogénea entre el sustrato y la biomasa microbiana, además de conservar la temperatura dentro del rango de temperatura de operación establecido. Con este propósito, se instalarán mezcladores que favorecerán la homogeneización constante del sustrato, mientras que el aislamiento térmico en las paredes y un sistema de intercambio de calor contribuirán a mantener la temperatura estable.

8.4.1. Dimensionamiento del biodigestor

El volumen del biodigestor se calculó empleando los parámetros de diseño del TRH y COV. Una vez obtenidos ambos resultados, se optó por el valor máximo de manera de garantizar que se cubran los requisitos necesarios que debe cumplir la unidad.

En el caso de reactores de agitación continua (CSTR, por sus siglas en inglés), de acuerdo a Wellinger et al. (2013) la COV de diseño recomendada se encuentra en el rango entre 2 y 3 kgSV/m³d. A partir de la ecuación 8.7 se calculó el volumen útil del reactor a partir de este parámetro.

$$COV_{biodg} = \frac{Q_{m,SustCodg} SV_{SustCodg}}{V_{\acute{u}til,biodg}} = \frac{Q_{m,SV}^{SustCodg}}{V_{\acute{u}til,biodg}} \quad \text{Ecuación 8.6}$$

$$V_{\acute{u}til,biodg} = \frac{Q_{m,SV}^{SustCodg}}{COV_{biodg}} \quad \text{Ecuación 8.7}$$

Donde:

$V_{\acute{u}til,biodg}$: Volumen útil del biodigestor. **Valor: 2619 m³**

$Q_{m,SV}^{SustCodg}$: Caudal másico de sólidos volátiles del sustrato de codigestion. *Valor: 6550 kgSV/d*

COV_{biodg} : Carga orgánica volumétrica. *Valor: 2,5 kgSV/m³d*

El Tiempo de Retención Hidráulico (TRH) adoptado se definió en función de dos criterios. Primero, se buscó evitar el lavado de microorganismos sin sobredimensionar la unidad, estableciendo un tiempo de permanencia superior a 10 días (Wellinger et al., 2013) y menor a 50 días (FAO, 2019). El segundo criterio consideró los tiempos de degradación de los sustratos obtenidos experimentalmente. Para ello, se determinó que el TRH de diseño fuese tres veces el t_{80} del sustrato con degradación más lenta, en este caso, el purín de cerdo. Finalmente, a partir de la ecuación 8.9, se calculó el volumen útil del reactor con base en este parámetro.

$$TRH_{biodg} = \frac{V_{\acute{u}til,biodg}}{Q_{SustCodg}} \quad \text{Ecuación 8.8}$$

$$V_{\acute{u}til,biodg} = TRH_{biodg} Q_{SustCodg} \quad \text{Ecuación 8.9}$$

$V_{\acute{u}til,biodg}$: Volumen útil del biodigestor. **Valor: 3600 m³**

$Q_{SustCodg}$: Caudal volumétrico de sustrato de codigestión. *Valor: 149,8 m³/d*

TRH_{biodg} : Tiempo de retención hidráulico. *Valor: 24 d. Criterio: Tres veces el t_{80} del purín de cerdo (ver tabla 6.2)*

Una vez calculado el volumen útil que debe tener el biodigestor y habiendo hecho los precálculos sobre las dimensiones finales del mismo, se ha optado por dividir el caudal de sustrato en dos corrientes de 74,9 m³/d. Cada una se dirigirá a biodigestores independientes. Mediante la ecuación 8.10, habiendo definido una geometría cilíndrica y una altura útil de 7 m, se calculó el diámetro de cada biodigestor.

$$D_{biodg} = 2 \sqrt{\frac{V_{\text{útil, biodg}}}{\pi h_{\text{útil, biodg}}}}$$
Ecuación 8.10

Donde:

D_{biodg} : Diámetro del Biodigestor. **Valor: 17,5 m**

$V_{\text{útil, biodg}}$: Volumen útil del biodigestor. **Valor: 1800 m³**

$h_{\text{útil, biodg}}$: Altura útil del biodigestor. **Valor: 7 m**

Vale resaltar que toda la unidad va a estar construida en hormigón armado, incluyendo paredes laterales y techo. Además, estará enterrada hasta una profundidad de 2 metros. En la tabla 8.5, se resumen los parámetros de diseño más importantes

Tabla 8.5. Resumen de los parámetros de dimensionamiento más importantes del biodigestor

Parámetro de diseño	Unidad	Valor	Observación
Geometría	-	Cilíndrica	-
Cantidad de unidades	-	2	Cada una recibe una caudal de 74,9 m ³ /d
Volumen útil	m ³	1800	-
Altura útil	m	7	-
Altura de diseño	m	7,5	Se corrige la altura útil por un factor de seguridad de 0,5 m
Diámetro de diseño	m	18,1	-
Volumen de diseño	m ³	1930	-
Material construcción	-	Hormigón armado	Se coloca material aislante en la parte superior de la pared lateral y el piso para reducir las pérdidas de calor
Espesor paredes	m	0,2	Parte superior
		0,3	Parte enterrada

8.4.2. Sistema de mezcla

La mezcla dentro del biodigestor tiene dos objetivos principales. Uno de ellos es garantizar la homogeneización, el segundo generar el mayor contacto entre la biomasa microbiana y el sustrato a degradar. Por otro lado, debe estar correctamente dimensionada, de manera de que se evite la sedimentación y acumulación de sólidos en el reactor. De no cumplirse esto, hará que el proceso de degradación anaeróbica no ocurra de manera eficiente, disminuyendo la producción de biogás y aumentando la carga orgánica del digerido.

Al igual que en el tanque de mezcla, el parámetro que se consideró para el cálculo de la cantidad de agitadores necesarios, fue la potencia volumétrica. De acuerdo a Grady et al. (2011), el rango de potencia necesaria de ser entregada para garantizar la mezcla en un biodigestor se encuentra entre los 0,005 y 0,008 kW/m³. Una vez calculado el requisito de potencia según el volumen útil de sustrato a homogeneizar, se eligió un modelo de equipo y se calculó la cantidad de unidades necesarias.

La potencia necesaria a entregar por los agitadores dentro del homogeneizador, se computó empleando la ecuación 8.11. Para ello se asumió una eficiencia mecánica del agitador y se consideró el valor promedio del rango de potencia volumétrica planteado por Grady et al. (2011).

$$P_{biodg} = V_{\text{útil, biodg}} P_{vol} \frac{\eta_{eje}}{100\%} \frac{\eta_{mec}}{100\%} \quad \text{Ecuación 8.11}$$

Donde:

P_{biodg} : Potencia a entregar necesaria para la mezcla en el biodigestor. **Valor: 15,4 kW**

$V_{\text{útil, biodg}}$: Volumen útil del biodigestor. **Valor: 1800 m³**

P_{vol} : Potencia volumétrica adoptada para garantizar la mezcla dentro de la unidad. **Valor: 0,0065 kW/m³**

η_{eje} : Eficiencia mecánica eje del agitador. **Valor: 95 %**

η_{mec} : Eficiencia mecánica del agitador. **Valor: 80 %**

Una vez calculada la potencia necesaria a entregar, se seleccionó el equipo agitador a instalar. Para este propósito se eligió el modelo Flygt 4230 de la empresa Xylem (ver figura 8.4). Las características principales de este equipo se vuelcan en la tabla 8.6.

Figura 8.6. Características principales del mezclador sumergible Flygt 4230 de la empresa Xylem. Ver detalles en anexo 8.2

Parámetro	Unidad	Valor
Modelo	-	Agitador adaptativo compacto Flygt 4230 5.5 kW
Potencia nominal	kW	5,5
RPM	rev/min	Regulable. Máxima: 290
Diámetro hélices	m	0,77

Conociendo la potencia necesaria a entregar y la del mezclador, se calculó la cantidad de unidades del equipo en cada biodigestor mediante la ecuación 8.11.

$$n_{biodg} = \frac{P_{biodg}}{P_{eq. mezcla}} \quad \text{Ecuación 8.11}$$

Donde:

n_{biodg} : Unidades del equipo mezclador a instalar en el biodigestor. **Valor: 3**

P_{biodg} : Potencia a entregar necesaria para la mezcla. **Valor: 15,4 kW**

$P_{eq. mezcla}$: Potencia que entrega el equipo mezclador. **Valor: 5,5 kW**

Para evitar la formación de vórtices durante el mezclado, de acuerdo a Paul et al. (2004) este tipo de mezcladores de entrada lateral deben ser colocados en un ángulo de 10° sobre el eje central de la unidad. De esta forma se logra un flujo dentro del reactor que permite que la mezcla ocurra de manera adecuada y no haya, por ejemplo, acumulación de sólidos en el centro del biodigestor. En la figura 8.4, se presentan diferentes configuraciones para el caso en que se instalen más de un mezclador.

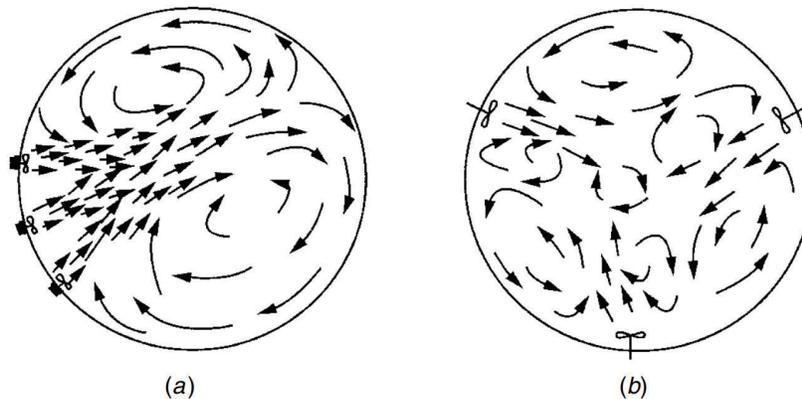


Figura 8.4. Configuraciones de instalación de agitadores de entrada lateral sumergibles. Obtenido de Paul et al. (2004).

Considerando lo planteado previamente, en este caso en el que se deben instalar tres mezcladores, serán posicionados a una distancia de 120° uno de otro. Además estarán direccionados de manera que formen un ángulo de 10° hacia la izquierda con el eje central de la unidad. De esta forma, se asegurará una cobertura uniforme y se evitarán las zonas muertas.

Con el fin de poder controlar la altura del agitador, y de esa manera contribuir a evitar la existencia de zonas muertas, los equipos estarán instalados sobre el soporte modelo Flygt BIS-1 de la marca Xylem (ver figura 8.5). Este es compatible con el agitador adaptativo compacto Flygt 4230. Adicionalmente, el soporte facilitará la extracción de los agitadores para tareas de mantenimiento y reparación.



Figura 8.5. Imagen ilustrativa del soporte modelo Flygt BIS-1 de la marca Xylem. Obtenido de www.xylem.com

8.4.3. Aislamiento de la unidad

El biodigestor va a operar a una temperatura de 37 °C, lo cual define que el mismo funcione en el rango mesofílico. En este sentido, un punto importante son las pérdidas de calor mediante conducción desde el interior del biodigestor al ambiente que deben ser reducidas y compensadas para así mantener la temperatura de operación.

Para reducir las pérdidas de calor, se colocará material aislante en las paredes del biodigestor. Dicho material se dispondrá tanto en las paredes laterales así como en el piso. El material a emplear estará determinado por la posibilidad de colocarla sin afectar la estructura de la unidad, la cual será construida en hormigón armado.

Para disminuir las pérdidas de calor mediante conducción a través de las paredes laterales no enterradas del biodigestor, se colocará una capa de espuma expansiva de poliuretano (ver figura 8.6). El espesor del material a colocar será de 0,1 m. Adicionalmente, la pared se recubrirá exteriormente con chapas cincalum recubiertas con pintura epoxi para la protección del aislante.



Figura 8.6. Colocación de espuma de poliuretano. Obtenido de www.oneinsulation.co.uk

En el caso del piso del biodigestor, para reducir las pérdidas de calor desde el interior hacia el suelo se emplea poliestireno expandido (ver figura 8.7). Con el fin de no afectar la estructura sobre la que se erige la unidad, este material estará colocado entre capas de hormigón armado. La capa de poliestireno tendrá un espesor de 0,1 m.



Figura 8.7. Colocación de placas de poliestireno expandido en el piso. Obtenido de www.buyinsulationonline.co.uk

En la tabla 8.7 se resume la información relevante al aislamiento térmico del biodigestor. Dicha información es de importancia para los posteriores cálculos de las pérdidas de calor que se deberán compensar.

Tabla 8.7. Resumen aislamiento térmico del biodigestor

Pared del biodigestor	Material aislante	Espesor	Conductividad térmica del material aislante (k)
<i>Lateral (área superior)</i>	Espuma expansiva de poliuretano	0,1 m	$5,28 \cdot 10^{-4} \text{ kWh/d m } ^\circ\text{C}$
<i>Piso</i>	Poliestireno expandido	0,1 m	$8,88 \cdot 10^{-4} \text{ kWh/d m } ^\circ\text{C}$

8.4.4. Gasómetro

En su parte superior, cada biodigestor estará hermetizado mediante la instalación de un gasómetro. Este tendrá como objetivo acumular el biogás desulfurado a medida que se va generando y mantener una presión constante dentro del sistema. Para su dimensionamiento se estableció una condición mínima de capacidad del gasómetro para almacenar el biogás.

Como condición mínima para la elección del gasómetro a instalar, se debe cumplir que pueda almacenar el biogás generado durante dos horas. El corto tiempo definido para el dimensionamiento, se debe a que el cogenerador va a estar operando durante las 24 horas. La capacidad requerida que debe tener el gasómetro se ha calculado mediante la ecuación 8.12.

$$V_{gas, min} = Gen_{biogás, T_{ver}} t_{almc} f \quad \text{Ecuación 8.12}$$

Donde:

$V_{gas, min}$: Capacidad mínima requerida del gasómetro. **Valor: 343,5 m³**

$Gen_{biogás, T_{ver}}$: Generación de biogás corregida por la temperatura de verano (ver tabla 6.3). **Valor: 57,2 m³/h**

t_{almc} : Tiempo de almacenamiento del biogás. **Valor: 4 h**

f : Factor de seguridad. **Valor: 1,5. Se corresponde con una corrección del 50 %**

El tipo de gasómetro a instalar en cada biodigestor será de membrana simple fabricado en caucho EPDM comercializado por la empresa Zorg Biogas (ver figura 8.8). A diferencia de los gasómetros de PVC, estos no necesitan una cúpula protectora externa y ni tampoco un soplador de aire para dar forma y presurizar el biogás. La membrana de goma crea la presión necesaria cuando se estira. Este material, además, se caracteriza por ser resistente a los rayos ultravioleta y al sulfuro de hidrógeno. En la tabla 8.8, se resumen las características del gasómetro de acuerdo al catálogo del fabricante.



Figura 8.8. Gasómetro de membrana simple instalado en un biodigestor. Obtenido de www.zorg-biogas.com

Tabla 8.8. Resumen características del gasómetro a colocar en los biodigestores. Ver detalles en anexo 8.3

Parámetro de diseño	Unidad	Valor	Observación
Material	-	Caucho EPDM	-
Espesor membrana	mm	2	-
Diámetro	m	18,1	-
Altura	m	3,6	-
Volumen	m ³	373	$V_{gas, min} : 343,5 \text{ m}^3$

8.5. Equipo cogenerador y generación de energía

El equipo de cogeneración recibirá el biogás previamente tratado, desulfurado y deshumidificado, para su combustión. De esta forma se obtendrá energía eléctrica y energía térmica o calorífica. Una parte de la energía eléctrica generada será usada para el funcionamiento de los equipos electromecánicos, mientras que la mayor proporción tendrá como destino su venta como energía limpia. Por otro lado, la energía calorífica será aprovechada para elevar la temperatura del agua de servicio (o fluido caliente) del IC que posteriormente será transferido a la mezcla de inóculo y sustrato en el interior de cada biodigestor (o fluido frío).

Para la elección del equipo de cogeneración, primero se computó la energía a producir por la quema del biogás asumiendo valores de eficiencias de generación de energía de bibliografía. Con dicha información fue posible evaluar catálogos de fabricantes disponibles y elegir el modelo que mejor se ajustaba al caso. Este fue un proceso iterativo que se repitió hasta que se halló el equipo que cumplía con las especificaciones, y finalmente se corrigió por las eficiencias de conversión correspondientes.

El modelo del cogenerador elegido para ser instalado en la planta es el J208 de la marca Jenbacher (ver figura 8.9). Se instalará un único equipo de cogeneración que será suficiente para la combustión total del biogás a generar. Las características técnicas principales se resumen en la tabla 8.9.

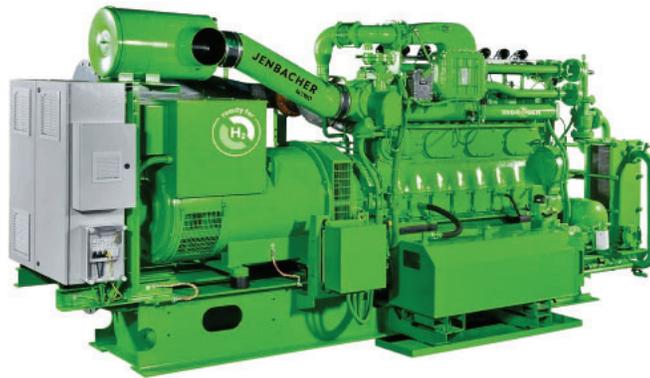


Figura 8.9. Imagen ilustrativa del cogenerador J208 de la marca Jenbacher

Tabla 8.9. Características principales del cogenerador J208 de la marca Jenbacher. Ver detalles en anexo 8.4

Parámetro	Unidad	Valor
Modelo	-	J208-Jenbacher
Rango de potencia eléctrica	kW	250-360
Rango de potencia calorífica	kW	266-414
Eficiente eléctrica (η_{el})	%	38,2
Eficiente calorífica (η_{cal})	%	47,9
Cantidad de equipos	-	1

La generación de energía eléctrica y calorífica se calculó a partir de la información correspondiente a la producción de biogás diaria y la composición porcentual de metano (ver tabla 8.1). Esto se debe a que el metano generado es el compuesto que, al oxidarse, genera energía en el biogás. Adicionalmente, adoptando las eficiencias del equipo de cogeneración a instalar (ver tabla 8.9) mediante las ecuaciones 8.13 y 8.14 fue posible estimar la energía a producir.

$$E_{E, cog} = Gen_{biogás} \frac{\% CH_{4, biogás}}{100 \%} PCI_{CH_4} \frac{\eta_{el}}{100 \%} \quad \text{Ecuación 8.13}$$

$$E_{C, cog} = Gen_{biogás} \frac{\% CH_{4, biogás}}{100 \%} PCI_{CH_4} \frac{\eta_{cal}}{100 \%} \quad \text{Ecuación 8.14}$$

Donde:

$E_{E, cog}$: Energía eléctrica producida en la unidad de cogeneración por la combustión del biogás.

Valor: 6,174 MWh/d

$E_{C, cog}$: Energía calorífica producida en la unidad de cogeneración por la combustión del biogás.

Valor: 7,742 MWh/d

$Gen_{biogás}$: Generación de biogás. *Valor: 2565,4 Nm³CH₄/d*

$\% CH_{4, biogás}$: Porcentaje de metano en el biogás. *Valor: 60 %*

PCI_{CH_4} : Poder calorífico inferior del metano. *Valor: 0,0105 MWh/Nm³CH₄*

η_{el} : Eficiencia calórica/térmica del equipo cogenerador. *Valor: 38,2 %*

η_{cal} : Eficiencia calórica/térmica del equipo cogenerador. *Valor: 47,9 %*

Considerando que el equipo va a estar operativo durante las 24 horas del día, se realizó la verificación correspondiente del equipo a instalar de acuerdo a las especificaciones técnicas del mismo (ver tabla 8.9). Las ecuaciones 8.15 y 8.16 permiten computar las potencias correspondientes de acuerdo a la generación de energía y las horas operativas.

$$P_{E, cog} = \frac{E_{E, cog}}{t_{op}} \quad \text{Ecuación 8.15}$$

$$P_{C, cog} = \frac{E_{C, cog}}{t_{op}} \quad \text{Ecuación 8.16}$$

Donde:

$P_{E, cog}$: Potencia eléctrica de la unidad de cogeneración por la combustión del biogás. **Valor: 257,2**

KW

$P_{C, cog}$: Potencia eléctrica de la unidad de cogeneración por la combustión del biogás. **Valor: 322,6**

KW

$E_{E, cog}$: Energía eléctrica producida en la unidad de cogeneración por la combustión del metano.

Valor: 6,174 MWh/d

$E_{C, cog}$: Energía calorífica producida en la unidad de cogeneración por la combustión del biogás.

Valor: 7,742 MWh/d

t_{op} : Horas operativas de la unidad de cogeneración. Valor: 24 h

Los resultados obtenidos muestran que la potencia eléctrica es levemente menor al rango de trabajo del equipo, mientras que la calorífica se encuentra en el rango correspondiente. De esta manera, es posible confirmar que el modelo del equipo elegido es el adecuado y se va a poder aprovechar sus capacidades de manera eficiente.

8.6. Intercambiador de calor

La instalación del equipo de intercambio de calor responde a dos propósitos fundamentales. Uno de ellos es calentar la mezcla de inóculo y sustrato que desciende de temperatura por el ingreso del sustrato de codigestión a temperatura ambiente. El segundo de los motivos es contrarrestar las pérdidas por intercambio de calor entre el interior del biodigestor y el medio circundante. En este apartado se desarrolla el cálculo para el dimensionamiento del sistema correspondiente.

8.6.1. Introducción a los intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor (IC) son aparatos que facilitan el intercambio de calor entre dos fluidos a diferentes temperaturas, sin que haya una mezcla entre estos. En un intercambiador de calor, la transferencia suele comprender convección en cada fluido y conducción a través de la pared que los separa. La razón de la transferencia de calor entre los fluidos dado en un IC, depende de la magnitud de la diferencia de temperatura local, la cual varía a lo largo de dicho aparato.

Las distintas aplicaciones y necesidades de transferencia de calor requieren de diferentes tipos de accesorios y configuraciones del equipo para dicha transferencia. En el intento de acoplar los diferentes accesorios del IC a cada necesidad dio lugar a numerosos tipos de diseños.

Los IC suelen operar durante largos periodos sin cambios en sus condiciones de operación. De esta manera, se los puede considerar como aparatos de flujo estacionario. El gasto de masa de cada fluido permanece constante y sus propiedades, como temperatura y velocidad, se mantienen inalteradas. Asimismo, las corrientes de fluido no experimentan cambios en sus velocidades y elevaciones, de forma que los cambios en la energía cinética y potencial son despreciables.

En general el calor específico de los fluidos que atraviesan los tubos de un intercambiador se considera constante en algún valor promedio con poca pérdida de exactitud. La conducción axial de calor a lo largo del tubo suele ser insignificante y se puede despreciar. Por último, se asume que la superficie del IC está perfectamente aislada, de modo que no hay pérdida de calor al medio. Cualquier transferencia de calor ocurre entre los dos fluidos intervinientes.

Las suposiciones adoptadas se aplican en la práctica a los IC, y permiten simplificar el análisis de un intercambiador con poco sacrificio de la exactitud. La velocidad o tasa de transferencia de calor en un intercambiador se puede expresar de una manera análoga a la ley de Newton del enfriamiento a partir de la ecuación 8.17.

$$Q = U A_s \Delta T_m \quad \text{Ecuación 8.17}$$

Donde:

Q : Tasa de transferencia de calor

U : Coeficiente total de transferencia de calor

A_s : Área de transferencia de calor

ΔT_m : Diferencia promedio de la temperatura entre dos fluidos

De acuerdo a la ecuación 8.17, los términos correspondientes a el U y A_s dependen de la configuración del IC y su operación, y constituyen términos fijos. De manera contraria, la diferencia entre los fluidos caliente y frío varía a lo largo del intercambiador, por lo que resulta conveniente considerar una diferencia de temperatura media (ΔT_m). Debido a la naturaleza exponencial de la diferencia de temperatura entre los fluidos, este término se expresa apropiadamente como la diferencia de temperatura media logarítmica (DTML o LMTD por sus siglas en inglés) tal como se muestra en la ecuación 8.18.

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad \text{Ecuación 8.18}$$

Donde:

ΔT_{ml} : Diferencia de temperatura media logarítmica

ΔT_1 : Diferencia de temperatura entre el fluido frío y caliente en uno de los extremos del intercambiador. Ver figura 8.10

ΔT_2 : Diferencia de temperatura entre el fluido frío y caliente en el extremo opuesto del intercambiador. Ver figura 8.10

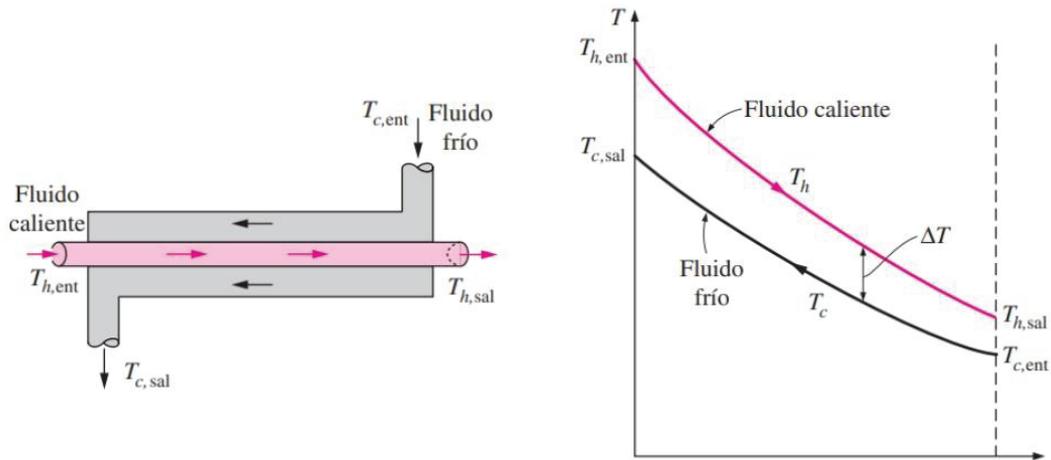


Figura 8.10. Representación del proceso de intercambio de calor en un IC de tubos dobles a contracorriente. Obtenido de Cengel (2011)

8.6.3. Calor a transferir a la mezcla inóculo-sustrato

Tal como se ha mencionado anteriormente, el contacto entre la mezcla de inóculo y sustrato con la unidad de IC tendrá como objetivo aportar al sustrato el calor necesario para:

- Elevar la temperatura a 37 °C de la mezcla de inóculo y sustrato debido al enfriamiento por ingreso del sustrato de codigestión a temperatura ambiente
- Aportar un adicional de calor que permita contrarrestar las pérdidas de calor por conducción a través de las paredes del biodigestor

Bajo esta consigna es que se calculó el calor necesario a transferir desde el fluido caliente (agua de servicio) al fluido frío (mezcla de inóculo-sustrato). La ecuación 8.19, permite formalizar el cálculo como suma de dos términos. Cada uno de ellos cumple con los objetivos de la instalación del IC.

$$E_{C,IC} = E_{C,SustCodg} + E_{C,biodg} \quad \text{Ecuación 8.19}$$

Donde:

$E_{C,IC}$: Energía calorífica total necesaria de aportar en el equipo de IC

$E_{C,SustCodg}$: Energía calorífica requerida para calentar a 37 °C el sustrato de codigestión

$E_{C,biodg}$: Energía calorífica requerida para mantener la temperatura en el interior del biodigestor a 37 °C

Energía calórica para calentamiento del sustrato de codigestión

La energía calorífica necesaria a aportar al sustrato de codigestion que ingresa a cada biodigestor para aumentar su temperatura a 37 °C se calculó a partir de la ecuación 8.20. Cabe señalar que en este caso, a diferencia de lo que se realizó en el análisis de la sección 6.1, se va a considerar como temperatura de entrada del sustrato la temperatura de invierno (ver tabla 6.3). Esto garantiza que a la hora de elegir el modelo del equipo IC va a estar contemplado el caso extremo.

$$E_{C,SustCodg} = Q_{m,SustCodg} C_{p,SustCodg} (T_{e,SustCodg} - T_{s,SustCodg}) \quad \text{Ecuación 8.20}$$

Donde:

$E_{C,SustCodg}$: Energía calorífica requerida para calentar a 37 °C el sustrato de codigestion que ingresa a cada biodigestor. **Valor: 2,422 MWh/d**

$Q_{m,SustCodg}$: Caudal másico del sustrato de codigestión. *Valor: 71,4 t/d. Se considera el caudal másico que ingresa a cada biodigestor*

$C_{p,SustCodg}$: Calor específico del sustrato de codigestion. *Valor: 1,16 10⁻³ MWh/t °C. Se adopta el*

$C_{p,agua}$

$T_{e,SustCodg}$: Temperatura de entrada al sistema de calefacción del sustrato de codigestion. *Valor: 7,8 °C (Ver tabla 6.3)*

$T_{s,SustCodg}$: Temperatura de ingreso del sustrato de codigestion a cada biodigestor. *Valor: 37 °C*

Energía calórica para mantenimiento de la temperatura en el biodigestor

Para garantizar que la producción del biogás sea óptima, se debe asegurar que la temperatura de operación sea de 37 °C. En este sentido, el contacto entre la mezcla de inóculo y sustrato con el equipo IC tiene como segundo fin aportar un adicional de energía calorífica que contrarreste las pérdidas diarias por conducción a través de las paredes en cada biodigestor.

Un biodigestor funciona como un sistema no adiabático, de manera que va transferir energía calorífica desde su interior al ambiente a través de las paredes laterales, la cúpula y el piso. El calor total que pierde y que, por ende, deberá aportarse se puede considerar como la suma de las pérdidas individuales tal como se formaliza en la ecuación 8.21.

Cabe resaltar que para el cómputo de la energía que se pierde, tal como se ha hecho en la sección 6.5, se desprecia el término convectivo. Esto es posible de realizar bajo los supuestos de que el reactor se encuentra en equilibrio térmico con el exterior y de asumir que los vientos son predominantemente débiles. Por otro lado, también se desprecia el término radiativo.

$$E_{C, biodg} = q_{cond, lat}^{biodg} + q_{cond, piso}^{biodg} + q_{cond, cúp}^{biodg} + q_{conv}^{biodg} + q_{rad}^{biodg}$$

Ecuación 8.21

Donde:

$E_{C, biodg}$: Energía calorífica total que se pierde por conducción a través de las paredes del biodigestor

$q_{cond, lat}^{biodg}$: Energía calorífica que se pierde por conducción a través de la pared lateral del biodigestor

$q_{cond, piso}^{biodg}$: Energía calorífica que se pierde por conducción a través del piso del biodigestor

$q_{cond, cúp}^{biodg}$: Energía calorífica que se pierde por conducción a través de la cúpula del biodigestor

q_{conv}^{biodg} : Energía calorífica que se pierde por convección. Valor: ~ 0 . Se asume que es despreciable

q_{rad}^{biodg} : Energía calorífica que se pierde/gana por radiación. Valor: ~ 0 . Se asume que es despreciable

Pérdidas por conducción de la pared lateral

Cada uno de los biodigestores estará enterrado 2 metros, de forma que la transferencia de calor en la parte superior no será la misma que en la parte inferior. La ecuación 8.22 permite computar la transferencia total de calor entre el interior y el exterior por conducción para cada unidad cuya geometría es cilíndrica. Las figuras 8.11.A y 8.11.B, representan la estructura de la pared de las unidades según el caso, lo cual es luego considerado en el cálculo del calor transferido. Se asume estado estacionario.

Cabe señalar que en este caso, a diferencia de lo que se realizó en el análisis de la sección 6.5, se va a considerar como temperatura externa o ambiente para la parte superior, la temperatura de invierno (ver tabla 6.3). Mientras que para la parte enterrada, se considera la temperatura del suelo. Esto garantiza que a la hora de diseñar el equipo IC, se va a estar contemplado el caso extremo.

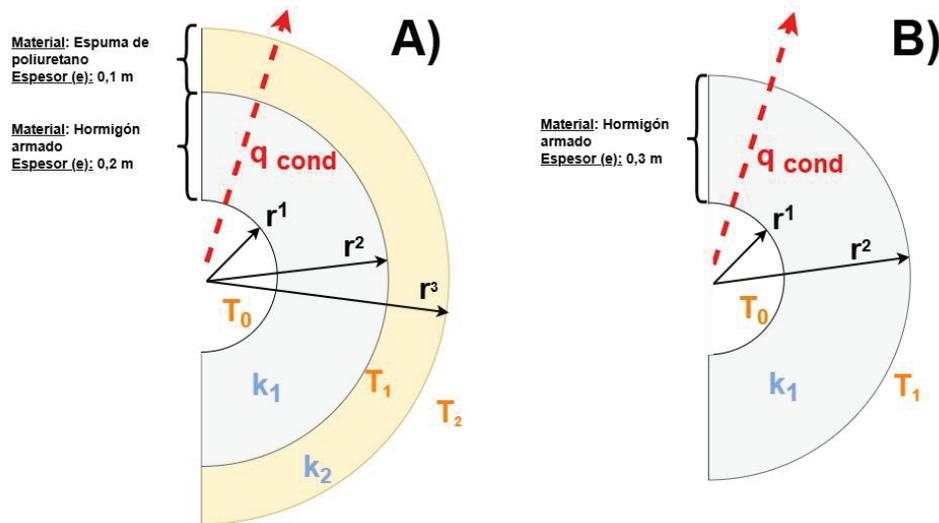


Figura 8.11. Esquema de transferencia de calor por conducción a través de la pared lateral de una unidad cilíndrica. Elaboración propia

$$q_{cond, lat}^{biodg} = \sum_{sección} U_{lat, sección}^{biodg} A_{lat, sección}^{biodg} (T_0^{biodg} - T_{ext, sección}^{biodg})$$

Ecuación 8.22

Vale la siguiente igualdad $\frac{1}{U_{lat, sección}^{biodg} A_{lat, sección}^{biodg}} = \sum_m \frac{\ln(r_{m+1}/r_m)}{2\pi h_{sección} k_m}$

Donde:

$q_{cond, lat}^{biodg}$: Energía calorífica que se pierde por conducción a través de la pared lateral del biodigestor. **Valor: 0,084 MWh/d.** Se asume que las pérdidas de calor ocurren las 24 hs del día

$U_{lat, sección}^{biodg}$: Coeficiente de transferencia de calor de las paredes laterales del biodigestor según la sección [W/m² °C]

$A_{lat, sección}^{biodg}$: Área de intercambio a través de las paredes laterales del biodigestor según la sección [m²]

T_0^{biodg} : Temperatura en el interior del biodigestor. **Valor: 37 °C**

$T_{ext, sección}^{biodg}$: Temperatura exterior del biodigestor según la sección. $T_{2, sup}^{biodg}$: Temperatura exterior de la sección superior del biodigestor. **Valor: 7,8 °C** (Ver tabla 6.3). $T_{1, inf}^{biodg}$: Temperatura exterior de la sección inferior del biodigestor. **Valor: 15 °C.** Se considera la temperatura del suelo.

r_{m+1} : Radio externo de la pared/material (m) aislante del biodigestor. **Valores: r_{biodg}^{biodg} : 9,05 m,**

$e_{pared, sup}$: 0,2 m, $e_{pared, inf}$: 0,3 m y $e_{aislante}$: 0,1 m (ver sección 8.4.3)

r_m : Radio interno de la pared/material aislante (m) del biodigestor. **Valores: *idem* r_{m+1}**

$h_{biodg, secc}$: Altura del biodigestor. **Valores: $h_{biodg, sup}$: 5,5 m y $h_{biodg, inf}$: 2 m**

k_m : Conductividad térmica de la pared/material aislante (m). **Valores:**

$k_{HormArmd}$: $3,912 \cdot 10^{-2}$ kWh/d m °C y $k_{poliuretano}$: $5,28 \cdot 10^{-4}$ kWh/d m °C (ver sección 8.4.3)

Pérdida por conducción en el piso

El modelado de la pérdida de calor por conducción desde el interior de la unidad hacia el ambiente por el piso de cada unidad, se realizó considerándola como una pared plana. Debido a la forma cilíndrica de cada biodigestor, este posee una geometría circular. La ecuación 8.23 permite calcular la transferencia de energía calórica hacia el exterior basada en el esquema de la figura 8.12 para dichas formas. Se asume estado estacionario.

Cabe señalar que en este caso, a diferencia de lo que se realizó en el análisis de la sección 6.5, se va a considerar como temperatura externa o ambiente la temperatura de invierno (ver tabla 6.3). Esto garantiza que a la hora de diseñar el equipo IC va a estar contemplado el caso extremo.

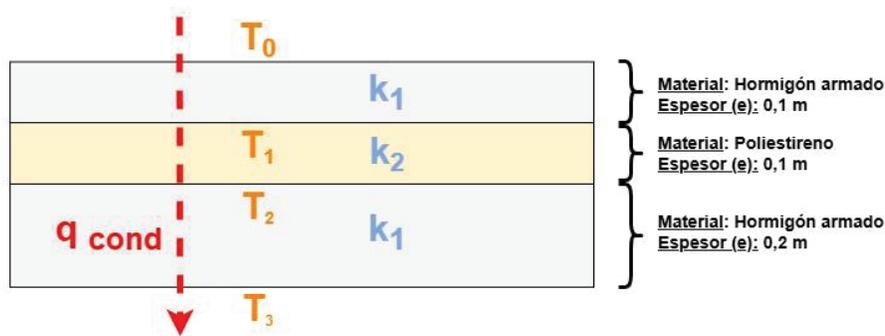


Figura 8.12. Esquema de transferencia de calor por conducción a través de una pared plana.
Elaboración propia

$$q_{cond,piso}^{biodg} = U_{piso}^{biodg} A_{piso}^{biodg} (T_0^{biodg} - T_3^{biodg}) \quad \text{Ecuación 8.23}$$

$$\text{Vale la siguiente igualdad } \frac{1}{U_{piso}^{biodg} A_{piso}^{biodg}} = \sum_m \frac{e_m}{k_m} \pi r_{biodg}^2$$

Donde:

$q_{cond,piso}^{biodg}$: Energía calórica que se pierde por conducción a través del piso. **Valor: 0,047 MWh/d.** Se asume que las pérdidas de calor ocurren las 24 hs del día

U_{piso}^{biodg} : Coeficiente de transferencia de calor del piso biodigestor [W/m² °C]

A_{piso}^{biodg} : Área de intercambio a través de las paredes laterales del biodigestor según la sección [m²]

$T_{0,biodg}$: Temperatura en el interior del biodigestor. **Valor: 37 °C**

$T_{3,biodg}$: Temperatura exterior del biodigestor. **Valor: 15 °C.** Se considera la temperatura del suelo

e_m : Espesor de la pared/material aislante (m). **Valores:** $e_{pared,1} = 0,1 m$, $e_{pared,2} = 0,2 m$ y $e_{aislante} = 0,1 m$

k_m : Conductividad térmica de la pared/material aislante (m). **Valores:** $k_{HormArmd} : 3,912 \cdot 10^{-2} kWh/d m$ °C y $k_{poliuretano} : 5,28 \cdot 10^{-4} kWh/d m$ °C (ver sección 8.4.3)

r_{biodg} : Radio interno del biodigestor. **Valor: 9,05 m**

Pérdida por conducción superior

El modelado de la pérdida de calor por conducción desde el interior de la unidad hacia el ambiente por parte superior de cada biodigestor, se realizó considerando la geometría del gasómetro. La forma del mismo se corresponde a un casquete esférico.

La ecuación 8.24 permite calcular la transferencia de energía calórica hacia el exterior basada en el esquema de la figura 8.13 para dicha geometría. Se asume operación en estado estacionario. Cabe aclarar que se va a considerar como temperatura externa o ambiente la temperatura de invierno (ver tabla 6.3). Esto garantiza que a la hora de elegir de diseñar el equipo IC va a estar contemplado el caso extremo.

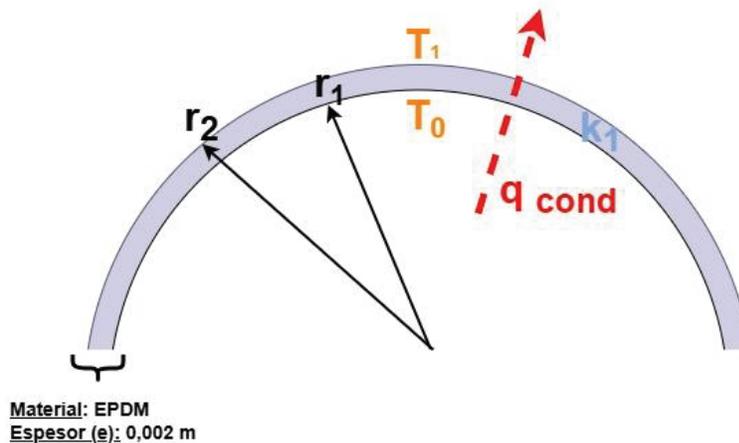


Figura 8.13. Esquema de transferencia de calor por conducción a través de un casquete esférico.
Elaboración propia

$$q_{cond, cúp}^{biodg} = U_{cúp}^{biodg} A_{cúp}^{biodg} (T_{0, biodg} - T_{1, biodg}) \quad \text{Ecuación 8.24}$$

Vale la siguiente igualdad $A_{cúp}^{biodg} = \pi (r_{cúp}^2 + h_{cúp}^2)$

Donde:

$q_{cond, cúp}^{biodg}$: Energía calorífica que se pierde por conducción a través de cúpula. **Valor: 0,319**

MWh/d. Se asume que las pérdidas de calor ocurren las 24 hs del día

$U_{cúp}^{biodg}$: Coeficiente de transferencia de calor de la cúpula de caucho EPDM del biodigestor. **Valor:** 2,08 W/m² °C (Obtenido de Teleszewski & Zukowski, 2018)

$A_{cúp}^{biodg}$: Área de intercambio a través de la cúpula del biodigestor. **Valor:** 278,9 m²

$T_{0, biodg}$: Temperatura en el interior del biodigestor. **Valor:** 37 °C

$T_{2, biodg}$: Temperatura de entrada al sistema de calefacción del sustrato de codigestión. **Valor:** 7,8 °C
(Ver tabla 6.3)

$r_{cúp}$: Radio de la cúpula del gasómetro. **Valor:** 9,05 m

$h_{cúp}$: Altura de la cúpula del gasómetro. **Valor:** 3,5 m

Cálculo de la pérdida de calor total

A partir de los resultados obtenidos para el cálculo de las pérdidas por conducción mediante las ecuaciones 8.22, 8.23 y 8.24, se computó el calor total que deberá ser aportado por cada biodigestor. La ecuación 8.21.b, previamente presentada, formaliza la suma de cada uno de los términos.

$$E_{C, \text{biodg}} = q_{\text{cond, lat}}^{\text{biodg}} + q_{\text{cond, piso}}^{\text{biodg}} + q_{\text{cond, cúp}}^{\text{biodg}} \quad \text{Ecuación 8.21.b}$$

Donde:

$E_{C, \text{biodg}}$: Energía calorífica total que se pierde por conducción a través de las paredes del biodigestor.

Valor: 0,450 MWh/d. Se asume que las pérdidas de calor ocurren las 24 hs del día

$q_{\text{cond, lat}}^{\text{biodg}}$: Energía calorífica que se pierde por conducción a través de la pared lateral del biodigestor. **Valor: 0,084 MWh/d**

$q_{\text{cond, piso}}^{\text{biodg}}$: Energía calorífica que se pierde por conducción a través del piso del biodigestor. **Valor: 0,047 MWh/d**

$q_{\text{cond, cúp}}^{\text{biodg}}$: Energía calorífica que se pierde por conducción a través de la cúpula del biodigestor. **Valor: 0,319 MWh/d**

Cálculo del calor total a transferir a la mezcla inóculo-sustrato

Tal como se ha desarrollado previamente, el equipo de IC aportará a la mezcla el calor necesario para contrarrestar al descenso de la temperatura por ingreso del sustrato de digestión así como por las las pérdidas por conducción por las paredes de cada unidad. A partir de los resultados obtenidos en las ecuaciones 8.20 y 8.21.b, fue posible calcular cada término de la energía calorífica total necesaria de proveer a la mezcla de inóculo-sustrato por cada biodigestor.

La ecuación 8.25 permite formalizar el cálculo de la energía calorífica necesaria de aportar a la mezcla de inóculo y sustrato, adaptando la ecuación 8.19 previamente presentada. Este parámetro será empleado posteriormente para el dimensionamiento del equipo IC.

$$E_{C,IC} = E_{C,SustCodg} + E_{C,biodg} \quad \text{Ecuación 8.25}$$

Donde:

$E_{C,IC}$: Energía calorífica total necesaria de aportar en el equipo de IC por biodigestor. **Valor: 2,872 MWh/d**

$E_{C,SustCodg}$: Energía calorífica requerida para calentar a 37 °C el sustrato de codigestion. **Valor: 2,422 MWh/d**

$E_{C,biodg}$: Energía calorífica requerida para mantener la temperatura en el interior de cada biodigestor a 37 °C. **Valor: 0,450 MWh/d**

8.6.4. Dimensionamiento del equipo de IC

Si bien el dimensionamiento y selección del equipo de IC fue un proceso iterativo, a continuación se desarrolla el procedimiento definitivo mediante el cual se dimensionó el equipo a instalar. El parámetro fundamental fue el calor necesario de transferir al sustrato de codigestion tal como se ha desarrollado en la sección anterior.

La tecnología de IC a implementar es la de un serpentín helicoidal. Dicho sistema se encontrará sumergido en el interior de cada biodigestor y será construido en acero inoxidable. Una vez definido lo anterior, se calculó el coeficiente global de transferencia. Luego, empleando y reformulando la ecuación 8.17, previamente presentada de manera genérica, se ha calculado el área necesaria de transferencia de calor necesaria (ecuación 8.26). Finalmente, fue posible obtener el largo del serpentín necesario mediante la ecuación 8.27.

$$A_{serp, disñ} = \frac{Q_{serp}}{U_{serp} \Delta T_{ml, SC-AS}} \quad \text{Ecuación 8.26}$$

$$L_{serp} = \frac{A_{serp, disñ}}{\pi D_{serp}} \quad \text{Ecuación 8.27}$$

Donde:

Q_{serp} : Tasa de transferencia de calor (potencia calorífica) del serpentín por biodigestor

U_{serp} : Coeficiente global de transferencia del serpentín

$A_{serp, disñ}$: Área requerida para la transferencia del serpentín

$\Delta T_{ml, SC-AS}$: Diferencia de temperatura media logarítmica entre la mezcla inóculo-sustrato (IS) y el agua de servicio (AS) en el serpentín

L_{serp} : Largo del serpentín

D_{serp} : Diámetro del serpentín

Cálculo de la tasa de transferencia de calor

La tasa de transferencia de calor a potencia calorífica del serpentín va a estar dada por la energía calorífica que se debe suministrar a la mezcla de inóculo y sustrato, tal como se ha calculado en el apartado anterior. Asumiendo una cantidad de horas de operación del sistema (determinado por las horas de funcionamiento del equipo de cogeneración), y corrigiendo por un factor de seguridad, se calcula dicha potencia mediante la ecuación 8.28.

$$Q_{serp} = \frac{E_{c,IC} f}{t_{op}} \quad \text{Ecuación 8.28}$$

Donde:

Q_{serp} : Potencia calorífica del serpentín. **Valor: 0,140 MW**

$E_{c,IC}$: Energía calorífica total necesaria de aportar en el equipo de IC por biodigestor. **Valor: 2,872 MWh/d**

t_{op} : Horas de operación del equipo IC. **Valor: 24 h/d**

f : Factor de seguridad. Valor: 1,2. Se corresponde con una corrección del 20%

Elección del tubo para el serpentín

El serpentín será fabricado en acero inoxidable. El diámetro estará determinado por el caudal y la velocidad del agua de servicio que atravesará el mismo, con el fin de calentar la mezcla de inóculo y sustrato. Mediante la ecuación 8.29, primero se calcula el caudal de agua de servicio o fluido caliente que entregará el calor necesario tal como se ha computado en el punto 8.6.3.

$$Q_{AguaServ} = \frac{Q_{serp} t_{op}}{Cp_{InócSust} (T_{c,e} - T_{c,s}) \rho_{InócSust}} \quad \text{Ecuación 8.29}$$

Donde:

$Q_{AguaServ}$: Caudal de agua de servicio (fluido caliente) a discurrir por el interior del tubo del serpentín.

Valor: 148,4 m³/d

Q_{serp} : Potencia calorífica del serpentín. **Valor: 0,140 MW**

t_{op} : Horas de operación del equipo IC. **Valor: 24 h/d**

$Cp_{SustCodg}$: Calor específico del sustrato de codigestion. **Valor: 1,16 10⁻³ MWh/t °C. Se adopta el**

Cp_{agua}

$T_{c,e}$: Temperatura del agua de servicio (fluido caliente) al ingresar serpentín. **Valor: 65,0 °C**

$T_{c,s}$: Temperatura del agua de servicio (fluido caliente) al salir del serpentín. **Valor: 45,0 °C**

A partir del caudal previamente calculado y definiendo una velocidad del fluido, se obtuvo el diámetro interno aproximado del tubo del serpentín. La ecuación 8.30 permite formalizar dicho cálculo.

$$D_{int, serp} = \sqrt{\frac{4 Q_{AguaServ}}{V_{AguaServ} \pi t_{op}}} \quad \text{Ecuación 8.30}$$

Donde:

$D_{int, serp}$: Diámetro interno del tubo del serpentín. **Valor: 0,0339 m**

$Q_{AguaServ}$: Caudal de agua de servicio (fluido caliente) a discurrir por el interior del tubo del serpentín.
Valor: 148,4 m³/d

$V_{AguaServ}$: Velocidad axial del agua de servicio o fluido caliente. Valor: 1,9 m/s. *Criterio: La velocidad del fluido debe estar en el rango entre 1,5 y 2,5 m/s*

t_{op} : Horas de operación del equipo IC. Valor: 24 h/d

A partir del catálogo de tubos de acero (ver anexo 8.5) se ha definido el diámetro del tubo a utilizar para la fabricación del serpentín helicoidal. Las características de dicho sistema y las verificaciones realizadas se resumen en la tabla 8.10.

Tabla 8.10. Resumen tubería a utilizar para fabricar el serpentín helicoidal del equipo de IC

Fluido	Unidad	Valor	Observaciones
Diámetro externo del tubo	m	0,0381	Tubo de 1" 1/2
Espesor del tubo	m	0,0013	-
Diámetro interno del tubo	m	0,0354	Diámetro del tubo requerido: 0,0339 m
Velocidad del agua de servicio (verificación)	m/s	1,74	Cumple con el criterio de velocidad del fluido entre 1,5 y 2,5 m/s

Cálculo de la diferencia de temperatura media logarítmica

Por el interior del serpentín va a discurrir el agua de servicio, la cual será previamente calentada durante su paso por el equipo de cogeneración. Dicho serpentín estará sumergido en el interior del biodigestor, de forma que estará en contacto con la mezcla de inóculo y sustrato. Este contacto permitirá el intercambio de calor.

Empleando las ecuaciones 8.31, 8.32 y 8.33, se ha calculado la diferencia de temperatura media logarítmica para el caso en análisis. La temperatura de la mezcla de inóculo-sustrato es 37°C, mientras que el agua de servicio ingresa a una temperatura mayor que con la que egresa del serpentín. La diferencia de temperaturas se ha definido con el fin de optimizar y el área de intercambio requerida.

$$\Delta T_{ml, SC-AS} = \frac{\Delta T_{IS-AS,1} - \Delta T_{IS-AS,2}}{\ln(\Delta T_{IS-AS,1} / \Delta T_{IS-AS,2})} \quad \text{Ecuación 8.31}$$

$$\Delta T_{IS-AS,1} = T_{c,e} - T_f \quad \text{Ecuación 8.32}$$

$$\Delta T_{IS-AS,2} = T_{c,s} - T_f \quad \text{Ecuación 8.33}$$

Donde:

$\Delta T_{ml, SC-AS}$: Diferencia de temperatura media logarítmica entre la mezcla de inóculo-sustrato (IS) y el agua de servicio (AS) en el punto de ingreso al intercambiador. **Valor: 16,0 °C**

$\Delta T_{IS-AS,1}$: Diferencia de temperatura entre la mezcla de inóculo-sustrato (IS) y el agua de servicio (AS) en el punto de ingreso al intercambiador. **Valor: 28,0 °C**

$\Delta T_{SC-AS,2}$: Diferencia de temperatura entre entre la mezcla de inóculo-sustrato (IS) y el agua de servicio (AS) en punto de salida del intercambiador. **Valor: 8 °C**

$T_{c,e}$: Temperatura del agua de servicio (fluido caliente) al ingresar serpentín. *Valor: 65,0 °C*

$T_{c,s}$: Temperatura del agua de servicio (fluido caliente) al salir del serpentín. *Valor: 45,0 °C*

T_f : Temperatura de la mezcla de inóculo-sustrato (fluido frío) dentro del biodigestor. *Valor: 37,0 °C*

Coefficiente de transferencia global

En un intercambiador de calor, dos fluidos discurren separados por una pared sólida. En el proceso de intercambio, el calor se transfiere primero desde el fluido caliente hacia la pared por convección, luego a través de la pared por conducción, y finalmente de la pared al fluido frío por convección. De esta manera, queda configurada una red de resistencias térmicas comprendida por dos resistencias por convección y una por conducción (ver figura 8.14). Adicionalmente, se debe incluir a las resistencias ocasionadas por la acumulación de depósitos en las superficies del intercambiador. La resistencia térmica total se expresa en la ecuación 8.34.

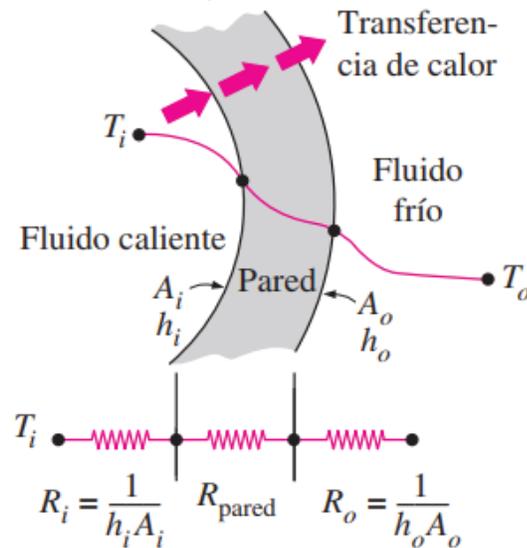


Figura 8.14. Esquema resistencias a través de las paredes del tubo del IC

$$R_{Total} = R_i + R_{pared} + R_e = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{f,i}}{A_i} + \frac{\ln(D_e/D_i)}{2\pi k L} + \frac{R_{f,e}}{A_e} + \frac{1}{h_e A_e} \quad \text{Ecuación 8.34}$$

Donde:

R_{Total} : Resistencia térmica total en el IC

R_i : Resistencia del lado interno

R_{pared} : Resistencia de la pared en el tubo del IC

R_e : Resistencia del lado externo

h : Coeficientes de transferencia de calor por convección interno (i) y externo (e)

A : Área de transferencia de calor en el IC

R_f : Resistencia por ensuciamiento interna (i) y externa (e)

D : Diámetro interno (i) y externo (e) del tubo del IC

k : Coeficiente de transferencia de calor en el tubo del IC

L : Largo del tubo del IC

A la hora de analizar el proceso de transferencia de calor en un equipo de IC, resulta conveniente combinar todas las resistencias térmicas que se encuentran en la trayectoria del flujo de calor como una única resistencia. A partir de esto, es posible reexpresar la tasa de transferencia de calor entre dos fluidos tal como se muestra en la ecuación 8.35.

$$Q_{IC} = \frac{\Delta T}{R_T} = U A \Delta T_m = U_i A_i \Delta T = U_e A_e \Delta T \quad \text{Ecuación 8.35}$$

Reordenando se obtiene

$$R_T = \frac{1}{U A} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_e A_e} \quad \text{Ecuación 8.36}$$

Donde:

Q_{IC} : Tasa de transferencia de calor (potencia calorífica) en el equipo de IC

ΔT : Diferencia de temperatura

R_{Total} : Resistencia térmica total en el IC

U : Coeficiente global de transferencia interno (i) y externo (e)

A : Área requerida para la transferencia de calor en el IC interna (i) y externa (e)

ΔT_m : Diferencia de temperatura media

Una vez obtenida la relación entre la resistencia al flujo de calor, el área de intercambio de calor y el coeficiente global de transferencia, fue posible derivar este último. En la ecuación 8.37 se formaliza el cálculo del coeficiente U . Cabe destacar que este coeficiente puede ser calculado ya sea desde el punto de vista del interior del tubo (U_i) o desde afuera (U_e), y que la relación $U_i = U_e$ únicamente es válida si $A_i = A_e$.

$$U = \frac{1}{R_T A} \quad \text{Ecuación 8.37}$$

Para el cálculo del coeficiente de transferencia global necesario para el dimensionamiento del equipo de IC, en este caso un serpentín helicoidal, se ha definido que el fluido caliente es agua de servicio, mientras que al fluido frío la mezcla de inóculo y sustrato en el interior de cada biodigestor. Si bien para el primero existe amplia bibliografía sobre sus propiedades fisicoquímicas, no ocurre lo mismo con el segundo. De esta manera, se han aproximado algunas de dichas propiedades adoptando supuestos. En la tabla 8.11, se resumen las propiedades de ambos fluidos.

Tabla 8.11. Resumen de las propiedades de los fluidos intervinientes en el equipo IC

Fluido	Unidad	Caliente (FC)	Frío (FF)	Observaciones
Denominación	-	Agua de servicio	Mezcla de inóculo y sustrato	-
T promedio en el IC	°C	55,0	37,0	-
Densidad (ρ)	kg/m ³	985,2	951,9	Para el FC se considera la ρ del agua a 40°C (ver anexo 8.6) Para el FF se toma la suma ponderada entre la ρ del agua y el nopal a T ambiente (ver tabla 5.5)
Conductividad térmica (k)	W/m °C	0,649	0,553	Para el FC se considera la k del agua a 40°C (ver anexo 8.6) Para el FF se toma la suma ponderada entre la k del agua a 25° y la k de la manzana por similitud en el % de humedad y su ρ (ver anexo 8.6)
Viscosidad dinámica (μ)	Pa s	5.04 10 ⁻⁴	6,53 10 ⁻⁴	-
Número de Prandtl (Pr)	-	3,25	4,32	Para el FC se considera el Pr del agua a 55 °C (ver anexo 8.6) Para el FF se considera el Pr del agua a 25 °C (ver anexo 8.6)
Factor de ensuciamiento (f_R)	m ² °C/W	0,00053	0,00018	Para el FC se considera el f_R definido para "River water-Normal" (Agua de río-Normal) (ver anexo 8.7) Para el FF se considera el f_R definido para "Líquidos orgánicos" (ver anexo 8.7)

Cálculo de los coeficientes de transferencia de calor por convección

El cálculo de la resistencia a la transferencia de calor por convección requiere previamente obtener los valores de los coeficientes de transferencia de calor por convección tanto interno como externo (ver ecuación 8.38). En las siguientes subsecciones se desarrolla el cálculo de cada uno de ellos.

$$h = \frac{k Nu}{D} \quad \text{Ecuación 8.38}$$

Donde:

h : Coeficiente de transferencia de calor por convección

k : Coeficiente de transferencia de calor

Nu : Número de Nusselt

D : Diámetro del tubo del intercambiador de calor

- Cálculo de los coeficientes de transferencia de calor por convección interno

Para el cálculo del coeficiente de transferencia por convección, lo primero que se computó fue el número de Reynolds del fluido, en este caso el agua de servicio que discurre a través del interior del serpentín. Esto se obtuvo a partir de la ecuación 8.39.

$$Re_{AguaServ} = \frac{V_{AguaServ} D_{int,serp}}{\nu_{AguaServ}} \quad \text{Ecuación 8.39}$$

Donde:

$Re_{AguaServ}$: Número de Reynolds del agua de servicio o fluido caliente. **Valor: 1,21 10⁵**

$V_{AguaServ}$: Velocidad axial del agua de servicio o fluido caliente. *Valor: 1,76 m/s*

$D_{int,serp}$: Diámetro interno del tubo del serpentín. *Valor: 0,0354 m*

$\nu_{AguaServ}$: Viscosidad dinámica del agua de servicio o fluido caliente. *Valor: 5,12 10⁻⁷ m²/s*

De acuerdo a lo calculado previamente, se puede deducir que el flujo del agua de servicio dentro del tubo externo es turbulento ($Re > 4000$). De esta manera, el siguiente parámetro adimensional necesario de computar es el número de Nusselt empleando la ecuación 8.40.

$$Nu_{AguaServ} = 0,023 (Re_{AguaServ})^{0,8} (Pr_{AguaServ})^{0,4} \quad \text{Ecuación 8.40}$$

Donde:

$Nu_{AguaServ}$: Número de Nusselt del agua de servicio o fluido caliente. **Valor: 461**

$Re_{AguaServ}$: Número de Reynolds del agua de servicio o fluido caliente. *Valor: 120.693*

$Pr_{AguaServ}$: Número de Prandtl del agua de servicio o fluido caliente. *Valor: 3,91*

Una vez calculado el número de Nusselt, fue posible cuantificar el coeficiente de transferencia por convección exterior. Adaptando la ecuación 8.38, anteriormente presentada, fue posible obtener dicho coeficiente a partir de la ecuación 8.41.

$$h_i = \frac{k_{\text{AguaServ}} Nu_{\text{AguaServ}}}{D_{\text{int, serp}}} \quad \text{Ecuación 8.41}$$

Donde:

h_i : Coeficiente de transferencia de calor por convección interno. **Valor: 8445 W/m² °C**

k_{AguaServ} : Coeficiente de transferencia de calor del agua de servicio o fluido caliente. *Valor: 0,649 W/m °C*

Nu_{AguaServ} : Número de Nusselt del agua de servicio o fluido caliente. *Valor: 370*

$D_{\text{int, serp}}$: Diámetro interno del tubo del serpentín. *Valor: 0,0354 m*

- Cálculo de los coeficientes de transferencia de calor por convección exterior

Al igual que para el coeficiente de transferencia por convección interior, lo primero que se computó fue el número de Reynolds del fluido, en este caso de la mezcla de inóculo-sustrato que se encuentra en contacto con el tubo del serpentín. Esto se obtuvo a partir de la ecuación 8.42 correspondiente a la expresión para el cálculo de este parámetro para tanques en agitación.

$$Re_{\text{InócSust}} = \frac{N_{\text{mezc}} D_{\text{int, serp}}^2}{\nu_{\text{InócSust}}} \quad \text{Ecuación 8.42}$$

Donde:

$Re_{\text{InócSust}}$: Número de Reynolds de la mezcla de inóculo-sustrato fluido frío. **Valor: 1,44 10⁶**

N_{mezc} : Velocidad del sistema de mezcla. *Valor: 100 rev/min (ver tabla 8.6)*

D_{mezc} : Diámetro de las paletas del sistema de mezcla. *Valor: 0,77 m (ver tabla 8.6)*

$\nu_{\text{InócSust}}$: Viscosidad dinámica de la mezcla de inóculo-sustrato fluido frío. *Valor: 6,86 10⁻⁷ m²/s*

De acuerdo a lo calculado previamente, se puede deducir que el flujo del agua de servicio dentro del tubo externo es turbulento ($Re > 4000$). De esta manera, el siguiente parámetro adimensional necesario de computar es el número de Nusselt empleando la ecuación 8.43.

$$Nu_{InócSust} = 0,87 (Re_{InócSust})^{0,62} (Pr_{InócSust})^{1/3} \left(\frac{\mu_{InócSust}}{\mu_{InócSust,W}}\right)^{0,14} \quad \text{Ecuación 8.43}$$

Donde:

$Nu_{InócSust}$: Número de Nusselt de la mezcla de inóculo-sustrato fluido frío. **Valor: 9324**

$Re_{InócSust}$: Número de Reynolds de la mezcla de inóculo-sustrato fluido frío. **Valor: 1,44 10⁶**

$Pr_{InócSust}$: Número de Prandtl de la mezcla de inóculo-sustrato fluido frío. **Valor: 4,32**

$\frac{\mu_{InócSust}}{\mu_{InócSust,W}}$: Cociente entre la viscosidad de la mezcla de inóculo-sustrato fluido frío en el interior del tanque y la pared del serpentín. **Valor: 1. Se desprecian los cambios de la viscosidad en la pared del serpentín**

Una vez calculado el número de Nusselt, fue posible cuantificar el coeficiente de transferencia por convección exterior. Adaptando la ecuación 8.38, anteriormente presentada, fue posible obtener dicho coeficiente a partir de la ecuación 8.44.

$$h_e = \frac{k_{InócSust} Nu_{InócSust}}{D_{biodg}} \quad \text{Ecuación 8.44}$$

Donde:

h_e : Coeficiente de transferencia de calor por convección exterior. **Valor: 285 W/m² °C**

$k_{InócSust}$: Coeficiente de transferencia de calor del agua de servicio o fluido caliente. **Valor: 0,553 W/m °C**

$Nu_{InócSust}$: Número de Nusselt de la mezcla de inóculo-sustrato fluido frío. **Valor: 9324**

D_{biodg} : Diámetro interno del biodigestor. **Valor: 18,1 m**

Cálculo del coeficiente global de transferencia global

Habiendo hallado los términos necesarios para el cálculo del coeficiente global de transferencia, se procedió a su cómputo definitivo. En este sentido, primero se obtuvo la resistencia térmica total mediante la ecuación 8.45. Para ello se emplearon los valores y resultados de las tablas 8.10 y 8.11, y de los coeficientes de transferencia de calor por convección calculados en la sección previa.

Cabe destacar que el cálculo de este ítem es un proceso iterativo. La resistencia total es función del área de intercambio de calor, mientras que a la vez es una incógnita a despejar. Como estrategia, se buscó que la resistencia total calculada a partir del área de intercambio definida (y por ende el largo del serpentín), satisficiera la equivalencia de la ecuación 8.46.

$$R_{T,serp} = \frac{1}{h_i A_{IC,i}} + \frac{R_{f,i}^{AguaServ}}{A_{i,serp}} + \frac{\ln(D_{e,serp}/D_{i,serp})}{2\pi k_{Acero} L_{IC}} + \frac{R_{f,e}^{InócSust}}{A_{e,serp}} + \frac{1}{h_e A_{IC,e}} \quad \text{Ecuación 8.45}$$

$$Q_{IC} = \frac{\Delta T_{ml,SC-AS}}{R_{T,IC}} \quad \text{Ecuación 8.46}$$

Donde:

$R_{T,serp}$: Resistencia térmica total del serpentín. **Valor: $1,23 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C/W}$**

h_i : Coeficiente de transferencia de calor por convección interno. *Valor: $9023 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$*

$A_{i,serp}$: Área de intercambio interior del tubo del serpentín. *Valor: $32,5 \text{ m}^2$*

$R_{f,i}^{AguaServ}$: Factor de ensuciamiento del agua de servicio. *Valor: $0,00035 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$*

$D_{e,serp}$: Diámetro exterior del tubo del serpentín. *Valor: $0,0381 \text{ m}$*

$D_{i,serp}$: Diámetro interior del tubo del serpentín. *Valor: $0,0354 \text{ m}$*

k_{Acero} : Coeficiente de conductividad térmica del acero. *Valor: $15,1 \text{ W/m } ^\circ\text{C}$ (ver tabla anexo 8.8)*

L_{IC} : Largo del tubo del intercambiador de calor requerido. *Valor: $388,2 \text{ m}$*

$R_{f,e}^{InócSust}$: Factor de ensuciamiento de la mezcla inóculo-sustrato. *Valor: $0,00018 \text{ m}^2 \text{ } ^\circ\text{C/W}$*

$A_{e,serp}$: Área de intercambio exterior del tubo del serpentín. *Valor: $40,7 \text{ m}^2$*

h_e : Coeficiente de transferencia de calor por convección exterior. *Valor: $285 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$*

Q_{IC} : Potencia calorífica del intercambiador. *Valor: $0,120 \text{ MW}$*

$\Delta T_{ml,SC-AS}$: Diferencia de temperatura media logarítmica entre el sustrato de codigestion (SC) y el agua de servicio (AS). *Valor: $16 \text{ } ^\circ\text{C}$*

Una vez calculada la resistencia total, se procedió al cálculo del coeficiente global de transferencia mediante la ecuación 8.47. El coeficiente U fue obtenido considerando la transferencia de calor visto desde el interior del tubo interno.

$$U_{serp,i} = \frac{1}{R_{T,serp} A_{i,serp}} \quad \text{Ecuación 8.47}$$

Donde:

$U_{IC,i}$: Coeficiente global de transferencia interno del IC. **Valor: $251,1 \text{ W/}^\circ\text{C m}^2$**

$A_{i,serp}$: Área de intercambio interior del tubo del serpentín. *Valor: $35,8 \text{ m}^2$*

$R_{T,serp}$: Resistencia térmica total del serpentín. *Valor: $1,23 \cdot 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C/W}$*

Cálculo del largo del tubo del serpentín

Una vez definida el área necesaria de intercambio de calor y definido el diámetro del tubo del serpentín, se ha podido cuantificar su longitud requerida. Dicho valor, se obtuvo mediante la ecuación 8.48.

$$L_{serp} = \frac{A_{i,serp}}{\pi D_{serp}} \quad \text{Ecuación 8.48}$$

Donde:

L_{serp} : Largo del tubo del serpentín a instalar en cada biodigestor. **Valor: 322 m**

$A_{i,serp}$: Área de intercambio interior del tubo del serpentín. **Valor: 35,8 m²**

D_{serp} : Diámetro interno del tubo del serpentín. **Valor: 0,0354 m**

Resumen del serpentín helicoidal a instalar

En la tabla 8.12 se resumen los parámetros principales del equipo de IC a instalar en la planta de biodigestión anaeróbica.

Tabla 8.12. Resumen parámetros del serpentín a instalar por cada biodigestor

Parámetro	Unidad	Valor
Tasa de transferencia de calor del serpentín (Q_{serp})	MW	0,140
Coefficiente global de transferencia interno del IC ($U_{serp,i}$)	W/°C m ²	251,1
Área requerida de intercambio interior tubo del serpentín ($A_{i,serp}$)	m ²	35,8
Largo del tubo del serpentín requerido (L_{IC})	m	322

8.7. Tratamiento y almacenamiento del biogás

El biogás generado durante la biodigestión anaeróbica no es completamente puro. Además de metano y dióxido de carbono, contiene vapor de agua, material particulado y gases traza. Dependiendo de su aplicación, es necesario que cumpla con ciertos requisitos de acondicionamiento antes de su uso.

El destino del biogás a producir en la planta será, como ya se ha discutido, su quema en un equipo de cogeneración de energía. Para tal uso, los compuestos principales a remover son el vapor de agua y el ácido sulfhídrico. En la tabla 8.13, se vuelcan los valores recomendados para el uso de motores cogeneradores según Deublein & Steinhauser (2011).

Tabla 8.13. Valores recomendados compuestos no deseados en el biogás según Deublein & Steinhauser (2011).

Parámetro	Unidad	Valor
Sulfuro de hidrógeno (H_2S)	ppmv	< 150
Vapor de agua (H_2O)	% HR	< 80

8.7.1. Desulfuración

El biogás generado contiene ácido sulfhídrico (H_2S) que debe ser removido para evitar el deterioro de los sistemas de conducción así como de los equipos electromecánicos. Este compuesto, además de ser corrosivo, puede ocasionar graves inconvenientes a la salud de las personas que puedan estar expuestas.

Debido a la necesidad de remover eficientemente el sulfhídrico contenido en el biogás, se instalarán dos sistemas para la remoción del mismo, uno principal y otro complementario. El sistema principal va a consistir en un tratamiento biológico dentro de cada biodigestor. El complementario, por otro lado, consistirá en un filtro de carbón activado (CA).

Desulfuración por tratamiento biológico

Para la remoción del ácido sulfhídrico contenido en el biogás, se instalará un sistema de tratamiento biológico interno compuesto por bandas plásticas en la parte superior del biodigestor. Dichas bandas servirán como lecho de soporte para el crecimiento de la biomasa. Con el fin de brindar las condiciones necesarias para el crecimiento y desarrollo de los microorganismos, se inyectará aire mediante microaireación.

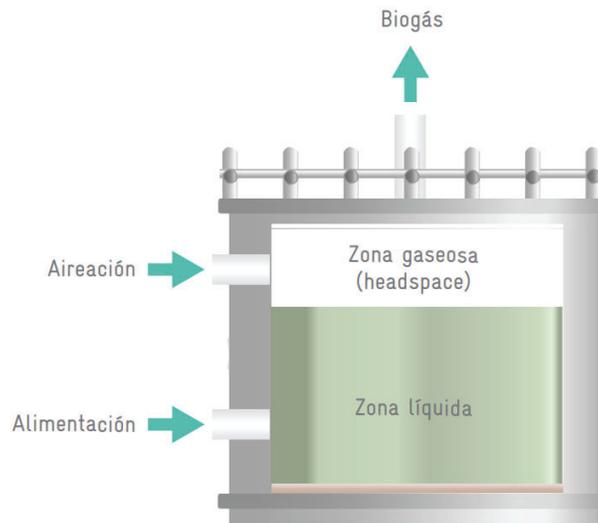
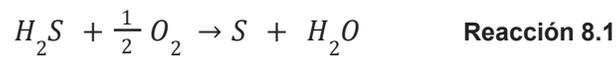


Figura 8.15. Esquema biodigestor con sistema de desulfuración por micro aireación. Elaborado a partir de Lopez Hernandez et al. (2019)

En presencia de aire u oxígeno y en ausencia de luz, el ácido sulfhídrico puede sufrir reacciones de oxidación catalizadas por organismos quiliotróficos obligatorios o facultativos (Lopez Hernandez et al., 2019). Son varias las reacciones posibles de ocurrir, aunque lo que se busca con este tratamiento es convertir dicho compuesto en azufre elemental (ver reacción 8.1).



Si se cumplen las condiciones de operación necesarias, la mayor parte del producto obtenido se expresa como azufre elemental. Este compuesto es deseado ya que se presenta en estado sólido y es insoluble en agua. De esta manera puede ser confinado y removido para su eventual aprovechamiento.



Figura 8.16. Soporte para el crecimiento de la biomasa del sistema de desulfuración. Obtenido de Beil et al. (2010)

El sistema de tratamiento biológico para la desulfuración del biogás se ubicará en la parte superior del biodigestor. Este va a estar compuesto por bandas plásticas que actuarán como lecho de soporte para el crecimiento de la biomasa. La cantidad de bandas a colocar serán calculadas en función de una relación de área específica sobre caudal de biogás generado. Con el objetivo de garantizar las condiciones necesarias para la correcta oxidación del H_2S , se inyectará aire por microaireación.

Considerando una concentración máxima de H_2S de 2000 ppm, según López Hernandez et al. (2019) el caudal de aire necesario se estima en 15 l/m^3 de biogás (ver figura 8.17). A partir de dichas asunciones, se calcula el caudal de aire necesario mediante la ecuación 8.49.

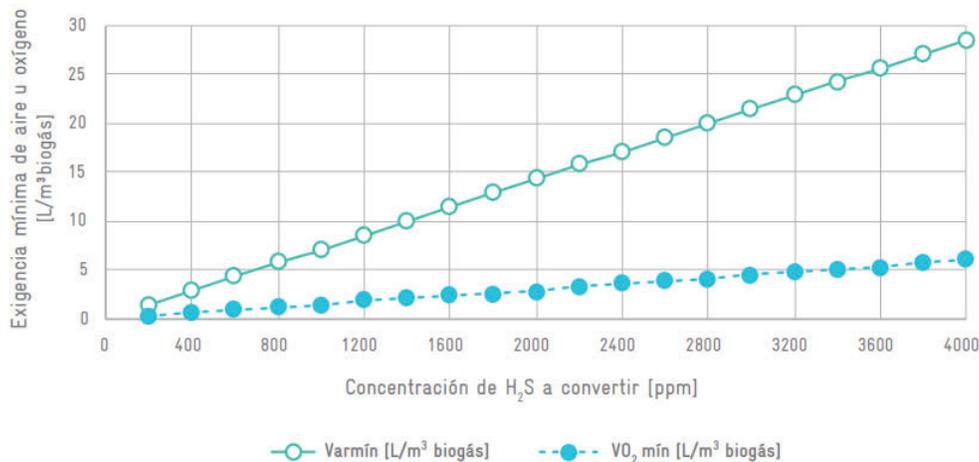


Figura 8.17. Flujo mínimo exigido de O_2 de acuerdo a la concentración de H_2S en el biogás. Obtenido a partir de Lopez Hernandez et al. (2019)

$$Q_{aire} = Gen_{biogás} Ex_{aire} f \quad \text{Ecuación 8.49}$$

Donde:

Q_{aire} : Caudal de aire necesario para microaireación. **Valor: $24,7 \text{ m}^3 \text{ aire/d}$**

$Gen_{biogás}$: Generación de biogás por biodigestor. *Valor: $1374 \text{ m}^3 \text{ biogás/d}$. Corregido a la temperatura de verano (ver tabla 6.3)*

Ex_{aire} : Exigencia mínima de aire. *Valor: $15 \text{ l aire/m}^3 \text{ biogás}$*

f : Factor de seguridad. *Valor: 1,2. Se corresponde con una corrección del 20%*

Con el fin de garantizar el caudal de aire mínimo requerido, de acuerdo al resultado de la ecuación 8.49, se van a instalar aireadores de bajo caudal. El modelo elegido es aireador de pecera Electrical Rs 17000 (ver figura 8.18). Las características técnicas principales se resumen en la tabla 8.14.



Figura 8.18. Aireador de pecera Electrical Rs 17000. Obtenido de www.acuariooasis.com.ar

Tabla 8.14. Características principales del aireador de pecera Electrical Rs 17000. Ver detalles en anexo 8.9

Parámetro	Unidad	Valor	Observaciones
Modelo	-	Electrical Rs 17000	-
Caudal	m ³ /min	0,11	Q_{aire} : 0,02 m ³ /min (por biodigestor)
Potencia	kW	0,06	-

El cálculo del área necesaria para la fijación de los microorganismos encargados de oxidar el ácido sulfhídrico contenido en el biogás, se realizó adoptando una relación de área requerida por caudal de biogás generado (ver ecuación 8.50). Conociendo este valor, fue posible definir cuántas cintas de ancho definido colocar según la ecuación 8.51.

$$A_{FijMicro} = Gen_{biogás} A_{ReqMicro} \quad \text{Ecuación 8.50}$$

$$n_{cintas} = \frac{A_{FijMicro}}{A_{cintas}} \quad \text{Ecuación 8.51}$$

Donde:

$A_{FijMicro}$: Área total requerida para la fijación de los microorganismos. **Valor: 68,7 m²**

n_{cintas} : Número de cintas de soporte para la fijación de los microorganismos por biodigestor. **Valor:**

127

$Gen_{biogás}$: Generación de biogás por biodigestor. **Valor: 1374 m³ Biogás/d. Corregido a la temperatura de verano (ver tabla 6.3)**

$A_{ReqMicro}$: Relación entre el área necesaria para la fijación de los microorganismos y el biogás generado. **Valor: 0,05 m²/m³ biogás d (Lopez Hernandez et al. (2019))**

A_{cintas} : Área de las cintas para fijación de los microorganismos. **Valor: 0,5 m². Dimensiones de las cintas: Largo: 9,05 m; Ancho: 0,06 m**

En la tabla 8.15 se resumen los parámetros más importantes del sistema de tratamiento biológico de desulfuración del biogás a implementar en cada biodigestor.

Tabla 8.15. Resumen del sistema de desulfuración por método biológico

Parámetro	Unidad	Valor	Observación
Caudal de aire	m ³ aire/d	1,32	-
Cantidad de cintas	–	127	Dimensiones de las cintas: Largo: 9,05 m; Ancho: 0,06 m

Sistema de desulfuración complementario

Debido a que el sistema biológico de desulfuración no garantiza un 100% de la remoción del sulfhídrico en el biogás, el tratamiento se complementará con un sistema de eliminación del ácido sulfhídrico mediante adsorción en carbón activado. El equipo adicional, tendrá como objetivo reducir la concentración de dicho compuesto a valores recomendados para su aprovechamiento (ver tabla 8.13). Adicionalmente, actuará como sistema *backup* ante situaciones y/o periodos en los cuales el tratamiento biológico no funcione correctamente.

El equipo a instalar es un filtro de carbón activado comercializado por la empresa Zorg Biogás (ver figura 8.19). El carbón se carga dentro de la unidad, de forma que el sulfuro de hidrógeno que asciende, se va absorbiendo. Las características técnicas más importantes del equipo se resumen en la tabla 8.16.



Figura 8.19. Imagen ilustrativa del filtro de carbón activado. Obtenido de www.zorg-biogas.com

Tabla 8.16. Características principales del filtro de carbón activado comercializado por Zorg Biogas.
Ver detalles en anexo 8.10

Parámetro	Unidad	Valor	Observaciones
Modelo	-	Filtro de carbón activado	-
Caudal máximo	Nm ³ /h	160	$Gen_{biogás} : 106,9 \text{ Nm}^3\text{CH}_4/d$
Volumen de CA	m ³	0,4	-

En este tipo de equipos, el consumo de carbón activado es uno de los parámetros críticos para su mantenimiento, tanto en lo funcional como en lo económico. De esta manera es preciso estimar correctamente el carbón requerido y la frecuencia de recambio del mismo. Asumiendo un porcentaje de remoción del sulfuro de hidrógeno en el tratamiento biológico, mediante la ecuación 8.52, se ha estimado la concentración de ingreso de dicho compuesto a este sistema.

$$C_{H_2S, filtro} = C_{H_2S, sal. TB} \left(1 - \frac{ef_{TB}}{100\%}\right) \quad \text{Ecuación 8.52}$$

Donde:

$C_{H_2S, filtro}$: Concentración del ácido sulfúrico al ingreso del filtro de carbón activado. **Valor: 400 ppm**

$C_{H_2S, sal. TB}$: Concentración del ácido sulfhídrico al ingreso del tratamiento biológico. *Valor: 2000 ppm*

ef_{TB} : Eficiencia de remoción del ácido sulfhídrico mediante tratamiento biológico. *Valor: 80 %*

Una vez estimada la concentración de sulfuro de hidrógeno del biogás a la salida del tratamiento biológico, se ha calculado el consumo de carbón activado mediante la ecuación 8.53. Para ello se asumió una relación de adsorción del dicho compuesto en el carbón y que es removido en su totalidad. Por otro lado, empleando la ecuación 8.54, se ha computado la tasa mínima de recambio. Dicha tasa, puede variar según la concentración de sulfuro de hidrógeno en el biogás, llegando incluso a extenderse aumentando el tiempo de uso del carbón activado.

$$Cons_{CA} = \frac{Gen_{biogás} C_{H_2S, filtro}}{CA_{CA}} \quad \text{Ecuación 8.53}$$

$$T_{CA, filtro} = \frac{Capac_{CA, filtro} \rho_{CA}}{Cons_{CA}} \quad \text{Ecuación 8.54}$$

Donde:

$Cons_{CA}$: Consumo de carbón activado. **Valor: 21,3 kgCA/d**

$T_{CA, filtro}$: Tasa de recambio del carbón activado dentro del filtro. **Valor: 9 d**

$Gen_{biogás}$: Generación de biogás total. *Valor: 2565,4 Nm³ Biogás/d.*

$C_{H_2S, filtro}$: Concentración del ácido sulfúrico al ingreso del filtro de carbón activado. *Valor: 400 ppm.*

Equivalente a 607 mg/Nm³ (bajo condiciones normales de presión y temperatura)

CA_{CA} : Capacidad de adsorción de H₂S del carbón activado. *Valor: 0,073 kgH₂S/kgCA (Bonatto et al., 2024)*

$Capac_{CA, filtro}$: Capacidad de almacenamiento de carbón activado del filtro. *Valor: 0,4 m³*

ρ_{CA} : Densidad del carbón activado. *Valor: 0,5 t/m³*

8.7.2. Deshumidificador

El vapor de agua contenido en el biogás disminuye su PCI. De acuerdo a Deublein & Steinhäuser (2011) el porcentaje de humedad relativa que debe poseer el gas para su ingreso a un equipo de cogeneración debe ser menor al 80 %. A partir de esto es que se concluye la importancia sobre su secado/deshumidificación previo a la combustión. Existen diferentes técnicas fisicoquímicas para lograr esto, entre las que se encuentran la adsorción, la absorción o la condensación del agua en estado de vapor.

Para el corriente proyecto se ha seleccionado un equipo de condensación. El modelo elegido es el deshumidificador de biogás MDU 150 fabricado por la empresa Vosmik Engineering (ver figura 8.20). Las especificaciones técnicas se resumen en la tabla 8.17.

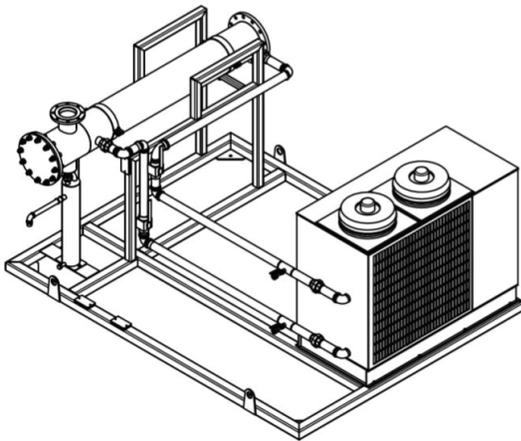


Figura 8.20. Imagen esquemática del equipo deshumidificador de biogás MDU 150. Obtenido de www.vosmik-engineering.com

Tabla 8.17. Características principales del equipo deshumidificador de biogás MDU 150. Ver detalles en el anexo 8.11

Parámetro	Unidad	Valor	Observación
Modelo-Marca	-	MDU 150-Vosmik Engineering	-
Tecnología	-	Condensación	-
Flujo de biogás máximo	Nm ³ /h	150	$Gen_{biogás} : 106,9$ Nm ³ /h
Máxima potencia de consumo	kW	9,6	

Conociendo el caudal de biogás estimado a producir, se ha definido la instalación de un único equipo, que será suficiente para tratar el total del biogás generado. Por otro lado, cabe destacar que el equipo funcionará durante las horas operativas del cogenerador.

8.7.3. Antorcha de biogás

La operación segura de la planta de biogás requiere de la combustión del exceso de biogás durante los picos de producción, paradas por reparación de equipos u otro motivo que así lo amerite. Para garantizar esto, la medida empleada en este tipo de plantas es la instalación de una antorcha para la quema del biogás. El funcionamiento de la antorcha se encuentra completamente automatizado. Al detectar un aumento de la presión, la antorcha se enciende y el biogás en exceso comienza a quemarse.

El parámetro necesario para la selección de la antorcha es el caudal de biogás. Esto se debe a que, durante la puesta en marcha o una situación de emergencia, se deberá quemar todo lo que se genere a producir. Conociendo este valor, se ha elegido el modelo de antorcha quemadora de gas abierta modelo FAI 65-450 comercializado por la empresa ZORG biogás (ver figura 8.21). En la tabla 8.18 se resumen las características del equipo.



Figura 8.21. Imágen ilustrativa de la antorcha quemadora de biogás modelo FAI 65-450. Obtenido de www.zorg-biogas.com

Tabla 8.18. Características técnicas principales de la antorcha modelo FAI 65-450. Ver detalles en el anexo 8.12

Parámetro	Unidad	Valor	Observación
Modelo	-	Antorcha quemadora de gas abierta FAI 65-450	-
Flujo máximo	m ³ /h	254	$Gen_{biogás}$: 114.5 m ³ /h (Corregido a la temperatura de verano. Ver tabla 6.3)

8.8. Tratamiento y almacenamiento del digerido

Además del biogás, la digestión anaeróbica de un sustrato orgánico genera un segundo subproducto, el digerido. A grandes rasgos, este se encuentra formado por una fracción mayoritaria líquida y una fracción sólida. En el presente proyecto, una vez que el digerido abandone los reactores anaeróbicos, pasará por un sistema de tratamiento físico para la separación de las fracciones mencionadas.

Cabe mencionar que la provincia de La Rioja en los últimos años ha estado bajo emergencia hídrica como consecuencia de la acentuación de los efectos del cambio climático, así como por la falta de planificación e inversión en obras públicas¹⁰. En este contexto, la fracción líquida será destinada para proveer de nutrientes y riego el cultivo de nopal en el predio, así como su comercialización para su uso en cultivos en el departamento y la provincia. Por otro lado, la fracción sólida también será aprovechada para los mismos fines. La comercialización del digerido constituirá un ingreso económico adicional del proyecto, y se halla regulada a través de la resolución del SENASA 1004/23 que aprueba el registro y venta de bioinsumos.

8.8.1. Producción y caracterización del digerido

Para el cálculo de la producción del digerido, se asume que el caudal a generarse en cada una de las unidades será equivalente al que ingrese de sustrato. Esto se sustenta, por un lado, en el hecho de que los biodigestores van a operar en forma continua. Por otro lado, en que se asume que la remoción de sólidos representa una pequeña fracción de la masa total de la mezcla inóculo-sustrato.

Si bien durante el proceso de biodigestión anaeróbica ocurre la conversión de la materia orgánica por volatilización y la evaporación de agua, la masa total que se transforma y/o remueve representa una fracción pequeña del total. Experimentalmente, se han cuantificado porcentajes de remoción entre 20 y el 30% sobre los sólidos totales y los volátiles, respectivamente (ver sección 5.3.2). En la tabla 8.19, se resumen las características principales del digerido, definidas según los datos obtenidos de forma experimental.

Tabla 8.19. Resumen de la caracterización del digerido de acuerdo a datos experimentales

Parámetro	Unidad	Valor	Observación
Caudal	m ³ /d	149,8	-
pH	-	~ 7,7	Se consideran los resultados de la caracterización del digerido denominado Purín + Cactus 50:50 (Ver sección 5.3)
ST	gST/gDig	0,030	
SV	gSV/gDig	0,017	
Remoción ST¹¹	%	~ 22	
Remoción SV	%	~ 32	

¹⁰ <https://diocesislarioja.com.ar/dia-del-agua-emergencia-hidrica-en-los-llanos-riojanos/>

¹¹ Los ST y SV han sido calculados sobre los sólidos de la mezcla inicial de inóculo-sustrato (ver anexo 5.1)

8.8.2. Pozo de bombeo

El digerido al salir del biodigestor será almacenado temporalmente en un pozo de bombeo. Este pozo tendrá como objetivo, por un lado, poder extraer el digerido sin tratamiento físico en caso de que así sea requerido. Por otro lado, permitirá acumular el digerido para la posterior separación de las fracciones líquida y sólida en el paso siguiente.

Para calcular el volumen útil de la unidad se empleó la ecuación 8.55. Por su parte, el diámetro del pozo se obtuvo a partir de la ecuación 8.56, habiendo definido una geometría cilíndrica y una profundidad en 3 m. Vale resaltar que toda la unidad va a estar construida en hormigón armado. En la tabla 8.20, se resumen los parámetros de diseño más importantes del tanque de mezcla.

$$V_{\text{útil, PozBom}} = Q_{\text{dig}} \theta \quad \text{Ecuación 8.55}$$

Donde:

$V_{\text{útil, PozBom}}$: Volumen del tanque de mezcla. **Valor: 149,8 m³**

Q_{dig} : Caudal volumétrico de sustrato del digerido. *Valor: 149,8 m³/d*

θ : Tiempo de permanencia del digerido en el pozo de bombeo. *Valor: 1 d*

$$D_{\text{PozBom}} = 2 \sqrt{\frac{V_{\text{útil, PozBom}}}{\pi h_{\text{útil, PozBom}}}} \quad \text{Ecuación 8.56}$$

Donde:

D_{PozBom} : Diámetro del tanque de mezcla. **Valor: 8 m**

$V_{\text{útil, PozBom}}$: Volumen útil del tanque de mezcla. *Valor: 149,8 m³*

$h_{\text{útil, PozBom}}$: Altura del útil del tanque de mezcla. *Valor: 3 m*

Tabla 8.20. Resumen de los parámetros de dimensionamiento más importantes del pozo de bombeo del digerido

Parámetro de diseño	Unidad	Valor	Observación
Geometría	-	Cilíndrica	-
Cantidad de unidades	-	1	-
Volumen útil	m ³	149,8	Valor redondeado
Altura útil	m	3	-
Altura de diseño		3,2	Se corrige la altura útil por un factor de seguridad de 0,2 m
Diámetro de diseño	m	8	-
Volumen de diseño	m ³	159,8	-
Material construcción	-	Hormigón armado	No se agrega material aislante en las paredes
Espesor paredes	m	0,1	-

Para garantizar la mezcla y la homogeneidad del digerido para su posterior aplicación, el mismo se mantendrá en agitación continua. Al igual que en las secciones 8.3.2 y 8.4.2, correspondientes al tanque de mezcla y a los biodigestores se ha empleado, como criterio de cálculo de potencia de mezcla requerida, el parámetro de la potencia volumétrica según Grady et al. (2011). Con el fin de minimizar el gasto energético, ya que el digerido tendrá un corto tiempo de permanencia, se tomará el valor más bajo del rango sugerido por la bibliografía consultada.

La potencia necesaria a entregar por los agitadores dentro del pozo de bombeo, se computó empleando la ecuación 8.57. Para ello se asumió una eficiencia de potencia entregada, y se consideró el valor inferior del rango de potencia volumétrica propuesto por Grady et al. (2011).

$$P_{PozBom} = V_{\text{útil, PozBom}} P_{vol} \frac{1}{\frac{\eta_{eje}}{100\%} \frac{\eta_{mec}}{100\%}} \quad \text{Ecuación 8.57}$$

Donde:

P_{PozBom} : Potencia a entregar necesaria para la mezcla en el pozo de bombeo. **Valor: 0,99 kW**

$V_{\text{útil, PozBom}}$: Volumen útil del pozo de bombeo. *Valor: 149,8 m³*

P_{vol} : Potencia volumétrica adoptada para garantizar la mezcla dentro del pozo de bombeo. *Valor: 0,005 kW/m³*

η_{eje} : Eficiencia mecánica del eje del agitador. *Valor: 95 %*

η_{mec} : Eficiencia mecánica del agitador. *Valor: 80 %*

Una vez calculada la potencia necesaria a entregar, se seleccionó el equipo agitador a instalar. Para este propósito se eligió el agitador adaptativo compacto Flygt 4220 de la empresa Xylem (ver figura 8.22). Las características principales de este equipo se vuelcan en la tabla 8.21.



Figura 8.22. Imagen ilustrativa del mezclador sumergible Flygt 4220 de la empresa Xylem

Tabla 8.21. Resumen características del mezclador sumergible Flygt 4220. Ver detalles en anexo 8.2

Parámetro	Unidad	Valor
Modelo	-	Agitador adaptativo compacto Flygt 4220
Potencia nominal	kW	1,1
RPM	rev/min	Regulable. Máxima: 800
Diámetro hélices	m	0,37

Conociendo la potencia necesaria a entregar y la del mezclador, se pudo calcular la cantidad de unidades del equipo mediante la ecuación 8.58.

$$n_{PozBom} = \frac{P_{PozBom}}{P_{eq. mezcla}} \quad \text{Ecuación 8.58}$$

Donde:

n_{PozBom} : Unidades del equipo mezclador a instalar en el tanque de mezcla. **Valor: 1**

P_{PozBom} : Potencia a entregar necesaria para la mezcla. *Valor: 0,99 kW*

$P_{eq. mezcla}$: Potencia que entrega el equipo mezclador. *Valor: 1,1 kW*

8.8.3. Separación de fracciones del digerido

La separación de las fracciones líquida y sólida del digerido se hará mediante un separador de tornillo. De acuerdo con los caudales máximos a tratar y la concentración de sólidos, se eligió el modelo SEPCOM Horizontal H1-150-2 de la marca Saveco (ver figura 8.23). Las características técnicas del equipo se resumen en la tabla 8.22.



Figura 8.23. Imagen ilustrativa del separador de tornillo modelo SEPCOM Horizontal H1-150-2. Obtenido de www.wamgroup.com.ar

Tabla 8.22. Resumen características técnicas del separador de tornillo modelo SEPCOM Horizontal H1-150-2. Ver detalles en anexo 8.13

Parámetro	Unidad	Valor	Observaciones
Modelo	-	Separador de tornillo SEPCOM Horizontal H1-150-2	-
Potencia	kW	2,2	-
Caudal máximo de entrada	m ³ /h	9,15	Q_{dig} : 12,5 m ³ /h Operación: 12 h/d
Cont. sól. tolerado	%	1-3	ST_{dig} : 3 %
Abertura de malla	mm	0,90	-

El total de barros generados, correspondientes a la fracción sólida del digerido, se ha calculado mediante la ecuación 8.59. Para ello se han considerado los valores experimentales de la caracterización del digerido, así como las especificaciones técnicas del equipo a instalar.

$$P_{FS, dig} = \frac{Q_{m, dig} ST_{dig}}{\frac{\% ST_{FS, dig}}{100\%}} \quad \text{Ecuación 8.59}$$

Donde:

$P_{FS, dig}$: Producción de barro correspondiente a la fracción sólida del digerido. **Valor: 18 t/d**

$Q_{m, dig}$: Caudal másico o del digerido. Valor: 149,8 t/d. *Se asume densidad igual a 1 g/g*

ST_{dig} : Concentración de sólidos totales en el digerido. *Valor: 0,03 gST/gDig*

$\% ST_{FS, dig}$: Porcentaje de sólidos totales (o materia seca) en la fracción sólida del digerido. *Valor: 25 % gST/gFSdig. Se adopta un valor conservador de concentración de los sólidos totales (o materia seca)*

Finalmente, conociendo la producción en términos de caudal del digerido y la proporción de humedad que queda retenida en la fracción sólida una vez que atraviesa el separador de tornillo, se ha estimado la generación de la fracción líquida. Esta se ha computado mediante la ecuación 8.60.

$$P_{FL, dig} = Q_{m, dig} - P_{FS, dig} \left(1 - \frac{\% ST_{FS, dig}}{100}\right) \quad \text{Ecuación 8.60}$$

Donde:

$P_{FL, dig}$: Producción de la fracción líquida obtenida del digerido. **Valor: 136,4 m³/d.** *Se asume densidad igual a 1 t/m³.*

$Q_{m, dig}$: Caudal másico o del digerido. *Valor: 149,8 t/d. Se asume densidad igual a 1 t/m³*

$P_{FS, dig}$: Producción de barro correspondiente a la fracción sólida del digerido. *Valor: 18 t/d*

$\% ST_{FS, dig}$: Porcentaje de sólidos totales (o materia seca) en la fracción sólida del digerido. *Valor: 25 % gST/gFSdig. Se adopta un valor conservador de concentración de los sólidos totales (o materia seca)*

En la tabla 8.23, se resumen los parámetros más importantes correspondientes al equipo a instalar para la separación de las fracciones sólida y líquida del digerido. Adicionalmente, se vuelcan los valores correspondientes a los caudales, los cuales son necesarios para los espacios y unidades para el almacenamiento de ambas fracciones para su destino final.

Tabla 8.23. Resumen separación y producción de fracciones del digerido

Parámetro	Unidad	Valor
<i>Cantidad de equipos</i>	-	1
<i>Horas operativas</i>	h	12
<i>Producción de barros (fracción sólida)</i>	t/d	18
<i>Producción de fracción líquida</i>	m ³ /d	136,4

8.8.4. Almacenamiento y destino de la fracción líquida

Debido a que la operación en la planta ocurrirá de manera continua con la consecuente generación de biogás, también habrá una producción constante del digerido. De forma contraria, su retiro y utilización será de manera discontinua, con frecuencias variando según la estación. Ante esta situación, y particularmente para la fracción líquida que representa la mayor parte, se deberá proporcionar almacenamiento temporal y posterior tratamiento de los excedentes.

Una vez ocurrida la separación de las fracciones del digerido, la fase líquida va a ser conducida a lagunas de almacenamiento. Si esta fase del digerido cumple con los parámetros de calidad para su uso con fines agrícolas, definidos en la resolución 19/19 (ver sección 3.1), se podrá emplear para su aplicación en el cultivo de nopal, así como para su comercialización. En los casos que no cumpla con los valores límites, será conducido junto a los excedentes a un sistema de tratamiento biológico formado por lagunas aerobias.

Dentro del sistema de lagunas aeróbicas, se terminará de degradar la materia orgánica y se depurarán los nutrientes remanentes, de manera que el efluente final cumpla con los parámetros de vuelco a terreno absorbente según lo que indica la ley provincial 4.741 (modificada por la 6.460). El diseño del tratamiento biológico posterior a las lagunas de almacenamiento, queda por fuera de los alcances de este proyecto.

En cuanto a su diseño, las lagunas son estructuras construidas en profundidad sobre el terreno y suelen tener paredes inclinadas en un ángulo de 45°. En los casos en los cuales no existe una impermeabilización natural del suelo por su composición, esto se logra mediante el recubrimiento con arcillas o rocas de diferente granulometría, concreto o membrana geotextil. Para evitar cortocircuitos, la entrada y salida de los influentes y efluentes, respectivamente, se realiza en los extremos opuestos de la laguna.



Figura 8.24. Laguna impermeabilizada instalada en una zona semiárida. Obtenido de www.sswm.info

Para el cálculo del volumen requerido para la laguna de almacenamiento, únicamente se considerará el tiempo de permanencia y la profundidad. El tiempo de permanencia elegido se corresponde con el máximo tiempo que se preservará mientras es retirado para su uso en las plantaciones de nopal así como para su uso en cultivos externos. Por otro lado, la profundidad adoptada, permitirá la formación de una capa aeróbica en la cual ocurrirá la oxidación de los compuestos orgánicos, disminuyendo la emisión de olores desagradables. Adicionalmente, una fracción se perderá por evaporación. Mediante la ecuación 8.61, se calculó el volumen mínimo requerido de la laguna.

$$V_{lag,FL} = P_{FL,dig} \theta f \quad \text{Ecuación 8.61}$$

Donde:

$V_{lag,FL}$: Volumen total requerido laguna almacenamiento fracción líquida del digerido. **Valor: 4910 m³**

$P_{FL,dig}$: Producción de la fracción líquida obtenida del digerido. *Valor: 136,4 m³/d*

θ : Tiempo de permanencia de la FL en la laguna. *Valor: 30 d*

f : Factor de seguridad. *Valor: 1,2. Se corresponde con una corrección del 20%*

De acuerdo al volumen requerido para el dimensionamiento de las lagunas de reservorio de la fracción líquida del digerido, se ha optado por la construcción de dos lagunas de igual capacidad. Mediante las ecuaciones 8.62, 8.63 y 8.64, se calculó el área y los lados que ocupará cada laguna considerando una geometría rectangular. Se adoptó una profundidad suficiente que permita la formación de los dos estratos característicos de las lagunas facultativas.

$$A_{lag, FL} = \frac{V_{lag, FL}}{2 h_{lag}} \quad \text{Ecuación 8.62}$$

$$L_{lag, FL} = 2 W_{lag, FL} \quad \text{Ecuación 8.63}$$

$$W_{lag, FL} = \sqrt{\frac{A_{lag, FL}}{2}} \quad \text{Ecuación 8.64}$$

Donde:

$A_{lag, FL}$: Área requerida a ocupar por cada laguna. **Valor: 2050 m²**

$L_{lag, FL}$: Largo de cada laguna. **Valor: 66 m**

$W_{lag, FL}$: Ancho de cada laguna. **Valor: 33 m**

$V_{lag, FL}$: Volumen requerido por cada laguna de almacenamiento fracción líquida del digerido. *Valor: 2455 m³*

h_{lag} : Altura o profundidad de cada una de las lagunas. *Valor: 1,2 m*

La geometría definida finalmente para la construcción de las lagunas fue la troncopiramidal. En este sentido, fueron recalculadas las dimensiones correspondientes considerando un talud con una inclinación entre 40 y 45°. Las ecuaciones 8.65 y 8.66, 8.67 y 8.68, permitieron obtener los lados de la base y la superficie de cada laguna de acuerdo al esquema de la figura 8.25. Por otro lado, las ecuaciones 8.69 y 8.70, posibilitaron verificar que se cumpla el ángulo de talud requerido.

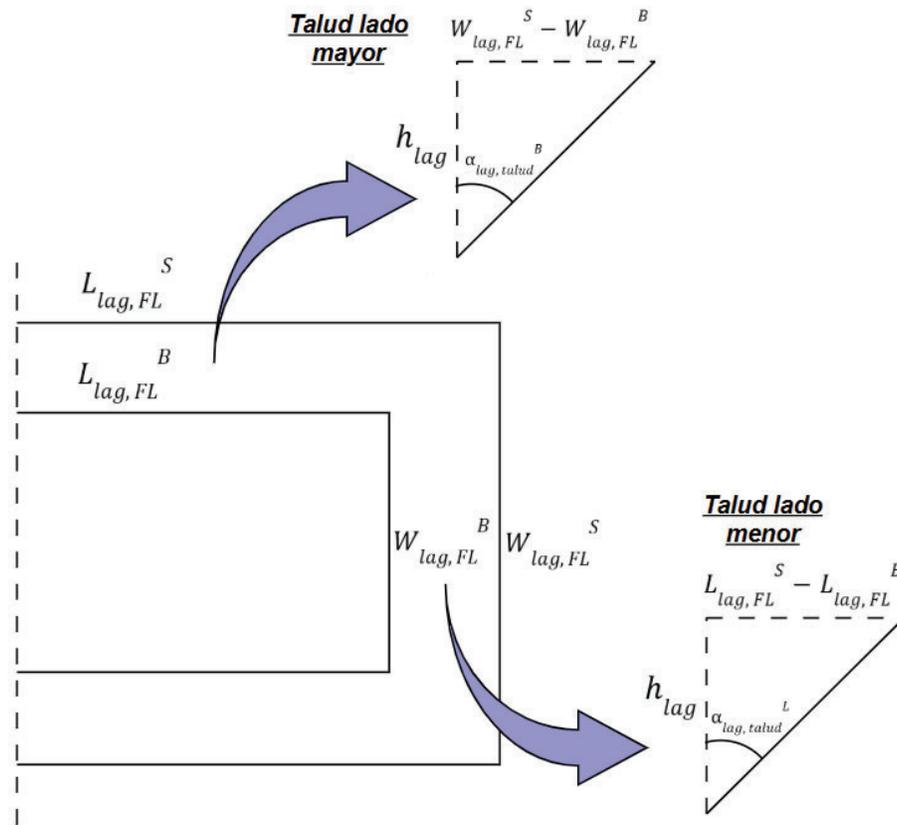


Figura 8.25. Esquema dimensionamiento de lados y taludes de las lagunas

$$L_{lag,FL}^S = L_{lag,FL} + h_{lag} \quad \text{Ecuación 8.65}$$

$$W_{lag,FL}^S = W_{lag,FL} + h_{lag} \quad \text{Ecuación 8.66}$$

$$L_{lag,FL}^B = L_{lag,FL} - h_{lag} \quad \text{Ecuación 8.67}$$

$$W_{lag,FL}^B = W_{lag,FL} - h_{lag} \quad \text{Ecuación 8.68}$$

$$\alpha_{lag,talud}^L = \arctg\left(\frac{\frac{L_{lag,FL}^S - L_{lag,FL}^B}{2}}{h_{lag}}\right) \quad \text{Ecuación 8.69}$$

$$\alpha_{lag,talud}^B = \arctg\left(\frac{\frac{W_{lag,FL}^S - W_{lag,FL}^B}{2}}{h_{lag}}\right) \quad \text{Ecuación 8.70}$$

Donde:

$L_{lag,FL}^S$: Largo del área superficial de cada laguna troncopiramidal. **Valor: 67 m**

$W_{lag,FL}^S$: Ancho del área superficial de cada laguna troncopiramidal. **Valor: 34 m**

$L_{lag,FL}^B$: Largo de la base de cada laguna troncopiramidal. **Valor: 65 m**

$W_{lag,FL}^B$: Ancho de la base de cada laguna troncopiramidal. **Valor: 32 m**

$\alpha_{lag,talud}^L$: Ángulo del talud lado mayor de la laguna. **Valor: 45°**

$\alpha_{lag,talud}^W$: Ángulo del talud lado menor de la laguna. **Valor: 45°**

$L_{lag,FL}$: Largo de cada laguna. *Valor: 66 m*

$W_{lag,FL}$: Ancho de cada laguna. *Valor: 33 m*

h_{lag} : Altura o profundidad de cada una de las lagunas. *Valor: 1,2 m*

Una vez calculados los lados de las lagunas con la geometría definida, se vuelven a computar las áreas superficial y de la base de las lagunas mediante las ecuaciones 8.71 y 8.72, respectivamente. Finalmente, se verifica que el volumen de cada laguna cumpla con el mínimo requerido de volumen a través de la ecuación 8.73.

$$A_{lag,FL}^S = L_{lag,FL}^S W_{lag,FL}^S \quad \text{Ecuación 8.71}$$

$$A_{lag,FL}^B = L_{lag,FL}^B W_{lag,FL}^B \quad \text{Ecuación 8.72}$$

$$V_{lag,FL}^{TP} = \frac{h_{lag}}{3} (A_{lag,FL}^S + A_{lag,FL}^B + \sqrt{A_{lag,FL}^S A_{lag,FL}^B}) \quad \text{Ecuación 8.73}$$

Donde:

$A_{lag,FL}^S$: Área superficial de cada laguna troncopiramidal. **Valor: 2298 m²**

$A_{lag,FL}^B$: Área de la base de cada laguna troncopiramidal. **Valor: 2061 m²**

$V_{lag,FL}^{TP}$: Volumen de cada laguna troncopiramidal. **Valor: 2614 m³**

$L_{lag,FL}^S$: Largo del área superficial de cada laguna troncopiramidal. *Valor: 67 m*

$W_{lag,FL}^S$: Ancho del área superficial de cada laguna troncopiramidal. *Valor: 34 m*

$L_{lag,FL}^B$: Largo de la base de cada laguna troncopiramidal. *Valor: 65 m*

$W_{lag,FL}^B$: Ancho de la base de cada laguna troncopiramidal. *Valor: 32 m*

h_{lag} : Altura o profundidad de cada una de las lagunas. *Valor: 1,2 m*

En la tabla 8.24 se resumen las dimensiones de las lagunas de almacenamiento de la fracción líquida del digerido.

Tabla 8.24. Resumen dimensiones de las lagunas de almacenamiento del digerido

Parámetro	Unidad	Valor	Observaciones
Geometría lagunas	-	Troncopiramidal	-
Cantidad de lagunas	-	2	-
Impermeabilización base		Membrana geotextil	-
Largo superficie	m	67	-
Ancho superficie	m	34	-
Largo base	m	65	-
Ancho base	m	32	-
Ángulo talud lado mayor	°	45	-
Ángulo talud lado menor	°	45	-
Volumen laguna	m ³	2614	$V_{lag, FL}$: 2455 m ³ por laguna

8.8.5. Almacenamiento de la fracción sólida

La fracción sólida del digerido, al igual que la líquida, tendrá como destino su uso agrícola en los cultivos de nopal del proyecto, así como mediante su comercialización a cultivos externos dentro y fuera de la provincia. Una vez separado, empleando el equipo para tal fin, será temporalmente almacenado. De acuerdo a las recomendaciones de FAO (2019), la estructura de almacenamiento tendrá una capacidad mínima de 30 días, y contará con una platea impermeabilizada, con cierto grado de pendiente para la recolección de los lixiviados (ver figura 8.26).

Para poder utilizar esta fracción con fines de uso agrícola, deberá cumplir con los valores límites para los parámetros definidos en la resolución 19/19. En caso contrario, será enviado a un tratamiento por compostaje para su estabilización, hasta lograr que cumpla con dichos valores.



Figura 8.26. Almacenamiento de la fracción sólida del digerido. Obtenido de FAO (2019)

8.9. Líneas de conducción

La planta contará con un total de cuatro líneas de conducción para el transporte de los fluidos entre las diferentes unidades. Los fluidos a transportar son de naturaleza líquida, semisólida y gaseosa. En la tabla 8.25 se resumen las características principales de cada línea de conducción.

Tabla 8.25. Resumen de las líneas de conducción de la planta

Línea	Fluido	Descripción
Línea 1: Alimentación del biodigestor	Sustrato de alimentación	Transporta la mezcla del sustrato de codigestión desde el pozo de bombeo de purín hasta cada uno de los biodigestores
Línea 2: Descarga del digerido	Digerido	Transporta el digerido desde la salida de cada biodigestor al equipo de separación de las fracciones y luego a las lagunas de almacenamiento
Línea 3: Agua de servicio IC	Agua	Transporta el agua de servicio caliente desde el cogenerador hacia los serpentines de cada biodigestor y viceversa
Línea 4: Biogás	Biogás	Transporta el biogás producido en el tanque de mezcla y cada biodigestor hacia el gasómetro y de allí al cogenerador, previo a su paso por el tren de tratamiento. En caso de ser necesario, permite el desvío del gas a la antorcha de seguridad

En las figuras 8.27, 8.28, 8.29, se pueden observar los esquemas correspondientes a las diferentes líneas de conducción de la planta, a excepción de la línea 4. Para mayor detalle ver los planos correspondientes al perfil hidráulico y vista en planta (ver sección planos en anexo 10).

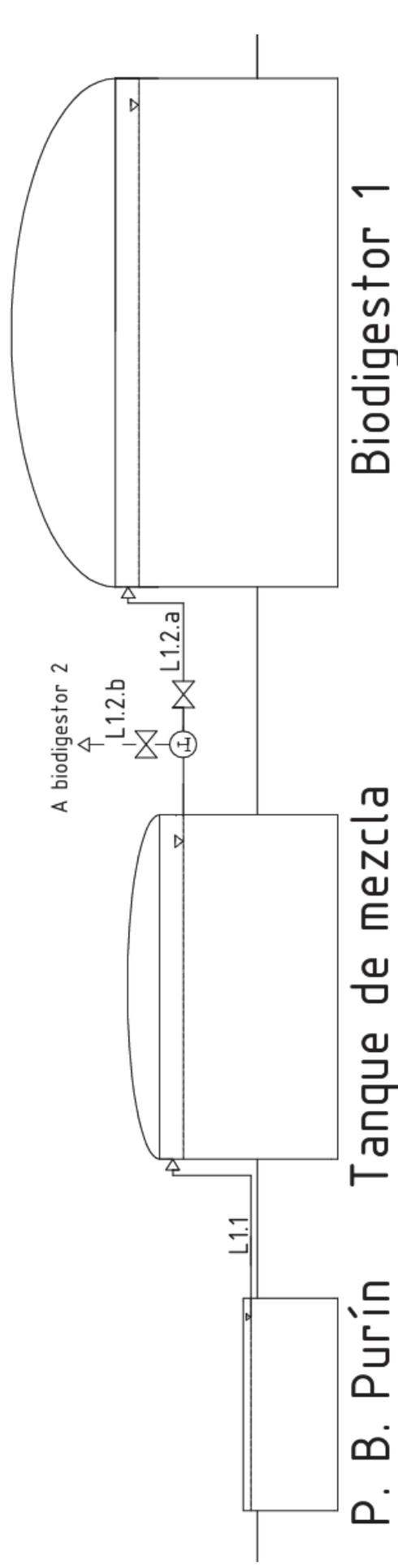


Figura 8.27. Esquema simplificado de la línea de conducción L1 (Sustrato de alimentación)

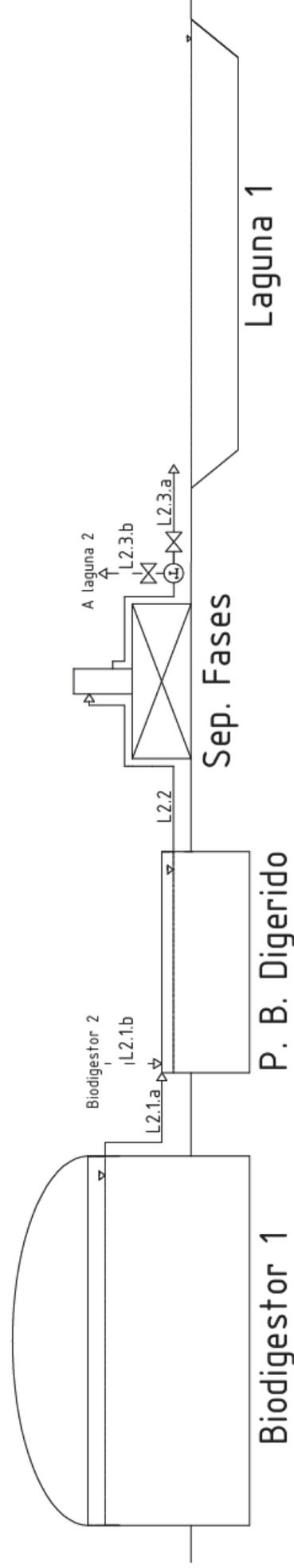


Figura 8.28. Esquema simplificado de la línea de conducción L2 (Digerido)

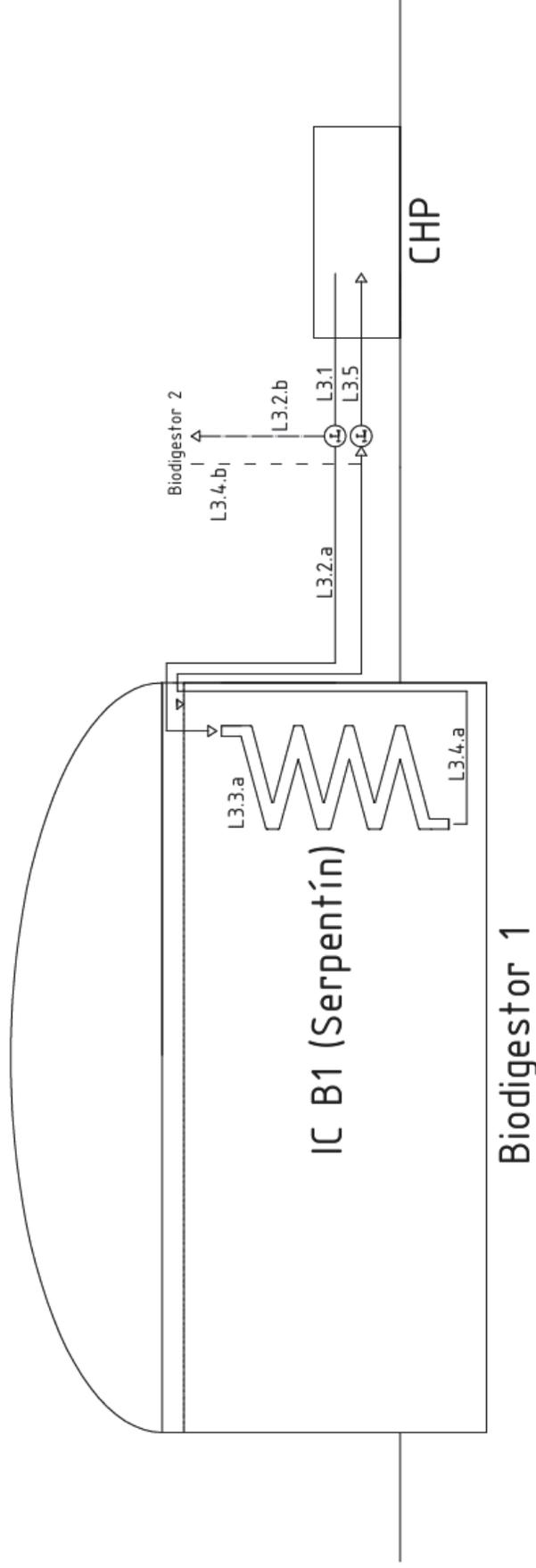


Figura 8.29. Esquema simplificado de la línea de conducción L3 (Agua-Sist. de calefacción)

8.9.1. Selección y dimensionamiento de las cañerías

En esta sección se desarrolla el cálculo del diámetro de cañería a utilizar en cada una de las secciones de las líneas. Para ello primero se ha definido el material de la cañería a utilizar y la velocidad del fluido adecuada que garantice el flujo turbulento en el interior. Además, se ha computado el factor de fricción de cada tramo, cuyo valor será utilizado posteriormente para el cálculo de las pérdidas de carga y alturas manométricas.

Cañerías línea 1

El material de la cañería elegido para la conducción del purín y del sustrato de codigestión fue polietileno de alta densidad (HDPE). Este tipo de cañería se suele emplear para la conducción de líquidos y gases, y se caracteriza por su flexibilidad y durabilidad.

Para garantizar un adecuado transporte del fluido, se ha definido el diámetro de la tubería siguiendo los criterios de diseño correspondientes para cada uno de los tramos mediante la ecuación 8.74. Adicionalmente se ha calculado el factor de fricción necesario para la posterior cuantificación de la pérdida de carga mediante la ecuación de Blasius la cual es válida para tubos lisos en un rango del número de $4000 < Re < 10^5$ (ver ecuación 8.75). Adicionalmente, se ha verificado empleando el diagrama de Moody (ver figura 8.30).

$$D_{tub, tramo} = \sqrt{\frac{4 Q_{tramo}}{\pi v_{tramo}}} \quad \text{Ecuación 8.74}$$

$$f_{tramo} = \frac{0,079}{Re_{tramo}^{0,25}} \quad \text{Ecuación 8.75}$$

Donde:

$D_{tub, tramo}$: Diámetro del tubo según el tramo de la línea. **Ver valores en la tabla correspondiente según la línea**

f_{tramo} : Factor de fricción según el tramo de la línea. **Ver valores en la tabla correspondiente según la línea**

Q_{tramo} : Caudal del fluido según el tramo de la línea. *Ver valores en la tabla correspondiente según la línea. La cantidad de horas de funcionamiento dependen del tramo*

v_{tramo} : Velocidad del fluido según el tramo de la línea. *Se adopta 1 m/s según el rango definido 1-1,5 m/s para evitar depósito de sedimentos en la tubería*

Re_{tramo} : Número de Reynolds según el tramo de la línea. *Ver valores en la tabla correspondiente según la línea*

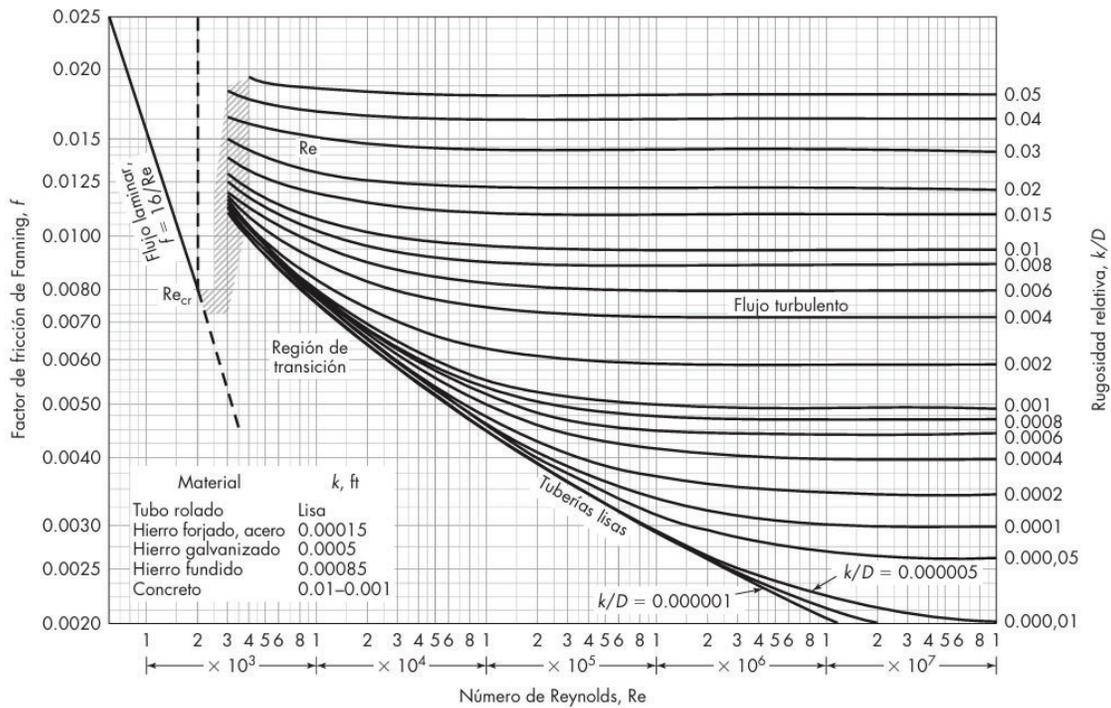


Figura 8.30. Diagrama de Moody del factor de fricción en cañerías circulares. Obtenido de McCabe et al. (2007)

En total se han definido 2 tramos, entre el pozo de bombeo del purín de cerdo hasta el ingreso a los biodigestores según el diagrama de la figura 8.27. Los resultados se vuelcan en la tabla 8.26.

Tabla 8.26. Resumen resultados del cálculo del diámetro de la tubería y el factor de fricción por cada tramo de la línea 1

Tramo	Q [m³/s]	D int. tubería calculado [mm]	D int. tubería adoptado [mm]	V recalculada [m/s]	Re	f	Observaciones
L1.1	0,00294	61,16	59,00	1,07	7,12 10 ⁴	0,005	Se adoptan los parámetros del agua ρ_{purin} : 1000 kg/m ³ μ_{purin} : 8,91 10 ⁻⁴ kg/m ³ Bombeo: 9 h
L1.2.a L1.2.b ¹²	0,00462	76,76	71,00	1,17	8,86 10 ⁴	0,005	$\rho_{SustCodg}$: 851 kg/m ³ (ver tabla 8.X) $\mu_{SustCodg}$: 8,91 10 ⁻⁴ kg/m ³ (Se adopta el valor del agua) Bombeo: 9 h

¹² Cada línea se activa por separado mediante una válvula esclusa

Cañerías línea 2

El material de la cañería elegido para la conducción del digerido fue polietileno de alta densidad (HDPE), al igual que en la línea 1 de conducción del sustrato de codigestión. Para garantizar un adecuado transporte del fluido, se ha definido el diámetro de la tubería siguiendo los criterios de diseño correspondientes para cada uno de los tramos mediante la ecuación 8.74. Adicionalmente se ha calculado el factor de fricción necesario para la posterior cuantificación de la pérdida de carga mediante la ecuación de Blasius la cual es válida para tubos lisos en un rango del número de $4000 < Re < 10^5$ (ver ecuación 8.75). Adicionalmente, se ha verificado empleando el diagrama de Moody (ver figura 8.30).

En total se han definido 3 tramos, entre los biodigestores y las lagunas de almacenamiento de la fracción líquida del mismo según el diagrama de la figura 8.28. Los resultados se vuelcan en la tabla 8.27.

Tabla 8.27. Resumen resultados cálculo del diámetro de la tubería y el factor de fricción por cada tramo de la línea 2

Tramo	Q [m ³ /s]	D int. tubería calculado [mm]	D int. tubería adoptado [mm]	V recalculada [m/s]	Re	f	Observaciones
L2.1.a L2.1.b	0,00231	54,27	46,00	1,39	$7,19 \cdot 10^4$	0,005	Se adoptan los parámetros del agua ρ_{dig} : 1000 kg/m ³ μ_{dig} : $8,91 \cdot 10^{-4}$ kg/m ³ Bombeo: 9 h
L2.2	0,00347	66,47	59,00	1,27	$8,41 \cdot 10^4$	0,005	Mismos parámetros físicos que L2.1
L2.3.a L2.3.b ¹³	0,00316	63,41	59,00	1,16	$7,65 \cdot 10^4$	0,005	Bombeo: 12 h

Cañerías Línea 3

El material de la cañería elegido para la conducción del digerido fue polietileno de alta densidad (HDPE) para los tramos entre el biodigestor y el equipo de cogeneración, mientras que el serpentín fue de acero inoxidable (ver sección 8.6.4). Para garantizar un adecuado transporte del fluido, se ha definido el diámetro de la tubería siguiendo los criterios de diseño correspondientes para cada uno de los tramos mediante la ecuación 8.74. Adicionalmente se ha calculado el factor de fricción necesario para la posterior cuantificación de la pérdida de carga. Para ello se ha empleado la ecuación de Blasius, la

¹³ Cada línea se activa por separado mediante una válvula esclusa

cual es válida para tubos lisos en un rango del número de $4000 < Re < 10^5$ (ver ecuación 8.75). Adicionalmente, se ha verificado empleando el diagrama de Moody (ver figura 8.30).

En total se han definido 5 tramos, entre los biodigestores y el equipo de cogeneración según el esquema de la figura 8.29. Los resultados se vuelcan en la tabla 8.28.

Tabla 8.28. Resumen resultados cálculo del diámetro de la tubería y el factor de fricción por cada tramo de la línea 3

Tramo	Q [m ³ /s]	D int. tubería calculado [mm]	D int. tubería adoptado [mm]	V recalculada [m/s]	Re	f	Observaciones
L3.1	0,00344	66,15	59,00	1,26	$1,45 \cdot 10^5$	0,004	<i>Se adoptan los parámetros del agua a 55 °C</i> $\rho_{dig} : 985,2 \text{ kg/m}^3$ $\mu_{dig} : 5,04 \cdot 10^{-4} \text{ kg/m}^3$ Bombeo: 24 h
L3.2.a	0,00172	46,78	46,00	1,03	$9,30 \cdot 10^4$	0,005	
L3.2.b	0,00172	46,78	46,00	1,03	$9,30 \cdot 10^4$	0,005	
L3.3.a L3.3.b	0,00172	33,94 ¹⁴	35,44	1,74	$1,21 \cdot 10^5$	0,004	
L3.4.a	0,00172	46,78	46,00	1,03	$9,30 \cdot 10^4$	0,005	
L3.4.b	0,00172	46,78	46,00	1,03	$9,30 \cdot 10^4$	0,005	
L3.5	0,00344	66,15	59,00	1,26	$1,45 \cdot 10^5$	0,004	

Los tramos correspondientes a la conducción desde el cogenerador al serpentín y viceversa, serán recubiertos por material aislante. Si bien el HDPE tiene una conductividad casi 30 veces mayor que la del acero inoxidable, es recomendable reforzar las pérdidas de calor por las paredes de los cañerías cuando sea necesario. Para ello se colocarán tubos aislantes de polietileno expandido alrededor de los caños (ver figura 8.31)



Figura 8.31. Tubos de polietileno expandido para aislamiento de cañerías

¹⁴ Se adopta una velocidad de 1,9 m/s. Para este tipo de sistemas, se sugiere que el rango de velocidades se encuentre entre 1,5-2,5 m/s

Cañerías Línea 4

El dimensionamiento de las cañerías para la conducción del biogás, así como los equipos electromecánicos necesarios, queda por fuera del alcance del proyecto en esta instancia de prefactibilidad. De todas maneras, a continuación se detallan algunos puntos a considerar en una siguiente etapa.

La conducción del biogás se hará a través de tubos de polietileno de alta densidad (PEAD). Este tipo de material es recomendado debido a su capacidad anticorrosiva. Para la elección del diámetro de cañería a colocar, se considerará un rango de velocidad para el gas entre 5 m/s (tramos cortos) y 10 m/s (tramos largos).

Por otro lado, con el fin de contrarrestar las pérdidas de carga a lo largo de la conducción, y garantizar una presión dentro del sistema adecuada, se colocarán sopladores (ver figura 8.32). Se espera que dichas caídas en la presión de la conducción sean pequeñas debido la corta distancia que deberá atravesar el gas desde el tanque de mezcla y biodigestores hacia el sistema de tratamiento, y posteriormente al equipo de cogeneración (ver layout de la planta en la sección de planos)



Figura 8.32. Soplador de biogás. Obtenido de www.zorg.biogas.com

8.9.2. Cálculo de altura manométrica (líquidos y semisólidos)

De acuerdo al perfil hidráulico de la planta y las pérdidas de carga inherentes al transporte de los fluidos por las líneas de conducción, en algunos tramos será necesario proporcionarles energía mediante una bomba. Para conocer la energía necesaria de aportar, se debe calcular primeramente la altura manométrica. Este parámetro se deduce a partir de la ecuación de Bernoulli (ver ecuación 8.76)

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + H_B = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + h_f \quad \text{Ecuación 8.76}$$

Donde:

P_1 : Presión del fluido en el punto de succión

P_2 : Presión del fluido en el punto de descarga

v_1 : Velocidad del fluido en el punto de succión

v_2 : Velocidad del fluido en el punto de descarga

ρ : Densidad del fluido

g : Aceleración de la gravedad

Z_1 : Altura del fluido en el punto de succión

Z_2 : Altura del fluido en el punto de descarga

h_f : Pérdidas de carga de la línea de conducción

H_B : Altura manométrica

Reacomodando los términos de la ecuación anterior, es posible despejar el correspondiente a la altura manométrica (ver ecuación 8.77). Mediante esta expresión se ha calculado la altura correspondiente para cada tramo, lo que ha permitido evaluar la necesidad de instalar una bomba según los requerimientos en cada tramo.

$$H_B = \frac{\Delta P}{\rho g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + \Delta Z + h_f \quad \text{Ecuación 8.77}$$

$$\text{Vale la siguiente igualdad } h_f = 4f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + \sum_{acc} k_{acc} \frac{v^2}{2g}$$

Donde:

h_f : Pérdidas de carga de la línea de conducción

f : Factor de fricción de la cañería

L : Largo de la cañería

D : Diámetro de la cañería

v : Velocidad del fluido en la cañería

k_{acc} : Coeficiente de pérdida de fricción en accesorios en la cañería

Altura manométrica en Línea 1

Empleando la ecuación 8.77 presentada previamente y los resultados obtenidos para el factor de fricción, se ha calculado la altura manométrica para cada tramo de la línea 1. En la tabla 8.29, se resumen los valores adoptados y los resultados obtenidos.

Tabla 8.29. Resumen resultados cálculo de la altura manométrica de la línea 1

Línea	L [m] ¹⁵	D [m]	ΔP [Pa]	ΔZ [m]	n Accs.	hf [m]	HB [m]	Observaciones
L1.1	9,5	0,0590	-23320	5	Codos: 4	0,3	3,0	k_{codo} : 0,7 $k_{conx.T}$: 1,6 $k_{V.escs.}$: 0,4 Ver valores de f en la tabla 8.25
L1.2.a L1.2.b	20,5	0,0710	-46641	7	Codos: 5 Conexión T: 1 V. esclusa: 1	0,8	2,8	

Altura manométrica en Línea 2

Empleando la ecuación 8.77 presentada previamente y los resultados obtenidos para el factor de fricción, se ha calculado la altura manométrica para cada tramo de la línea 2. En la tabla 8.30, se resumen los valores adoptados y los resultados obtenidos.

Tabla 8.30. Resumen resultados cálculo de la altura manométrica de la línea 2

Línea	L [m] ¹⁶	D [m]	ΔP [Pa]	ΔZ [m]	n Accs.	hf [m]	HB [m]	Observaciones
L2.1	19,2	0,0460	0	-4	Codos: 5	1,1	Conduce por gravedad	k_{codo} : 0,7 $k_{conx.T}$: 1,6 $k_{V.escs.}$: 0,4 Ver valores de f en la tabla 8.26
L2.2	15,7	0,0590	0	3,6	Codos: 8	0,9	4,5	
L2.3.a L2.3.b	44,9	0,0590	0	-4,6	Codos: 9 Conexión T: 1 V. esclusa: 1	1,6	Conduce por gravedad	Ver valores de f en la tabla 8.26

Altura manométrica en Línea 3

Empleando la ecuación 8.77 presentada previamente y los resultados obtenidos para el factor de fricción, se ha calculado la altura manométrica para cada tramo de la línea 3. En la tabla 8.31, se resumen los valores adoptados y los resultados obtenidos.

¹⁵ Valor final corregido por un factor del 10%

¹⁶ Valor final corregido por un factor del 10%

Tabla 8.31. Resumen resultados cálculo de la altura manométrica de la línea 3

Línea	L [m] ¹⁷	D [m]	ΔP [Pa]	ΔZ [m]	n Accs.	hf [m]	HB [m]	Observaciones
L3.1	34,9	0,0590	18656	-2	Codos: 4 Conexión T: 1	1,1	1,1	k_{codo} : 0,7 $k_{conx.T}$: 1,6 Ver valores de f en la tabla 8.27
L3.2.a	29,5	0,0460	-46641	5	Codos: 5	0,8	1,0	
L3.2.b	11,8	0,0460	-46641	5	Codos: 5	0,4	0,6	
L3.3.a L3.3.b	360,9	0,0354	55502	-6	-	26,7	26,5	
L3.4.a	36,3	0,0460	-8862	1	Codos: 6 Conexión T: 1	1,1	1,1	
L3.4.b	11,8	0,0460	-11194	1	Codos: 6 Conexión T: 1	0,6	0,4	
L3.5	34,9	0,0590	-18656	2	Codos: 4	1,0	1,1	

8.9.3. Sistema de bombeo

De acuerdo a los resultados obtenidos para la altura manométrica necesaria por tramo en las tablas 8.29, 8.30 y 8.31, se ha definido instalar 5 bombas. En la tabla 8.32, se resume la información correspondiente a los parámetros que deben cumplir las bombas a instalar.

Tabla 8.32. Resumen requerimientos calculados para las bombas a instalar

Bomba	Ubicación	Tramos incluidos	Q_m [kg/s]	Q_m [m ³ /h]	Hb total [m]
B1	Pozo bombeo purín	L1.1	2,94	10,60	3,00
B2	Entre tanque de mezcla y biodigestores	L1.2	4,40	16,65	2,80
B3	Entre P. B. digerido y Sep. Fas. digerido	L2.2	3,47	12,50	4,50
B4	Ingreso biodigestor AC 1	L3.1-L3.5 (a)	1,69	6,20	30,30
B5	Ingreso biodigestor AC 2	L3.1-L3.5 (b)	1,69	6,20	30,30

Con los resultados expuestos en la tabla 8.32, se han analizado catálogos de fabricantes de bombas centrífugas y de tornillos. A continuación se detallan los equipos a instalar.

¹⁷ Valor final corregido por un factor del 10%

Bomba 1. Tramo L1.1

La conducción del purín de cerdo desde el pozo de bombeo hacia el tanque de mezcla, se hará mediante una bomba centrífuga sumergible. El modelo elegido es el DRV 1100 de la marca Motorarg (ver figura 8.33). La bomba se encontrará sumergida dentro del pozo y funcionará durante 9 h/d. En la tabla 8.33, se resumen las características técnicas más importantes.



Figura 8.33. Imagen ilustrativa de la bomba modelo DRV 1100. Obtenido de www.tiendaoficialmotorarg.com.ar

Tabla 8.33. Resumen características técnicas bomba modelo DRV 1100. Ver detalles en anexo 8.14

Parámetro	Unidad	Valor
<i>Tipo de bomba</i>	-	Centrífuga sumergible
<i>Caudal</i>	m ³ /h	Ver tabla Q-H en anexo 8.14
<i>Altura</i>	m	
<i>Potencia</i>	HP	1,5

La bomba estará dispuesta dentro del pozo. La misma estará operativa durante 9 horas al día, al igual que el equipo de trituración, lo que garantizará la adecuada relación entre los sustratos de la mezcla.

Bombas 2 y 3

Para la conducción del sustrato de codigestión hacia el biodigestor (B1) y del digerido hacia el pozo de bombeo (B2), se instalarán dos bombas de tornillo helicoidal independientes. El modelo elegido es el JT 35-6 fabricado por la empresa J1 Pumps (ver figura 8.34). En la tabla 8.34, se resumen las características técnicas del mismo.



Figura 8.34. Imagen ilustrativa de la bomba modelo JT 35-6. Obtenido de www.j1srl.com

Tabla 8.34. Resumen características técnicas bomba modelo JT 1-6. Ver detalles en anexo 8.15

Parámetro	Unidad	Valor	Observaciones
Tipo de bomba	-	Tornillo helicoidal	-
Caudal máximo	m ³ /h	28	-
Presión de trabajo máxima	bar	6 ¹⁸	B2. $H_{B, B2}$: 2,8 m, equivalente a 0,26 bar B3. $H_{B, B3}$: 4,5 m, equivalente a 0,45 bar
Potencia	HP	10	-

Bombas 4 y 5

Con el fin de lograr conducir de manera efectiva el agua a través del sistema de intercambio de calor, desde el equipo de CHP hasta los serpentines en los biodigestores, se instalarán dos bombas centrífugas. Cada una de las bombas se instalará a la entrada de cada biodigestor, y funcionarán las 24 hs del día. El modelo elegido es el Zeta 5 de la marca Czerweny (ver figura 8.35). En la tabla 8.35, se resumen las características técnicas más importantes del equipo.

¹⁸ Regulable mediante el ajuste de las RPM



Figura 8.35. Imagen ilustrativa de la bomba modelo Zeta 5. Obtenido de www.cer.com.ar

Tabla 8.35. Resumen características técnicas bomba modelo Zeta 5. Ver detalles en anexo 8.16

Parámetro	Unidad	Valor
Tipo de bomba	-	Centrífuga
Caudal	m ³ /h	Ver curva Q-H en anexo 8.16
Altura	m	
Potencia	HP	2,5

8.10. Balance energético total de la planta

Una vez calculados tanto el requerimiento y la generación tanto de energía calorífica y eléctrica de la planta, a continuación se realizó el balance total de la misma. Tal como se ha desarrollado previamente, una de las condiciones que debía cumplir la planta diseñada es que sea autosuficiente en términos de consumo de energía calorífica. De esta manera, los excedentes de energía eléctrica generada estarán disponibles para su inyección en la red de distribución y venta. A continuación se desarrolla el balance de energía para ambos componentes, el cual es posible de formalizar a través de la ecuación 8.80.

$$BE_T = Gen_E - Cons_E \quad \text{Ecuación 8.80}$$

Donde:

BE : Balance de energía total (calorífica o eléctrica) [MWh/d]

Gen_E : Generación de energía (calorífica o eléctrica) [MWh/d]

$Cons_E$: Consumo de energía (calorífica o eléctrica) [MWh/d]

8.10.1. Balance de energía calorífica

Los términos necesarios para el cómputo del balance de la energía calorífica de la planta han sido previamente calculados en la sección 8.5 y 8.6. En la tabla 8.36 se resumen los resultados obtenidos en forma diaria para los términos de consumo y generación, así como el balance.

Tabla 8.36. Resumen balance de energía calorífica total de la planta

Término	Valor [MWh/d]	Observación
Consumo	6,89	Se considera la energía calorífica necesaria de aportar por los intercambiadores de calor en cada biodigestor. Se corrigió dicho consumo por un factor de seguridad del 20%
Generación	7,74	-
Balance	0,85	Balance positivo

Como se observa en la tabla anterior, el balance de energía calorífica es positivo, lo que confirma cuantitativamente el análisis realizado en el capítulo 6. Asimismo, al considerar los criterios de prefactibilidad técnica establecidos para la viabilidad del proyecto, se verifica que el diseño propuesto los cumple. Por lo tanto, se puede concluir que la construcción de la planta es técnicamente factible.

8.10.2. Balance de energía eléctrica

A diferencia del balance de energía calorífica, para el caso de la energía eléctrica no se ha desarrollado el cómputo del consumo previamente en este trabajo. En este sentido, a continuación se calcula el consumo de energía eléctrica de todos los equipos electromecánicos incluidos en el presente trabajo. Con dicho valor se va a computar el balance de energía, tomando como término positivo el dato de generación obtenido en la sección 8.5.

En la tabla 8.37 a continuación se listan los equipos electromecánicos que consumen energía eléctrica a instalar en la planta. A partir de la cantidad de equipos, su potencia y las horas de funcionamiento, se determinó el consumo de electricidad requerido de forma diaria.

Tabla 8.37. Resumen consumos de energía eléctrica por equipos electromecánicos de la planta

Unidad	Equipo/modelo	Cantidad	Potencia [kW]	Operación [h/d]	Consumo de energía [kWh/d]
Triturador nopal	Triturador Standard Model 760 Tub Grinder	1	67	9	603
Tanque de mezcla	Agitador sumergible Flygt 4230	1	4	16	64
Biodigestores	Agitador sumergible Flygt 4230	6	5,5	16	528
Tratamiento del biogás	Aireador Rs 17000	1	0,06	24	1,4
	Deshumidificador MDU 150	1	9,6	16	153,6
Pozo bombeo digerido	Agitador sumergible Flygt 4220	1	1,1	8	8,8
Separador fases digerido	Separador de digerido Horizontal H1-150-2	1	2,2	12	26,4
Conducción Deshumidificador	B. sumergible DRV 1100	1	1,11	9	10
	B. T. helicoidal JT 35-6	1	5,6	9	50,3
	B. T. helicoidal JT 35-6	1	5,6	12	67,0
	B. centrifuga Zeta 5	1	1,9	24	45
	B. centrifuga Zeta 5	1	1,9	24	45
Total [MWh/d]					1,60

Una vez computado el consumo de energía eléctrica en la sección anterior, fue posible realizar el balance correspondiente. En la tabla 8.38 se resumen los resultados obtenidos en forma diaria para los términos de consumo y generación, así como el balance.

Tabla 8.38. Resumen balance de energía eléctrica total de la planta

Término	Valor [MWh/d]	Observación
Consumo	1,76	Corregido por un 10% por consumos eléctricos de equipos no incluidos en el presente trabajo (compresores de biogás, entre otros) y consumos eléctricos generales de la planta
Generación	6,17	-
Balance	4,41	Balance positivo

Tal como se puede observar en la tabla anterior, el balance es positivo. De esta forma se estima que habrá un excedente de 4,41 *MWh/d* que podrán ser destinados para la venta y que constituirá uno de los principales ingresos económicos de la planta.

Capítulo 9. Análisis económico

9.1. Introducción

Una vez diseñada la planta de biogás final, incluyendo el dimensionamiento de las unidades así como la selección de los equipos mecánicos y electromecánicos a instalar, se procedió a realizar el análisis económico del proyecto. Como se ha destacado en diferentes partes del trabajo, el objetivo principal del análisis de prefactibilidad es estrictamente técnico, y la principal condición es que la planta sea autosustentable en términos de consumo de energía calorífica. Como se ha demostrado en la sección 8.10, la planta cumple con dicho criterio. De todas maneras, se incluye un análisis económico de forma preliminar, que servirá de insumo para posteriores etapas en el desarrollo del proyecto.

El análisis incluye, por un lado, el cálculo de la inversión inicial a partir de los insumos, equipos y servicios necesarios para la construcción. Como segundo punto, se calculan los gastos fijos de mantenimiento y operación de la planta. Como tercero, los ingresos económicos. Por último, se realiza la evaluación de la viabilidad económica del proyecto bajo diferentes escenarios a partir de los parámetros VAN y TIR.

9.2. Inversión inicial

La inversión inicial contempla la preparación del terreno, la construcción de las unidades que componen la planta, los equipos mecánicos y electromecánicos necesarios, y los servicios y mano de obra que serán requeridos para durante la etapa de construcción. Los gastos relacionados al cultivo del nopal no están incluidos en el cómputo, ya que queda por fuera del alcance del corriente trabajo. De todas maneras, se espera obtener facilidades para su desarrollo a través de los beneficios que ofrece la provincia de La Rioja en el marco de la ley 8.190.

El valor total de la inversión inicial del proyecto fue calculado en USD 4.301.416. En la tabla 9.1 se desglosa el costo itemizado por categoría.

Tabla 9.1. Itemizado de la inversión inicial para la construcción de la planta de biogás en Granja Chepes

Categoría	Item	Denominación ítem	Cantidad	Unidad Cant.	Precio unitario	Unidad PU	Subtotal	Total
1. Trabajos preliminares	1.1	Destronque, desmonte y nivelación del terreno	159600,00	m2	0,4	USD/m2	57000,0	57000,0
	1.2	Excavación	6621,6	m3	25,1	USD/m3	166012,1	223012,1
2. Pret. nopal y Tanque de mezcla	2.1	Triturador Standard Model 760 Tub Grinder	1	equipo	32150,0	USD/equipo	32150,0	255162,1
	2.2	Hormigón armado H30	28	m3	114,3	USD/m3	3200,0	258362,1
	2.3	Construcción unidad. e: 20 cm	510	m3	768,4	USD/m3	391883,6	650245,7
	2.4	Gasómetro de caucho EPDM- D: 11 m	1	gasómetro	16120,0	USD/gasómetro	16120,0	674822,5
	2.5	Agitador sumergible Flygt 4230-4kW	1	equipo	8456,8	USD/equipo	8456,8	658702,5
3. Biodigestor	3.1	Hormigón armado H30	298	m3	114,3	USD/m3	34057,1	708879,6
	3.2	Construcción unidad. e: 20 cm	3860	m3	768,4	USD/m3	2966021,2	3674900,9
	3.3	Agitador sumergible Flygt 4230-5,5kW	6	equipos	9795,0	USD/m3	58769,7	3733670,6
	3.4	Espuma de poliuretano	1204,6	l	12,4	USD/l	14961,9	3748632,5
	3.5	Placas de poliestireno expandido	514,4	m2	11,7	USD/m2	6025,8	3754658,3
	3.6	Chapas recubrimiento exterior	646	m2	6,0	USD/m2	3873,1	3758531,4
	3.7	Gasómetro de caucho EPDM- D: 18,1 m	2	gasómetro	29328,0	USD/gasómetro	58656,0	3817187,4
4. Digerido	4.1	Hormigón armado H30	13	m3	114,3	USD/m3	1485,7	3818673,1
	4.2	Construcción unidad. e: 10 cm	160	m3	354,8	USD/m3	56774,6	3875447,7
	4.3	Agitador sumergible Flygt 4220-1,1 kW	1	equipo	5869,7	USD/equipo	5869,7	3881317,4
	4.4	Separador de tornillo Horizontal H1-150-2	1	equipo	16328,0	USD/equipo	16328,0	3897645,4
	4.5	Geomembrana	5055,6	m2	2,3	USD/m2	11375,1	3909020,5
5. Biogás y gen. energía	5.1	Aireador Electrical Rs 17000	2	equipo	190,0	USD/equipo	380,0	3909400,5
	5.2	Filtro de carbón	1	equipo	33384,0	USD/equipo	33384,0	3942784,5
	5.3	Deshumificador MDU 150-Vosmik Engineering	1	equipo	52416,0	USD/equipo	52416,0	3995200,5

Continuación tabla									
	5.4	Equipo de CHP J208-Jenbacher	1	equipo	223392,0	USD/equipo	223392,0	4218592,5	
	5.5	Antorcha FAI 65-450	1	equipo	15496,0	USD/equipo	15496,0	4234088,5	
	6.1	Tubería acero inoxidable 1 1/4"	721,8	m	7,8	USD/m	5627,0	4239715,6	
	6.2	Tubería HDPE. D ext: 50 mm. e: 2 mm	120	m	7,6	USD/m	911,2	4240626,8	
	6.3	Tubería HDPE. D ext: 63 mm. e: 2 mm	135	m	8,8	USD/m	1193,4	4241820,2	
	6.4	Tubería HDPE. D ext: 75 mm. e: 2 mm	20	m	13,6	USD/m	272,3	4242092,5	
	6.6	Tubería HDPE. D ext: 75 mm. e: 6,8 mm	15	m	13,6	USD/m	204,2	4242296,8	
	6.5	Tubería HDPE. D ext: 125 mm. e: 11,4 mm	75	m	25,5	USD/m	1915,7	4244212,5	
	6.7	Bomba sumergible V450 Vortex	1	equipo	496,6	USD/equipo	496,6	4244709,1	
	6.8	B. T. helicoidal JT 35-6	2	equipo	8400,0	USD/equipo	16800,0	4261509,1	
	6.9	Bomba centrífuga Zeta 5	2	equipo	410,3	USD/equipo	820,5	4262329,6	
	6.10	Soplador de biogás	1	equipo	1404,0	USD/equipo	1404,0	4263733,6	
	7.1	Construcción laboratorio	12	m2	448,6	USD/m2	5383,6	4269117,2	
	7.3	Analizador biogás	1	equipo	5928,0	USD/equipo	5928,0	4275045,2	
	7.4	Estufa	1	equipo	2093,3	USD/equipo	2093,3	4277138,5	
	7.5	Mufla	1	equipo	4317,3	USD/equipo	4317,3	4281455,7	
	7.6	pHmetro	1	equipo	1573,0	USD/equipo	1573,0	4283028,7	
	7.7	Sonda de conductividad	1	equipo	3388,0	USD/equipo	3388,0	4286416,7	
	7.8	Material de vidrio laboratorio	1	material	10000,0	USD/material	10000,0	4296416,7	
	7.9	Insumos químicos	1	insumos	5000,0	USD/insumos	5000,0	4301416,7	
Total inversión inicial [USD]								4301416,7	

6. Bombas y conducciones**7. Operación**

9.3. Gastos fijos

Los gastos fijos de la planta incluye todos aquellos gastos necesarios para el correcto funcionamiento de la misma. Entre estos se considera el personal necesario, la contratación de servicios e insumos para el mantenimiento y reparación de los equipos y unidades, así como los servicios generales. Cabe destacar que, tal como se ha computado en la sección 8.10, la planta se autoabastecerá de energía eléctrica para su funcionamiento. De esta forma no es considerada en el cómputo.

El valor total calculado para los gastos fijos del proyecto fue de USD 168.566. En la tabla 9.2, se desglosa el itemizado de los gastos fijos anualizados.

Tabla 9.2. Itemizado de los gastos fijos anuales para la operación y mantenimiento de la planta de biogás en Granja Chepes

Categoría	Item	Denominación ítem	Cantidad	Unidad Cant.	Precio unitario	Unidad PU	Subtotal	Total
Gastos fijos	8.1	Operadores	2	Empleados	16900,0	USD/Empleado *año	33800,0	33800,0
	8.2	Asistentes	1	Empleados	11700,0	USD/Empleado *año	11700,0	45500,0
	8.3	Supervisor	1	Empleados	26000,0	USD/Empleado *año	26000,0	71500,0
	8.4	Mantenimiento equipos mecánicos y electromecánicos	1	-	43014,2	USD/año	43014,2	114514,2
	8.5	Carbón activado	7,8	t	1228,6	USD/t*año	9551,5	124065,7
	8.6	Material de laboratorio (recambio)	1	Material	5000,0	USD/material *año	5000,0	129065,7
	8.7	Insumos químicos	1	Insumos	2500,0	USD/insumos* año	2500,0	131565,7
	8.8	Derivación de ensayos	1	Ensayos	13000,0	USD/ensayos* año	13000,0	144565,7
	8.9	Servicios generales	1	Servicios	24000,0	USD/servicios* año	24000,0	168565,7
Total gastos fijos [USD/año]							168565,7	168565,7

9.4. Ingresos

La principal fuente de ingresos del proyecto provendrá de la venta de los excedentes de la energía eléctrica producida. Tal como se ha desarrollado en la sección 8.10.2, una vez satisfechas todas las demandas de consumo eléctrico de los equipos de la planta, habrá disponibles 4,41 MWh/d para su inyección y venta en la red de distribución provincial.

Adicionalmente, se va a computar como ingreso económico, el dinero que potencialmente pueda ingresar por la venta del digerido. Actualmente, el mercado para su comercialización ha avanzado fuertemente debido al trabajo en conjunto de diferentes grupos tanto desde el estado como del sector privado. Muestra de esto, fue la aprobación de la Norma Técnica para la Aplicación Agrícola de Digerido en el año 2019 (resolución 19/2019) y la resolución del SENASA 1004/23 que aprueba el registro y venta de bioinsumos, entre ellos el digerido.

Para el precio de venta de la energía eléctrica se adoptaron los precios de los contratos otorgados en las diferentes rondas RenovaAr entre los años 2016 y 2017. Los precios asignados estuvieron en el rango entre los 120 y 180 USD/MW¹⁹. En cuanto al precio de venta del digerido, fue calculado en función de su contenido de nitrógeno.

Mediante la ecuación 9.1, se computó el ingreso anual en dólares de la planta por la inyección y venta de la energía eléctrica en la red de distribución, y la potencial venta de la fracción líquida del digerido. Los resultados según los posibles precios de venta de la energía eléctrica se vuelcan en la tabla 9.3.

¹⁹ Precios adjudicados del Programa RenovAr. Rondas 1, 1.5 y 2
<http://www.minem.gob.ar/www/833/25871/precios-adjudicados-del-programa-renovar>

$$I = I_{Ee} + I_{dig} \quad \text{Ecuación 9.1}$$

Valen las siguiente igualdades

$$I_{Ee} = Gen_E d_{op} p_{v,EE}$$

$$I_{Dig} = P_{FL,dig} d_{op} C_{N,dig} p_{v,N}$$

Donde:

I : Ingresos por venta de los subproductos. **Valor: ver tabla 9.3**

I_{Ee} : Ingresos por la venta de los excedentes de energía eléctrica. **Valor: ver tabla 9.3**

I_{dig} : Ingresos por la venta de la fracción líquida del digerido. **Valor: 112.939 USD/año**

Gen_E : Generación de energía eléctrica. *Valor: 4,41 MWh/d*

$p_{v,EE}$: Precio de venta de la energía por inyección en la red de distribución. *Valor: 120-180 USD/MW*

$P_{FL,dig}$: Producción de la fracción líquida obtenida del digerido. *Valor: 136,4 m³/d. Se asume densidad igual a 1 t/m³.*

$C_{N,dig}$: Concentración de nitrógeno en el digerido. *Valor: 4,5 kg/m³. Criterio: en base a valores medidos en digeridos de plantas de biogás operativas de Argentina*

$p_{v,N}$: Precio de venta de del digerido en función de su carga de nitrógeno. *Valor: 520 USD/t. Criterio: se adopta el valor de venta de la tonelada de urea granulada a marzo del 2025²⁰*

d_{op} : Días operativos de la planta. *Valor: 360 d/año*

Tabla 9.3. Ingresos por la venta de los subproductos generados según precio de energía eléctrica

Precio venta E. eléctrica [USD/MW]	Ingresos venta E. eléctrica [USD/año]	Ingresos venta digerido [USD/año]	Ingreso total por venta de subproductos [USD/año]
120	190512	112939	303451
130	206388		319327
140	222264		335203
150	238140		351079
160	254016		366955
170	269892		382831
180	285768		398707

²⁰ Precio de venta de urea granulada <https://www.agrofy.com.ar/fertilizantes/fertilizante-urea>

9.5. Viabilidad económica del proyecto: VAN y TIR

Con el fin de realizar una evaluación económica preliminar del proyecto, se han calculado los indicadores denominados como valor actual neto (VAN) y tasa interna de retorno (TIR). A partir de estos, es posible realizar una evaluación de la rentabilidad y por consiguiente la viabilidad de un proyecto.

En su gran mayoría, los proyectos ambientales no logran ser rentables a nivel económico, y en pocos casos se logra recuperar la inversión. Esto surge de medir los beneficios de estos proyectos meramente en términos de obtención de ganancias económicas, sin incluir en el cómputo los beneficios que traen aparejados una vez desarrollados. Entre ellos se pueden mencionar la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero, la creación de infraestructura para favorecer la resiliencia climática, entre otros.

En la actualidad, existen diversas medidas y alternativas de financiamiento impulsadas tanto desde el sector público como privado, que consideran de forma implícita los beneficios asociados a la implementación de proyectos de esta naturaleza. A partir de ellos, es posible en el actual contexto, alcanzar su viabilidad en términos económicos. A continuación, se describen algunas iniciativas, con antecedentes a nivel nacional e internacional, que pueden contribuir a este objetivo:

- **Fomento de precios diferenciales para la energía renovable:** Experiencias como las rondas RenovAr 1 (2016) y 2 (2017) han promovido precios preferenciales para la venta de energía de fuentes renovables, incluyendo el biogás. La implementación de esquemas similares favorecería la rentabilidad del proyecto.
- **Regulación y desarrollo del mercado del digerido:** Actualmente, existe normativa que regula tanto la calidad del digerido para su aplicación agrícola, así como el registro y venta como bioinsumo. La primera es la resolución 19/2019 y la segunda es la resolución del SENASA 1004/2023, respectivamente. El avance en estudios sobre la caracterización del digerido y la disponibilidad de información al respecto, va a impulsar y popularizar este mercado, pudiendo ser una fuente de ingresos de peso para este tipo de proyectos.
- **Promoción del mercado de bonos de carbono:** La producción de biogás a partir de residuos y efluentes contribuye a la reducción de emisiones tanto por una gestión adecuada de estos residuos como por la sustitución parcial de combustibles fósiles. En este sentido, el proyecto tiene el potencial de participar en el mercado de bonos de carbono a nivel nacional e internacional, generando ingresos adicionales.

- **Acceso a beneficios económicos por normativa provincial:** La provincia de La Rioja cuenta con normativas aplicables al proyecto, como las leyes 8.190, 9.818 y 10.150 (ver sección 3.2). Acceder a los beneficios estatales para proyectos de este tipo podría reducir costos de inversión y garantizar precios diferenciales para la venta de energía, mejorando así su rentabilidad.
- **Acceso a financiamiento internacional:** El proyecto representa una iniciativa de alto interés en la región para instituciones de financiamiento y crédito internacional. La utilización de cladodios de nopal para la generación de biogás lo convierte en un caso de estudio relevante para futuros desarrollos. La obtención de financiamiento a través de créditos a baja tasa o fondos no reembolsables podría reducir significativamente la inversión inicial requerida.

Ante la situación descrita, para evaluar la viabilidad económica se realizó un análisis de los indicadores VAN y TIR en base a diferentes escenarios, y se buscó aquel a partir del cual el proyecto logra ser sustentable. Para ello se evaluaron posibles casos para el precio de venta de la energía eléctrica producida (ver sección 9.3), en conjunto con situaciones hipotéticas de reducción del costo de la inversión inicial. El segundo grupo de casos sería posible gracias al financiamiento del proyecto mediante instituciones internacionales, así como por el estado de la provincia de La Rioja.

9.5.1. Análisis de escenarios por VAN

El VAN, de acuerdo a Dumrauf (2010), es definido como el valor obtenido de la diferencia entre el valor presente de los futuros ingresos netos esperados y la inversión inicial. Esta medida puede formalizarse mediante la expresión de la ecuación 9.2, la cual fue empleada para el análisis de los diferentes escenarios propuestos.

$$VAN = -I_o + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+k)^t} \quad \text{Ecuación 9.2}$$

Donde:

VAN: Valor actual neto del proyecto [USD]. **Ver resultados en la matriz de la tabla 9.4**

I_o: Inversión inicial del proyecto [USD]. *Valor: según el caso definido por el ahorro en el costo de la inversión inicial*

n: Cantidad de periodos en años. *Valor: 20. Se asume que el proyecto tiene una vida útil de 20 años. Este criterio responde al tiempo de vida útil de las unidades y los equipos, considerando su reparación y mantenimiento.*

t: Periodo evaluado (años).

F_t: Flujo efectivo en el periodo evaluado [USD]

k : Costo oportunidad del capital. Valor: 0,025. Equivalente a un 2,5%. Criterio: Se adopta la TNA para plazos fijos en dólares del Banco Nación Argentina a marzo del 2025²¹ (ver anexo 9.1)

Los escenarios evaluados consideraron, por un lado, precios de venta de la energía eléctrica en un rango de 120 a 180 USD/MW y, por otro, una reducción en el costo de inversión inicial de entre 0 % y 30 %. En base a esto, se elaboró el flujo de caja para cada caso (ver anexo 9.3) y se calculó el VAN correspondiente a cada escenario. Los resultados se presentan en la matriz de la tabla 9.4.

Tabla 9.4. Matriz de VAN para los posibles escenarios de precio de venta de la energía y ahorro en el costo de inversión inicial

		Reducción costo Inversión inicial [%]						
		0	5	10	15	20	25	30
Precio venta E. eléctrica [USD/MW]	120	-\$2.198.665	-\$1.983.594	-\$1.768.523	-\$1.553.452	-\$1.338.381	-\$1.123.311	-\$908.240
	130	-\$1.951.171	-\$1.736.100	-\$1.521.030	-\$1.305.959	-\$1.090.888	-\$875.817	-\$660.746
	140	-\$1.703.678	-\$1.488.607	-\$1.273.536	-\$1.058.465	-\$843.394	-\$628.323	-\$413.253
	150	-\$1.456.184	-\$1.241.113	-\$1.026.042	-\$810.972	-\$595.901	-\$380.830	-\$165.759
	160	-\$1.208.691	-\$993.620	-\$778.549	-\$563.478	-\$348.407	-\$133.336	\$81.734
	170	-\$961.197	-\$746.126	-\$531.055	-\$315.985	-\$100.914	\$114.157	\$329.228
	180	-\$713.703	-\$498.633	-\$283.562	-\$68.491	\$146.580	\$361.651	\$576.722

Los resultados presentados en la matriz anterior muestran que el VAN se vuelve positivo cuando el precio de venta de la energía alcanza los 180 USD/MW y la reducción en el costo de la inversión inicial es del 20 %. En este escenario, la inversión inicial se recupera, lo que determina que el proyecto no solo es técnicamente viable, sino también económicamente sustentable. Condiciones más favorables (mayor reducción en el costo de la inversión inicial), aumentan la rentabilidad del proyecto.

9.5.2. Análisis de escenarios por TIR

El TIR, según la definición provista por Dumrauf (2010), es la tasa que descuenta el valor de los futuros ingresos esperados, igualándolos con la inversión inicial. Matemáticamente, es posible definirla como la tasa k que hace el VAN igual a cero. La ecuación 9.3, la cual fue empleada para el análisis de los diferentes escenarios propuestos, formaliza esta medida.

²¹ <https://www.bna.com.ar/home/informacionalusuariofinanciero>

$$0 = -I_0 + \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+TIR)^t} \quad \text{Ecuación 9.3}$$

Donde:

TIR: Tasa interna de retorno. **Ver resultados en la matriz de la tabla 9.5**

I_0 : Inversión inicial del proyecto. *Valor*: según el caso definido por el ahorro en el costo de la inversión inicial

n : Cantidad de periodos en años. *Valor*: 20. Se asume que el proyecto tiene una vida útil de 20 años. Este criterio responde al tiempo de vida útil de las unidades y los equipos, considerando su reparación y mantenimiento.

t : Periodo evaluado (años).

F_t : Flujo efectivo en el periodo evaluado [USD]

Los escenarios evaluados consideraron, al igual que en el cómputo del VAN, precios de venta de la energía eléctrica en un rango de 120 a 180 USD/MW, y una reducción en el costo de inversión inicial de entre 0 % y 30 %. En base a esto, se elaboró el flujo de caja para cada caso (ver anexo 9.2) y se calculó la TIR correspondiente a cada escenario. Los resultados se presentan en la matriz de la tabla 9.5.

Tabla 9.5. Matriz de TIR para los posibles escenarios de precio de venta de la energía y ahorro en el costo de inversión inicial

		Reducción costo Inversión inicial [%]						
		0	5	10	15	20	25	30
Precio venta E. eléctrica [USD/MW]	120	-4,08%	-3,67%	-3,22%	-2,74%	-2,21%	-1,65%	-1,02%
	130	-3,17%	-2,74%	-2,27%	-1,77%	-1,23%	-0,64%	0,01%
	140	-2,32%	-1,87%	-1,39%	-0,87%	-0,30%	0,31%	0,99%
	150	-1,51%	-1,05%	-0,55%	-0,02%	0,57%	1,21%	1,91%
	160	-0,76%	-0,28%	0,24%	0,79%	1,40%	2,06%	2,79%
	170	-0,04%	0,46%	0,99%	1,56%	2,19%	2,87%	3,63%
	180	0,65%	1,16%	1,71%	2,30%	2,95%	3,65%	4,43%

Los resultados presentados en la matriz anterior muestran que la TIR se vuelve mayor a la tasa k cuando el precio de venta de la energía alcanza los 180 USD/MW y la reducción en el costo de la inversión inicial es del 20 %. En este escenario, el proyecto se vuelve técnica y económicamente sustentable. Condiciones más favorables (mayor reducción en el costo de la inversión inicial), aumentan la rentabilidad del proyecto.

Capítulo 10. Planos

Los planos de ingeniería básica de la planta de biogás diseñada se hallan en el anexo 10. A continuación se describen los planos incluidos:

- Plano 01: Vista en planta.
- Plano 02: Vista en corte de la planta y perfil hidráulico.
- Plano 03: Vistas tanque de mezcla.
- Plano 04: Vistas biodigestor.
- Plano 05: Vistas pozo de bombeo del digerido.
- Plano 06: Vistas laguna.

Capítulo 11. Conclusiones

El desarrollo de este proyecto ha permitido demostrar la viabilidad técnica de la instalación de una planta de biogás para el tratamiento de purín de cerdo y cladodios de nopal en el establecimiento Granja Chepes, ubicado en la provincia de La Rioja. La planta diseñada a construir, tiene la capacidad de tratar todo el purín generado de forma diaria, es autosustentable en términos de consumo de energía calorífica, y el área de cultivo de nopal requerida es menor a la disponible. El diseño contempló la ingeniería básica de la planta, incluyendo el dimensionamiento de los biodigestores, las unidades complementarias, y la selección de equipos mecánicos y electromecánicos.

Uno de los aspectos fundamentales del trabajo fue la realización de ensayos experimentales para la caracterización fisicoquímica de los sustratos purín de cerdo y cladodios nopal, y de su potencial de generación de metano. A partir de esta información generada, se realizó un análisis de casos basado fundamentalmente sobre el estudio del balance de energía calorífica del biodigestor para cada posible relación de codigestión. Como resultado, se pudo hallar aquella que garantice el cumplimiento de los criterios de viabilidad técnica.

Adicionalmente, se llevó a cabo el análisis económico que incluyó el cómputo y presupuesto del proyecto, y una evaluación de factibilidad económica. Para ello se analizaron distintos posibles escenarios. Se identificó que, bajo ciertas condiciones de precio de venta de la energía y reducción en los costos de inversión inicial, el proyecto no solo es viable, sino que también puede presentar un margen de rentabilidad.

Al demostrarse la factibilidad del proyecto, este representa una alternativa innovadora para la gestión sostenible del purín, ya que incorpora un cultivo energético apto para su crecimiento en zonas áridas o semiáridas. Los resultados obtenidos, por otro lado, exhiben la necesidad de continuar trabajando en las alternativas para el aprovechamiento del digerido y el fortalecimiento del mercado de subproductos.

En conclusión, el proyecto de la planta de biogás diseñada no solo es capaz de ofrecer una solución técnica para la gestión del purín de cerdo en Granja Chepes, sino que también tiene potencial de contribuir al desarrollo sustentable y económico de la provincia de La Rioja. Su implementación y éxito podrían servir como caso de estudio para futuras aplicaciones de esta tecnología, impulsando el uso del nopal como recurso estratégico y promoviendo el crecimiento regional en torno a esta fuente de energía renovable.

Bibliografía

Amaral, A. C., Kunz, A., Steinmetz, R. L. R., Scussiato, L. A., & Tapparo, D. (2015). Anaerobic digestion of swine manure: stratified production units and its biogas potential.

Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., Kalyuzhnyi, S., Jenicek, P., & Lier, J. B. Van. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops : a proposed protocol for batch assays. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.040>

APHA. (2023). Standard methods for the examination of water and wastewater (24th ed.). American Public Health Association.

Astals, S., Batstone, D. J., Tait, S., & Jensen, P. D. (2015). Development and validation of a rapid test for anaerobic inhibition and toxicity. *Water Research*, 81, 208–215. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2015.05.063>

Astals, S., Koch, K., Weinrich, S., Hafner, S. D., Tait, S., & Peces, M. (2020). Impact of storage conditions on the methanogenic activity of anaerobic digestion inocula. *Water (Switzerland)*, 12(5), 1–12. <https://doi.org/10.3390/W12051321>

Bioprocess Control. (2013). The importance of the “eliminate overestimation” activated function during a BMP test performed with AMPTS II. Sin publicar.

Bioprocess Control . (2016). AMPTS II & AMPTS II Light Automatic Methane Potential Test System Operation and Maintenance Manual. Recuperado de: https://bpcinstruments.com/wp-content/uploads/2022/02/2022_AMPTS-II-and-AMPTS-II-Light-Manual.pdf

Bioprocess Control. (s. f). Discover the benefits of the AMPTS II. Recuperado de: https://bpcinstruments.com/wp-content/uploads/2022/02/2022_116429_AMPTS-II.pdf

Beil, M., & Hoffsted, U. (2010). Guidelines for the implementation and operation of biogas upgrading systems. Biogasmax. Project supported by the EU under RTC contract: 019795.

Bochmann, G., & Montgomery, L. F. R. (2013, January 1). 4 - Storage and pre-treatment of substrates for biogas production (A. Wellinger, J. Murphy, & D. Baxter, Eds.). ScienceDirect; Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857097415.1.85>

Bonatto, I., Becker, H., Matias, M., Filho, P., & Júnior, A. (2024). Removal of H₂S from biogas by adsorption with commercial activated carbon and granular iron oxide. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*. 29. 10.1590/s1413-41522023135.

Bres, P. A., Branzini, A., Beily, M. E., Escartín, C., Hilbert, J. A., & Almada, M. (2021). Relevamiento de Producción de Digeridos de Plantas de Biogás en Argentina. <https://repositorio.inta.gob.ar/xmlui/handle/20.500.12123/12099?show=full>

Bres, P.; Beily, M. E. & Crespo, D. (2022). Ensayo de potencial bioquímico metanogénico. Una metodología clave para conocer la energía de las biomásas. INTA ediciones. <http://hdl.handle.net/20.500.12123/11309>

Caminiti, R., Serra, M., Nucera, S., Ruga, S., Oppedisano, F., Scarano, F., Macrì, R., Muscoli, C., Palma, E., Musolino, V., Statti, G., Mollace, V., & Maiuolo, J. (2024). Antioxidant Activity and Seasonal Variations in the Composition of Insoluble Fiber from the Cladodes of *Opuntia ficus-indica* (L.) Miller: Development of New Extraction Procedures to Improve Fiber Yield. *Plants*, 13(4), 544. <https://doi.org/10.3390/plants13040544>

Cavallero, M. I., Rigonatto, G. M., Bono, G. R., & Pinto, J. J. (2022). Producción y calidad de la tuna (*Opuntia ficus-indica*) en el Chaco Semiárido. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA)

Cengel, Y. A., Ghajar, A. J. (2011) *Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones*. McGraw-Hill

Chernicharo, C. A. L. (2007). *Anaerobic Reactors* (1st ed.). IWA Publishing. Recuperado de <https://www.perlego.com/book/572112/anaerobic-reactors-pdf>

Comisión Económica para América Latina y el Caribe. 2021. *La Rioja en el siglo XXI: desafíos y oportunidades para su transformación productiva*. Recuperado de: <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/531719e4-c8aa-42c8-be8b-4c4c5440ddfb/content>

Cortázar, Victor & Nobel, Park. (1992). Biomass and Fruit Production for the Prickly Pear Cactus, *Opuntia ficus-indica*. *Journal of the American Society for Horticultural Science*. 117. 10.21273/JASHS.117.4.558

Deublein, Dieter & Steinhauser, Angelika. (2011). *Biogas from Waste and Renewable Resources*. 10.1002/9783527632794.

Drosg, B. (2013). *Process Monitoring in Biogas Plants*; IEA Bioenergy Paris

Dumrauf, G. L. (2010). *Finanzas corporativas: Un enfoque latinoamericano*. Alfaomega.

Falasca, S., Bernabé, M. A., & Lamas, C. (2011). Aptitud agroclimática de áreas áridas y semiáridas de Argentina para el cultivo de tuna (*Opuntia ficus indica*) como fuente de bioetanol. Recuperado de: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/192453>

FAO. 2019. *Guía teórico-práctica sobre el biogás y los biodigestores*. Colección Documentos Técnicos N° 12. Buenos Aires. 104 pp.

Filer, J., Ding, H., & Chang, S. (2019). Biochemical Methane Potential (BMP) Assay Method for Anaerobic Digestion Research. *Water*. 11. 10.3390/w11050921.

Gobierno Municipal de Rosario Vera Peñaloza. 2015. *Diagnóstico participativo. Lineamientos Estratégicos*. Recuperado de: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/rosario_vera_penaloza_diagnostico_participativo_y_lineamientos_estrategicos_2015_2019.pdf

González Martineaux, S. 2005. Caracterización de los purines de cerdos. Taller de capacitación en evaluación ambiental de planteles ganaderos. Serie Actas del Instituto de Investigaciones Agropecuarias-INIA, 29: 23-44. Temuco (Chile).

Grady Jr., C.P.L., Daigger, G.T., Love, N.G., & Filipe, C.D.M. (2011). *Biological Wastewater Treatment* (3rd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b13775>

Guevara J. C., & Estevez O. R. (2003). *Opuntia spp. para la producción de forraje en Argentina: experiencias y perspectivas*. Recuperado de: <https://www.fao.org/4/y2808e/y2808e0c.htm#bm12>

Holliger, C., Alves, M., Andrade, D., Angelidaki, I., Astals, S., Baier, U., Bougrier, C., Buffière, P., Carballa, M., de Wilde, V., Ebertseder, F., Fernández, B., Ficara, E., Fotidis, I., Frigon, J.-C., de Laclos, H. F., Ghasimi, D. S. M., Hack, G., Hartel, M., ... & Wierinck, I. (2016). Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science and Technology*, 74(11), 2515–2522. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.336>

Homer, Ian & Varnero, María. (2023). *Biogas production in the cactus agroindustry*

Inglese, P., Mondragon, C., Nefzaoui, A., Saenz, C., Taguchi, M., Makkar, H., & Louhaichi, M. (2017). *Crop ecology, cultivation and uses of cactus pear*. Rome, Italy: FAO.

Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. 2023. *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2022. Indicadores demográficos, por sexo y edad*. Recuperado de: https://www.indec.gob.ar/ftp/cuadros/poblacion/censo2022_indicadores_demograficos.pdf

Lopez Hernandez, J. E., Morgan-Sagastume, J., & Cabral, Carolina. (2019). “Guía práctica de desulfuración biológica de biogás. Criterios de diseño, arranque y operación para sistemas con microaireación y con biofiltro percolador”.

Maile, O.I., Muzenda, E., & Tesfagiorgis, H. (2016). Chemical Absorption of Carbon Dioxide in Biogas Purification. *Procedia Manufacturing*. 7. 639-646. 10.1016/j.promfg.2016.12.095.

Maisonave, R., Millares, P., & Lamelas, K. (s.f.). *Buenas prácticas de manejo y utilización de efluentes porcinos*. Biblioteca Digital SAGYP. <http://bibliotecadigitalsagyp.magyp.gob.ar/items/show/197>

Marszałek, Marta & Kowalski, Zygmunt & Makara, Agnieszka. (2014). Physicochemical and microbiological characteristics of pig slurry. *Technical Transactions*. 81-91.

Mccabe, W., Smith, J., & Harriott, P. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. Séptima Edición, Mcgraw-Hill Interamericana. 1189 Págs. ISBN-13: 978-970-10-6174-9.

Medina Rey, J. M. (2013). *Agrocombustibles y seguridad alimentaria*. Ministerio de Defensa: Instituto Español de Estudios Estratégicos.

Meneses Quelal, O, & Velazquez Martí, B. (2020). Pretreatment of Animal Manure Biomass to Improve Biogas Production: A Review. *Energies*, 13(14), 3573. <https://doi.org/10.3390/en13143573>

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. 2021. *Anuario porcino 2021*. Recuperado de: https://www.magyp.gob.ar/sitio/areas/porcinos/estadistica/archivos/000005-Anuario/21000_0_Anuario%202021.pdf

Millares, P. (n.d.). Manejo de efluentes líquidos. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca. Recuperado de: https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_porcina/00-instalaciones_porcinas/34-efluentes_patricia_millares.pdf

Paul, E.L., Atiemo-Obeng, V.A. and Kresta, S.M. (2004) Handbook of Industrial Mixing Science and Practice. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken.

Ramírez-Arpide, F. R., Espinosa-Solares, T., Gallegos-Vázquez, C., & Santoyo-Cortés, V. H. (2019). Bioenergy production from nopal cladodes and dairy cow manure on a farm-scale level: Challenges for its economic feasibility in Mexico. *Renewable Energy*, 142, 383–392. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.04.093>

Raposo, F., Fernández-Cegrí, V., de la Rubia, M. A., Borja, R., Béline, F., Cavinato, C., Demirer, G., Fernández, B., Fernández-Polanco, M., Frigon, J. C., Ganesh, R., Kaparaju, P., Koubova, J., Méndez, R., Menin, G., Peene, A., Scherer, P., Torrijos, M., Uellendahl, H., ... de Wilde, V. (2011). Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates: Evaluation of anaerobic biodegradability using data from an international interlaboratory study. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, 86(8), 1088–1098. <https://doi.org/10.1002/jctb.2622>

Sarker, S., Lamb, J.J., Hjelme, D.R. & Lien, K.M. (2019). A Review of the Role of Critical Parameters in the Design and Operation of Biogas Production Plants. *Appl. Sci.* 2019, 9, 1915. <https://doi.org/10.3390/app9091915>

Silveira, I. C. T. (2000). Metodologias avançadas para avaliação de biomassa metanogênica em reatores de baixa carga. <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/222719?show=full>

Subsecretaría de Políticas para el Desarrollo con Equidad Regional. s.f. Cadenas de Valor. La Rioja. Recuperado de: https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/la_rioja_-_cadenas_de_valor.pdf

Tabatabaei, M., & Ghanavati, H. (2018). Biogas.Fundamentals, process and operation. In *Biofuel and biorefinery technologies* (p. 471). Springer International Publishing AG. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-77335-3>

Teleszewski, T.J., & Zukowski, M. (2018) Analysis of Heat Loss of a Biogas Anaerobic Digester in Weather Conditions in Poland. *Journal of Ecological Engineering*, 19, 242-250. <https://doi.org/10.12911/22998993/89660>

Universidad Autónoma de Barcelona. 2019. Manejo y producción de porcinos, Breve manual de aproximación a la empresa porcina para estudiantes de veterinaria. Recuperado de: https://www.produccion-animal.com.ar/produccion_porcina/00-produccion_porcina_general/278-manual_porcino.pdf

Vargas, V. M. T., Mayorga, D. F. B., Álvarez, M. P. F., & Espinoza, J. P. C. (2022). Los biocombustibles como alternativa de energía a partir de recursos renovables y/o desechos.

V.D.I. (2006). VDI 4630. Fermentation of organic materials. Characterization of the substrate, sampling, collection of material data, fermentation tests

Wang, B., Björn, A., Strömberg, S., Nges, I. A., Nistor, M., & Liu, J. (2017). Evaluating the influences of mixing strategies on the Biochemical Methane Potential test. *Journal of Environmental Management*, 185, 54–59. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.10.044>

Wellinger, A., Murphy, J., & Baxter, D. (2013). *The Biogas Handbook: Science, Production and Applications*.

Xie, S., Lawlor, P., Frost, P., Wu, G., Gilkinson, S., Rodgers, M., & Zhan, X. (2009). Biogas production from anaerobic co-digestion of pig manure and grass/maize silage

Anexos

Anexo 5.1. Planilla de carga de los reactores para ensayo de PBM.

Reactor	Denominación de la muestra	Sustrato	mt (g totales)	mi (g de inoculo)- Calculada	ms (g de sustrato)- Calculada
1	Blanco 01	-	400	400	0
2	Blanco 01	-	400	400	0
3	Control Celulosa	Celulosa	400	396	4
4	Control Gelatina	Gelatina (Sintetica B)	400	395,7	4,3
5	Cactus Opuntia 01	Cactus Opuntia	400	367,4	32,6
6	Cactus Opuntia 02	Cactus Opuntia	400	367,4	32,6
7	Cactus Opuntia 03	Cactus Opuntia	400	367,4	32,6
8	Purin + Cactus 50:50 01	Purin + Cactus 50:50	400	344,5	55,5
9	Purin + Cactus 50:50 02	Purin + Cactus 50:50	400	344,5	55,5
10	Purin + Cactus 50:50 03	Purin + Cactus 50:50	400	344,5	55,5
11	Purin de Cerdo 01	Purin de Cerdo	400	213,9	186,1
12	Purin de Cerdo 02	Purin de Cerdo	400	213,9	186,1
13	Purin de Cerdo 03	Purin de Cerdo	400	213,9	186,1

Anexo 6.1. Registros variables meteorológicas estación Chemical Aero para el periodo 1991-2010

Estación	Valor Medio de	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
CHAMICAL AERO	Temperatura (°C)	27,0	25,3	23,2	19,3	15,2	11,8	11,0	14,3	18,1	22,1	24,6	26,6
CHAMICAL AERO	Temperatura máxima (°C)	33,8	31,9	29,5	25,6	21,4	18,6	18,7	22,4	25,7	29,3	31,8	33,8
CHAMICAL AERO	Temperatura mínima (°C)	20,6	19,5	18,0	14,3	10,2	6,5	5,0	7,5	10,9	15,0	17,8	19,6
CHAMICAL AERO	Humedad relativa (%)	58,3	62,6	67,3	69,0	70,3	68,2	60,2	49,7	46,5	48,3	50,7	53,5
CHAMICAL AERO	Velocidad del Viento (km/h) (2011-2020)	8,4	6,9	6,2	5,0	4,3	4,1	4,1	6,0	8,2	10,1	9,9	8,8
CHAMICAL AERO	Nubosidad total (octavos)	3,5	3,7	3,7	3,8	3,9	3,5	2,7	2,2	2,5	2,9	3,1	3,2
CHAMICAL AERO	Precipitación (mm)	93,4	88,3	67,2	27,6	10,2	3,4	3,2	2,7	7,8	28,1	45,5	82,7
CHAMICAL AERO	Frecuencia de días con Precipitación superior a 1.0 mm	5,8	5,3	5,2	3,1	1,9	0,7	0,6	0,4	1,4	2,5	4,0	5,6

Anexo 8.1. Especificaciones técnicas Standard Model 760 Tub Grinder-Rotogrind**Roto Grind – technical data**

Parameter	Value
Weight (without electromotor and hydraulic unit):	1 660 kg
Length:	4 400 mm
Height (without blow):	2 600 mm
Height (with long blow):	2 850 mm
Width (without blow):	2 880 mm
Width (with blow):	3 200 mm
Tub depth:	1 300 mm
Number of hammers :	6×1 pcs heavy weight hammers, or 6×4 pcs light weight hammers
Number of counter knives (plates):	5 pcs
Length of grinded material :	adjustable: between 4 and 15 cm depending on material
Grinding capacities:	Variable (see Capacities)

Material	Engine power		Coarse	Medium	Fine
	HP	kW			
Dry alfalfa and straw	70-90	52-67	12-20	8-15	5-12
	90-125	67-93	15-25	12-20	10-16
	125-150	93-112	22-44	20-36	18-30
	>150	>112	28-50	24-40	20-34
Grasses, cane, corn stalk, tough or wet hay	70-90	52-67	12-20	8-15	5-12
	90-125	67-93	15-25	12-20	10-16
	125-150	93-112	22-44	20-36	18-30
	>150	>112	28-50	24-40	20-34
Ear Corn				Medium	Fine
	70-90	52-67		8-18	5-15
	90-125	67-93		10-20	10-15
	125-150	93-112		15-30	15-25
	>150	>112		20-34	20-30
Shelled Corn, Dry or High Moisture	70-100	52-75		12-20	
	100-135	75-100		15-30	
	>135	>100		20-45	

Anexo 8.2. Ficha técnica del agitador sumergible línea Flygt 4200**RENDIMIENTO - FLYGT SERIE 4200**

	Flygt 4220				Flygt 4230				
Potencia nominal 50/60 Hz, kW (hp)	1,1 (1,5)	1,5 (2,0)	2,2 (3,0)	3,0 (4,0)	2,2 (3,0)	3,0 (4,0)	4,0 (5,5)	5,5 (7,5)	7,3 (10,0)
Velocidad de la hélice, rpm	variable, hasta 800				variable, hasta 290				
Empuje máximo, N*									
370 mm (14,5 pulg.), hélice	380	510	670	790	-	-	-	-	-
580 mm (22,8 pulg.), hélice	440	670	870	-	-	-	-	-	-
770 mm (30,3 pulg.) hélice	-	-	-	-	960	1.240	1.710	2.080	2.470
Eficiencia máxima, N/kW*									
370 mm (14,5 pulg.), hélice	530	530	530	450	-	-	-	-	-
580 mm (22,8 pulg.), hélice	450	590	590	-	-	-	-	-	-
770 mm (30,3 pulg.), hélice	-	-	-	-	670	670	760	760	760

*De acuerdo con ISO 21630:2007 y en función de la configuración del producto

Anexo 8.3. Ficha técnica gasómetro EPDM

Espesor de la membrana, mm:	2
Resistencia a la tracción, MPa:	9,3
Alargamiento a la rotura, %:	540
Resistencia a la temperatura, ° C:	de -40 a +100
Permeabilidad al gas, cm³/(m² * d * bar):	<500
Diámetro	desde 10 y hasta 33 m

Diámetro del digestor, m	Altura del techo, m	Volumen utilizable, m ³	Precio, EUR
10	2	67	20 800
11	2,2	88	21 600
12	2,4	113	22 200
13	2,6	143	23 100
14	2,8	178	23 900
15	3	218	24 800
16	3,2	263	25 900
17	3,4	315	27 100
18	3,6	373	28 200
19	3,8	437	29 400
20	4	509	32 400
21	4,2	587	33 800

Anexo 8.4. Ficha técnica cogenerador J208- Jenbacher**Detalles técnicos**

Configuración	En línea
Diámetro interior (mm)	135
Carrera (mm)	145
Desplazamiento/cilindro (l)	2,08
Velocidad (rpm)	1500 (50 Hz) 1800 (60 Hz)
Velocidad media del pistón (m/s)	7,3 (1500 l/min) 8,7 (1800 l/min)
Alcance de suministro	Grupo electrógeno, sistema de cogeneración, grupo electrógeno/cogeneración en contenedor
Tipos de gas aplicables	Gas natural, gas de venteo, propano, biogás, gas de vertedero, gas de aguas residuales
Tipo de motor	J208
Núm. de cilindros	8
Desplazamiento total (l)	16,6

Dimensiones L x An x Al (mm)

Grupo electrógeno	4900 x 1700 x 2000
Sistema de cogeneración	4900 x 1700 x 2000
Contenedor de 40 pies	12 200 x 2500 x 2600

Peso vacío (kg)

Grupo electrógeno	6000
Sistema de cogeneración	6700

Capacidades y eficiencias

Gas natural		1500 l/min 50 Hz					1800 l/min 60 Hz				
NO _x <	Tipo	Pel (kW) ¹	Pth (kW) ²	ηel (%) ¹	ηth (%) ²	ηtot (%)	Pel (kW) ¹	Pth (kW) ²	ηel (%) ¹	ηth (%) ²	ηtot (%)
500 mg/m ³ _N	J208	300	391	39,1	50,9	90,0					
	J208	330	352	39,4	42,1	81,5	335	393	37,4	43,9	81,3
250 mg/m ³ _N	J208	294	363	37,6	46,4	84,1	335	410	36,5	44,6	81,1

Biogás		1500 l/min 50 Hz					1800 l/min 60 Hz				
NO _x <	Tipo	Pel (kW) ¹	Pth (kW) ²	ηel (%) ¹	ηth (%) ²	ηtot (%)	Pel (kW) ¹	Pth (kW) ²	ηel (%) ¹	ηth (%) ²	ηtot (%)
500 mg/m ³ _N	J208	330	394	39,2	46,8	86,1	335	388	36,5	42,2	78,7
	J208	249	289	39,7	46,1	85,8					
250 mg/m ³ _N	J208	330	414	38,2	47,9	86,0					

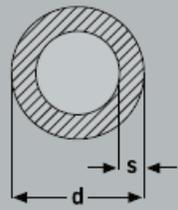
Anexo 8.5. Catálogo tubos de acero inoxidable

Tubos diámetro exterior con costura (Stainless steel welded tubes)

TP 304 - 304L - 316L - Según Norma ASTM A269 - A249 - A270

Diámetro ext. (d)		Espesor de Pared (s)		Terminación Decapado, superficie lisa. Pulido gritt 180 Pulido gritt 400 Pulido interior sanitario por solicitud. Aplicación Intercambiadores de calor. Conducción de fluidos, industria farmacéutica, alimenticia, etc. Largo estándar: 6000mm. Consultar por otros diámetros, espesores y largos especiales.
Pulg	mm.	1.5	2.0	
1"	25.4	0.901	1.176	
1"1/4	31.7	1.140	1.495	
1"1/2	38.1	1.330	1.815	
2"	50.8	1.659	2.453	
2"1/2	63.5	2.337	3.091	
3"	76.2	2.812	3.725	
4"	101.6	3.752	5.086	

Peso aprox. kg/mt.



Anexo 8.6. Propiedades del agua saturada (Cengel, 2011)

TABLA A-9

Propiedades del agua saturada

Temp., T °C	Presión de saturación, P _{sat} , kPa	Densidad, ρ kg/m ³		Entalpia de vaporización, h _{fg} , kJ/kg	Calor específico, c _p , J/kg · K		Conductividad térmica, k W/m · K		Viscosidad dinámica, μ kg/m · s		Número de Prandtl, Pr		Coeficiente de expansión volumétrica, β 1/K
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor			
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2 501	4 217	1 854	0.561	0.0171	1.792 × 10 ⁻³	0.922 × 10 ⁻⁵	13.5	1.00	-0.068 × 10 ⁻³
5	0.8721	999.9	0.0068	2 490	4 205	1 857	0.571	0.0173	1.519 × 10 ⁻³	0.934 × 10 ⁻⁵	11.2	1.00	0.015 × 10 ⁻³
10	1.2276	999.7	0.0094	2 478	4 194	1 862	0.580	0.0176	1.307 × 10 ⁻³	0.946 × 10 ⁻⁵	9.45	1.00	0.733 × 10 ⁻³
15	1.7051	999.1	0.0128	2 466	4 186	1 863	0.589	0.0179	1.138 × 10 ⁻³	0.959 × 10 ⁻⁵	8.09	1.00	0.138 × 10 ⁻³
20	2.339	998.0	0.0173	2 454	4 182	1 867	0.598	0.0182	1.002 × 10 ⁻³	0.973 × 10 ⁻⁵	7.01	1.00	0.195 × 10 ⁻³
25	3.169	997.0	0.0231	2 442	4 180	1 870	0.607	0.0186	0.891 × 10 ⁻³	0.987 × 10 ⁻⁵	6.14	1.00	0.247 × 10 ⁻³
30	4.246	996.0	0.0304	2 431	4 178	1 875	0.615	0.0189	0.798 × 10 ⁻³	1.001 × 10 ⁻⁵	5.42	1.00	0.294 × 10 ⁻³
35	5.628	994.0	0.0397	2 419	4 178	1 880	0.623	0.0192	0.720 × 10 ⁻³	1.016 × 10 ⁻⁵	4.83	1.00	0.337 × 10 ⁻³
40	7.384	992.1	0.0512	2 407	4 179	1 885	0.631	0.0196	0.653 × 10 ⁻³	1.031 × 10 ⁻⁵	4.32	1.00	0.377 × 10 ⁻³
45	9.593	990.1	0.0655	2 395	4 180	1 892	0.637	0.0200	0.596 × 10 ⁻³	1.046 × 10 ⁻⁵	3.91	1.00	0.415 × 10 ⁻³
50	12.35	988.1	0.0831	2 383	4 181	1 900	0.644	0.0204	0.547 × 10 ⁻³	1.062 × 10 ⁻⁵	3.55	1.00	0.451 × 10 ⁻³
55	15.76	985.2	0.1045	2 371	4 183	1 908	0.649	0.0208	0.504 × 10 ⁻³	1.077 × 10 ⁻⁵	3.25	1.00	0.484 × 10 ⁻³
60	19.94	983.3	0.1304	2 359	4 185	1 916	0.654	0.0212	0.467 × 10 ⁻³	1.093 × 10 ⁻⁵	2.99	1.00	0.517 × 10 ⁻³
65	25.03	980.4	0.1614	2 346	4 187	1 926	0.659	0.0216	0.433 × 10 ⁻³	1.110 × 10 ⁻⁵	2.75	1.00	0.548 × 10 ⁻³
70	31.19	977.5	0.1983	2 334	4 190	1 936	0.663	0.0221	0.404 × 10 ⁻³	1.126 × 10 ⁻⁵	2.55	1.00	0.578 × 10 ⁻³
75	38.58	974.7	0.2421	2 321	4 193	1 948	0.667	0.0225	0.378 × 10 ⁻³	1.142 × 10 ⁻⁵	2.38	1.00	0.607 × 10 ⁻³
80	47.39	971.8	0.2935	2 309	4 197	1 962	0.670	0.0230	0.355 × 10 ⁻³	1.159 × 10 ⁻⁵	2.22	1.00	0.653 × 10 ⁻³
85	57.83	968.1	0.3536	2 296	4 201	1 977	0.673	0.0235	0.333 × 10 ⁻³	1.176 × 10 ⁻⁵	2.08	1.00	0.670 × 10 ⁻³
90	70.14	965.3	0.4235	2 283	4 206	1 993	0.675	0.0240	0.315 × 10 ⁻³	1.193 × 10 ⁻⁵	1.96	1.00	0.702 × 10 ⁻³
95	84.55	961.5	0.5045	2 270	4 212	2 010	0.677	0.0246	0.297 × 10 ⁻³	1.210 × 10 ⁻⁵	1.85	1.00	0.716 × 10 ⁻³
100	101.33	957.9	0.5978	2 257	4 217	2 029	0.679	0.0251	0.282 × 10 ⁻³	1.227 × 10 ⁻⁵	1.75	1.00	0.750 × 10 ⁻³
110	143.27	950.6	0.8263	2 230	4 229	2 071	0.682	0.0262	0.255 × 10 ⁻³	1.261 × 10 ⁻⁵	1.58	1.00	0.798 × 10 ⁻³

Anexo 8.7. Factor de ensuciamiento IC

Fouling resistances for water in shell and tube heat exchangers (m²K/W)				
Temperature of heating medium	Up to 120°C		120–200°C	
Temperature of water	50°C		Over 50°C	
	Flow velocity		Flow velocity	
Cooling water	≤ 1 m/s	> 1 m/s	≤ 1 m/s	> 1 m/s
Seawater	0.00009	0.00009	0.00018	0.00018
Brackish water	0.00035	0.00018	0.00053	0.00035
Cooling tower and artificial spray pond:				
Treated make up	0.00018	0.00018	0.00035	0.00035
Untreated	0.00053	0.00053	0.00090	0.00075
City or well water	0.00018	0.00018	0.00035	0.00035
River water:				
Clean	0.00035	0.00018	0.00053	0.00035
Normal	0.00053	0.00035	0.00070	0.00053
Sewer	0.00141	0.00090	0.00175	0.00141
Muddy or silty water	0.00053	0.00035	0.00075	0.00053
Hard (over 250 ppm)	0.00053	0.00053	0.00090	0.00090
Engine jacket	0.00018	0.00018	0.00018	0.00018
Distilled or closed circle	0.00009	0.00009	0.00009	0.00009
Treated boiler feedwater	0.00018	0.00009	0.00018	0.00018
Boiler blowdown	0.00035	0.00035	0.00035	0.00035

Tabla 8.3 Factores de ensuciamiento para depósitos de suciedad

(Datos de J.M. Coulson y J.F. Richardson, 1977, Chemical Engineering, vol. 1, 3ª edn, Pergamon Press, Oxford)

Fuente del depósito	$F_e =$ Factor de ensuciamiento	
	$(W m^{-2} K^{-1})$	$(Btu ft^{-2} h^{-1} °F^{-1})$
Agua*		
Destilada	11000	2000
Mar	11000	2000
Río limpio	4800	800
Torre de enfriamiento sin tratar	1700	300
Manantial (dura)	1700	300
Vapor		
Buena calidad, libre de aceites	19000	3000
Líquidos		
Salmuera tratada	3700	700
Orgánicos	5600	1000
Combustibles	1000	200
Gases		
Aire	2000-4000	300-700
Vapores de disolventes	7000	1300

*Velocidad $1 m s^{-1}$; temperatura inferior a 320 K.

Anexo 8.8. Tabla propiedades de materiales de construcción (Cengel, 2011)**TABLA A-5**

Propiedades de materiales de construcción (conclusión)
(a una temperatura media de 24°C)

Material	Espesor, L mm	Densidad, ρ kg/m ³	Conductividad térmica, k W/m · K	Calor específico, c_p kJ/kg · K	Valor R (para los espesores de la lista, L/k), K · m ² /W
Material para techos					
Tejas de asbesto-cemento		1 900	—	1.00	0.037
Asfalto en rollos		1 100	—	1.51	0.026
Tejas de asfalto		1 100	—	1.26	0.077
Techado incorporado	10 mm	1 100	—	1.46	0.058
Pizarra	13 mm	—	—	1.26	0.009
Tejas de madera (simples o con cara de plástico/película)		—	—	1.30	0.166
Materiales para revoque					
Revoque de cemento, agregado de arena	19 mm	1 860	0.72	0.84	0.026
Revoque de yeso:					
Agregado ligero	13 mm	720	—	—	0.055
Agregado de arena	13 mm	1 680	0.81	0.84	0.016
Agregado de perlita	—	720	0.22	1.34	—
Material para forro exterior (sobre superficies planas)					
Tejas de asbesto-cemento	—	1 900	—	—	0.037
Forro de tablero duro	11 mm	—	—	1.17	0.12
Forro de madera (rebajada)	25 mm	—	—	1.30	0.139
Forro de madera (contrachapada), traslapada	10 mm	—	—	1.21	0.111
Forro de aluminio o acero (sobre encofrado):					
Con respaldo hueco	10 mm	—	—	1.22	0.11
Con respaldo de tablero aislante	10 mm	—	—	1.34	0.32
Vidrio arquitectónico	—	2 530	1.0	0.84	0.018
Maderas					
Maderas duras (arce, roble, etc.)	—	721	0.159	1.26	—
Maderas suaves (abeto, pino, etc.)	—	513	0.115	1.38	—
Metales					
Aluminio (1 100)	—	2 739	222	0.896	—
Acero dulce	—	7 833	45.3	0.502	—
Acero inoxidable	—	7 913	15.6	0.456	—

Anexo 8.9. Especificaciones técnicas aireador Electrical Rs 17000

Características del producto

Características principales

Marca	RS
Modelo	17000
Voltaje	220V

Descripción

Aireador RS ELECTRICAL 17000

120 salidas

Salida de aire de 110 litros/minuto

Potencia: 60 W

HZ: 50 - 60 hz

Alimentación: 220v

Dimensiones: 28 x 19 x 19 cm.

Peso: 5.5 kg

Anexo 8.10. Especificaciones técnicas filtro de carbón

Conexión de gas DN, mm:	80, 100, 125
Volumen de carbón vegetal, m³:	0,4
Caudal, Nm³/h:	160
Diámetro y altura, mm:	800 x 1.800

Anexo 8.11. Especificaciones técnicas deshumidificador por condensación MDU 150-Vosmik Engineering

Table of technical parameters		Biogas dryer / Dehumidifier type MDU		
General parameters		MDU 150	MDU 300	MDU 600
Overall dimensions (W x H x D)	mm		3000 x 1445 x 2300	3000 x 1445 x 2300
Gas flow	Nm ³ /hod	150	300	600
Max. working pressure of gas	kPa	4,5	4,5	5
Heat Exchanger unit Nr.	pcs	1	1	1
Material of gas piping (variant)	-	1.4541	1.4541	1.4541
Size of connections - input/output		DN200 / DN125	DN250 / DN125	DN300 / DN125
Flange type		EN 1092-4/PN10/DN.../02+32 B1/ Alu + 1.4541		
Weight total	kg	836	856	1127
Cooling unit – heat pump				
Cooling power	kW	8	16	33,5
Refrigerant – internal cooling circle		R407c		
Max. working pressure	kPa	2,5MPa		
Control system (producer)		Siemens		
Way of cooling power control	%	10-100% proportional		
Fans – air power	m ³ /h	3000	6000	12000
Ambient temperature	°C	-30 / +35		
Manual control of back flow		YES	YES	YES
Coolant - secondary circuit		propylene glycol - water 50%		
Temperature of cooled medium input	°C	8	8	8
Temperature of cooled medium output	°C	2	2	2
Pump - external pressure	kPa	30	30	50
Weight of cooling unit	kg	295	295	570
Electrical supply power of pump	kW	0,22	0,22	0,22
Electric installation				
Power supply		3/N/PE/AC 400/230V, 50Hz TN-S		
Maximum power consumption	kW	9,6	9,6	19,6
Maximum current	A	17,4	17,4	36,4
Connection cable type		CYKY-J 5x4	CYKY-J 5x4	CYKY-J 5x10
Fuse, characteristics of circuit breakers		character.C A20	character.C A20	character.C A40

Anexo 8.12. Especificaciones técnicas antorcha quemadora de gas abierta FAI 65-450

Conexión de gas DN:	65 mm
Presión de funcionamiento:	2 - 40 mbar
Velocidad de flujo:	5.5 - 254 Nm ³ / h

Anexo 8.13. Especificaciones técnicas del separador de tornillo Horizontal H1-150-2-SEPCOM

Throughput Range in m ³ /h*					
TYPE	input Dry Matter %	SCREEN MESH WIDTH (mm)			
		0.25	0.50	0.75	0.90
H1-150-2	1-3	4-7	6-10	7-12	9-15
	4-6	2-3	3-5	4-5	4-6
	7-9	1-2	2-3	3-4	4-5
	10-12	1-2	1-2	2-3	3-4
H1-260-2	1-3	10-25	16-35	20-40	25-45
	4-6	7-12	10-18	12-20	14-20
	7-9	4-5	6-8	8-10	9-12
	10-12	2-3	3-6	6-7	6-8
H1-260-3	1-3	15-40	20-50	30-60	35-65
	4-6	10-20	12-25	18-28	20-30
	7-9	6-7	9-12	12-15	13-18
	10-12	3-4	4-9	7-10	9-12

Output Dry Matter for separated solid and separated liquid can vary depending on the specific application.

* Values measured in standard operating conditions. Results may differ depending on type of material treated, fiber content and viscosity. Information and illustrations are not binding.

Anexo 8.14. Especificaciones técnicas bomba sumergible DRV 1100-Motorarg**Descripción del producto**

La línea de electrobombas sumergibles portátiles para desagote pluvial "DRV", brinda una óptima prestación hidráulica en el bombeo de aguas sucias o cargadas con sólidos en suspensión hasta 35 mm de diámetro debido a su sistema VORTEX. Es apta para el bombeo en sumideros, desagües pluviales, garajes, sótanos, piscinas, etc., sumergiéndola directamente en el lugar a desagotar.

Características

- Cuerpo bomba en hierro fundido
- Impulsor de hierro fundido VORTEX
- Eje de acero inoxidable
- Doble sello mecánico de Carburo de Silicio.
- Interruptor flotante de nivel incorporado (en monofásicos)
- Motor aislación clase F – IP 58
- Cumplen con las normas de seguridad eléctrica internacionales IEC

Condiciones de uso

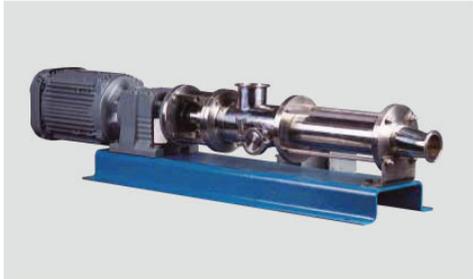
- Temperatura del fluido hasta + 35°C
- Máximo nivel de profundidad bajo el agua hasta 5 metros
- Sumergencia mínima 400 mm
- Agua con sólidos en suspensión hasta Ø 35 mm



TABLA DE PRESTACION – 50 Hz – 2900 vpm

MODELOS	Pot. HP	Altura manométrica (metros)								Pasaje de Sólidos (Ø mm)	Boca de descarga	In (Amp)	Capacitor (µF)	Peso (kg)
		3	4	5	6	7	8	9	10					
DRV 1100 M	1,5	20	17,7	15	11,9	8,2	3,5	Caudal (m³/h)		35	2"	8	30µF-400V	21,5
DRV 1100 T	1,5	20	17,7	15	11,9	8,2	3,5			35	2"	5	--	21,5

Los datos de caudales y alturas respetan las tolerancias de fabricación de la Norma Internacional ISO 2548 Clase C

Anexo 8.15. Especificaciones técnicas bomba de tornillo helicoidal JT 35-6-J1 Pumps**MODELO JT 35-6**

Caudal 28 m3 Hora

Presión de Trabajo 6 BAR

Viscosidad Admisible Hasta 1.000.000Cps

Manejo de Sólidos Rígidos Máx 25mm

Auto-cebado desde seco 4-5 Metros

Potencia de motor 10 HP

Tensión de Alimentación Trifásica 380V

Tipo de conexiones Clamp - Danesa - Roscada

Anexo 8.16. Especificaciones técnicas bomba centrífuga Zeta 5-Czerweny

CARACTERÍSTICAS

Marca: **Czerweny**
 Modelo: **ZETA-5T**

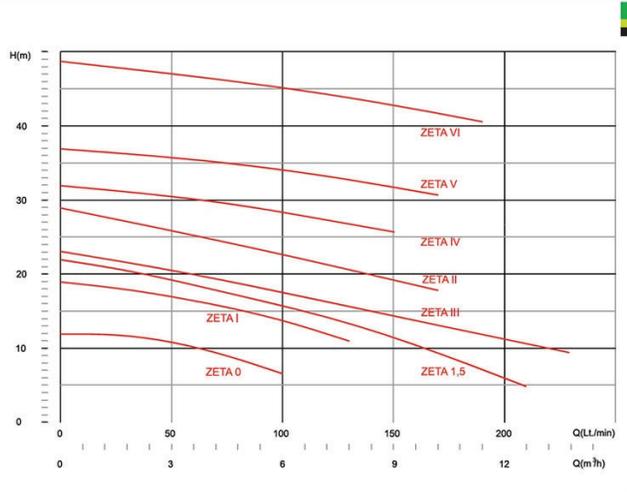
- Tensión: 380 V.
- Consumo: 6,8 A.
- Potencia: 2,5 HP.
- Altura max.: 36,2 m.
- Caudal max.: 12000 L/h.
- Succión max.: 7 m.
- Entrada: 1 1/4".
- Salida: 1".
- Protección: IP44.
- Peso: 25,7 kg.

Garantía: 3 años.






RENDIMIENTO






Anexo 9.1. Tasas depósitos a plazos fijos en dólares Banco Nación Argentina a Marzo 2025

DEPÓSITOS A PLAZOS FIJOS EN DÓLARES ESTADOUNIDENSES				
Tasas por Sucursal			Tasas Canal electrónico	
Mínimo U\$S 100 - en adelante			Mínimo U\$S 100 - en adelante	
Rango de Plazo (días)	TNA	TEA	TNA	TEA
De 30 a 59	0,75%	0,75%	1,00%	1,00%
De 60 a 89	1,00%	1,00%	1,25%	1,26%
De 90 a 179	1,25%	1,26%	1,50%	1,51%
De 180 a 364	2,00%	2,01%	2,50%	2,52%
De 365 a 370	2,25%	2,25%	3,00%	3,00%

Anexo 10. Planos de ingeniería básica de la planta de biogás para el establecimiento Granja Chepes

Plano 01: Vista en planta.

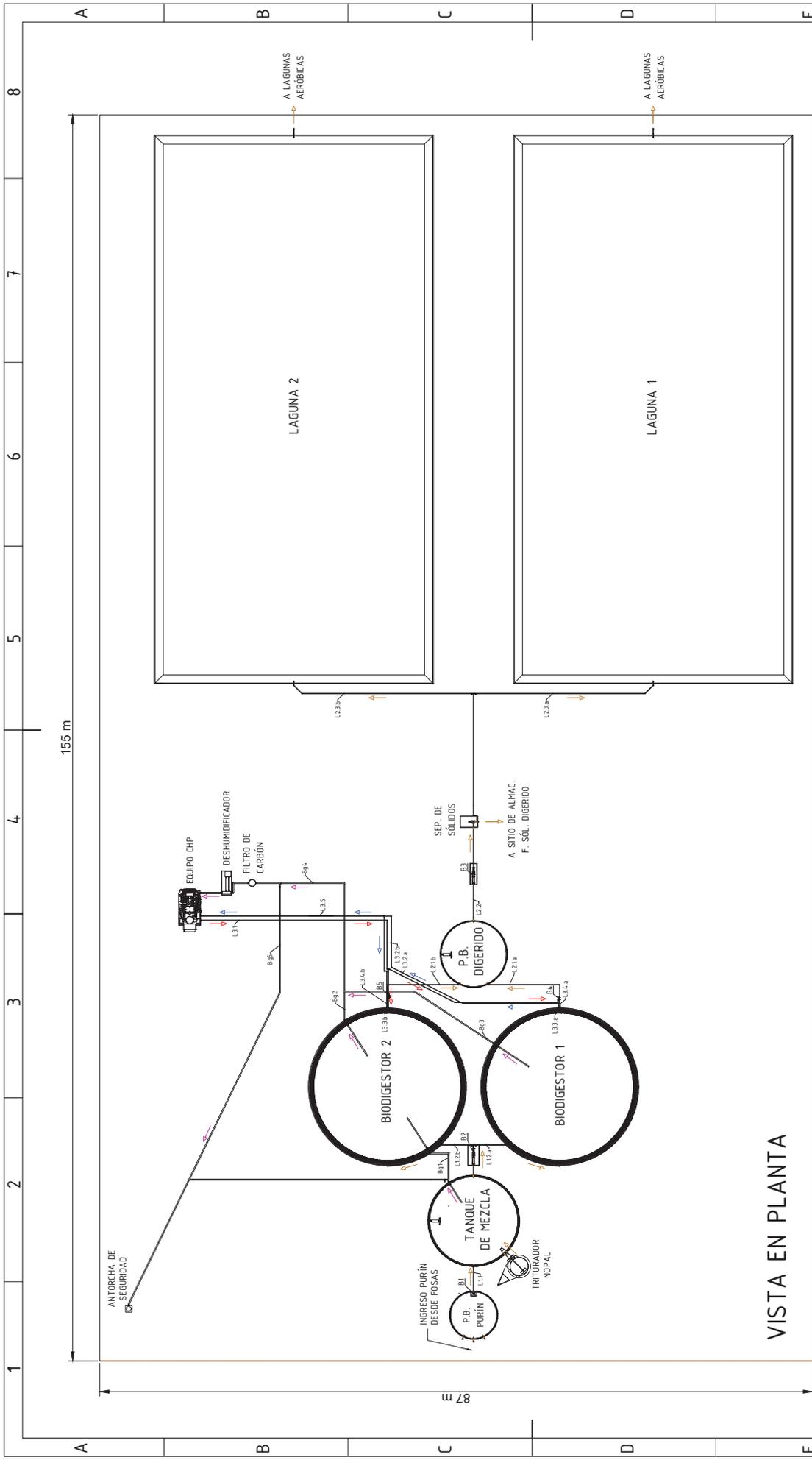
Plano 02: Vista en corte de la planta y perfil hidráulico.

Plano 03: Vistas tanque de mezcla.

Plano 04: Vistas biodigestor.

Plano 05: Vistas pozo de bombeo del digerido.

Plano 06: Vistas laguna.



VISTA EN PLANTA

BOMBAS	
Denominación	Potencia
B1	1.5 HP
B2	10 HP
B3	10 HP
B4	2.5 HP
B5	2.5 HP

SUSTRATO/DIGERIDO	
AGUA CALIENTE IC	
AGUA FRÍA IC	
BIOGÁS	

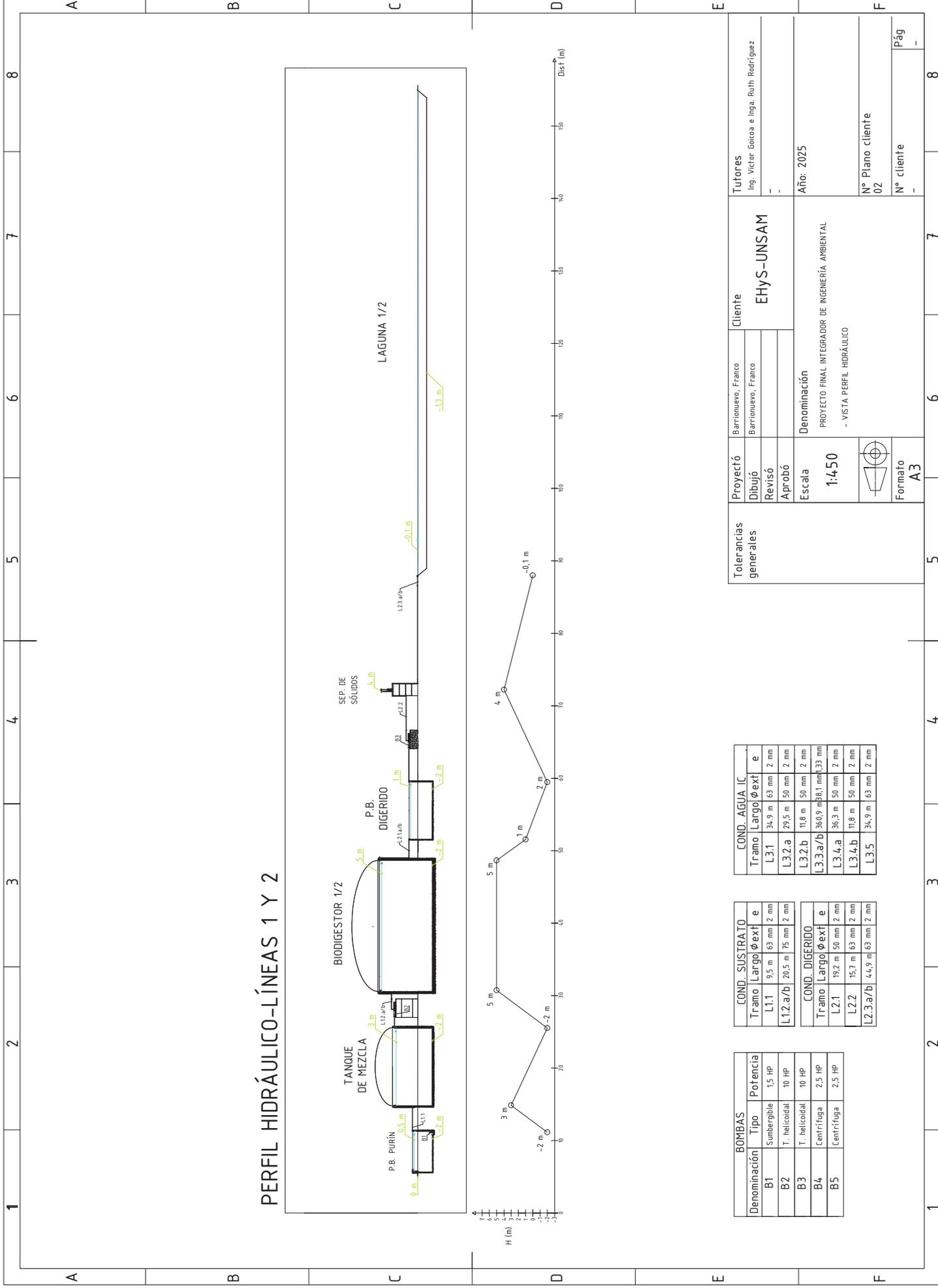
COND. SUSTRATO			
Tramo	Largo	Ø ext	e
L1.1	9.5 m	63 mm	2 mm
L1.2.a/b	20.5 m	75 mm	2 mm

COND. DIGERIDO			
Tramo	Largo	Ø ext	e
L2.1	19.2 m	50 mm	2 mm
L2.2	15.7 m	63 mm	2 mm
L2.3.a/b	44.9 m	63 mm	2 mm

COND. AGUA IC			
Tramo	Largo	Ø ext	e
L3.1	34.9 m	63 mm	2 mm
L3.2.a	29.5 m	50 mm	2 mm
L3.2.b	11.8 m	50 mm	2 mm
L3.3.a/b	360.9 m	81.1 mm	1.33 mm
L3.4.a	36.3 m	50 mm	2 mm
L3.4.b	11.8 m	50 mm	2 mm
L3.5	34.9 m	63 mm	2 mm

COND. BIOGÁS		
Denominación	Conexión	Observ.
Bg1	T. mezcla a biogestor 2	Materiales recomendados
Bg2	Biogestor 2 a confluencia	- T. largos 10 m a 5 m a 0.5 m a 0.5 m
Bg3	Biogestor 1	
Bg4	Confluencia a F. Sól. Digerido	
Bg5	A antorchas de seguridad	

Tolerancias generales		Proyector		Tutores	
Dibujo	Revisó	Barrionuevo, Franco	Barrionuevo, Franco	Ing. Victor Goicoa e Inga. Ruth Rodríguez	
Aprobó		Cliente		EHyS-UNSAM	
Escala		Denominación		Año: 2025	
1:450		PROYECTO FINAL INTEGRADOR DE INGENIERÍA AMBIENTAL		Nº Plano cliente	
		- VISTA EN PLANTA		01	
Formato		Formato		Nº cliente	
A3		A3		-	
				Pág	
				-	
				8	



PERFIL HIDRÁULICO-LÍNEAS 1 Y 2

BOMBAS		
Denominación	Tipo	Potencia
B1	Sumergible	1,5 HP
B2	T. helicoidal	10 HP
B3	T. helicoidal	10 HP
B4	Centrífuga	2,5 HP
B5	Centrífuga	2,5 HP

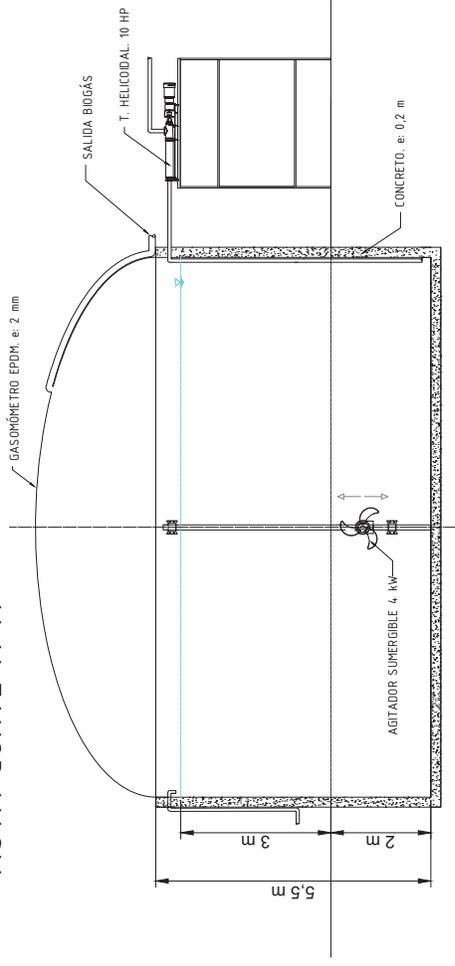
COND. SUSTRATO		
Tramo	Largo	Φ ext e
L1.1	9,5 m	63 mm 2 mm
L1.2.a/b	20,5 m	75 mm 2 mm

COND. DIGERIDO		
Tramo	Largo	Φ ext e
L2.1	19,2 m	50 mm 2 mm
L2.2	15,7 m	63 mm 2 mm
L2.3.a/b	44,9 m	63 mm 2 mm

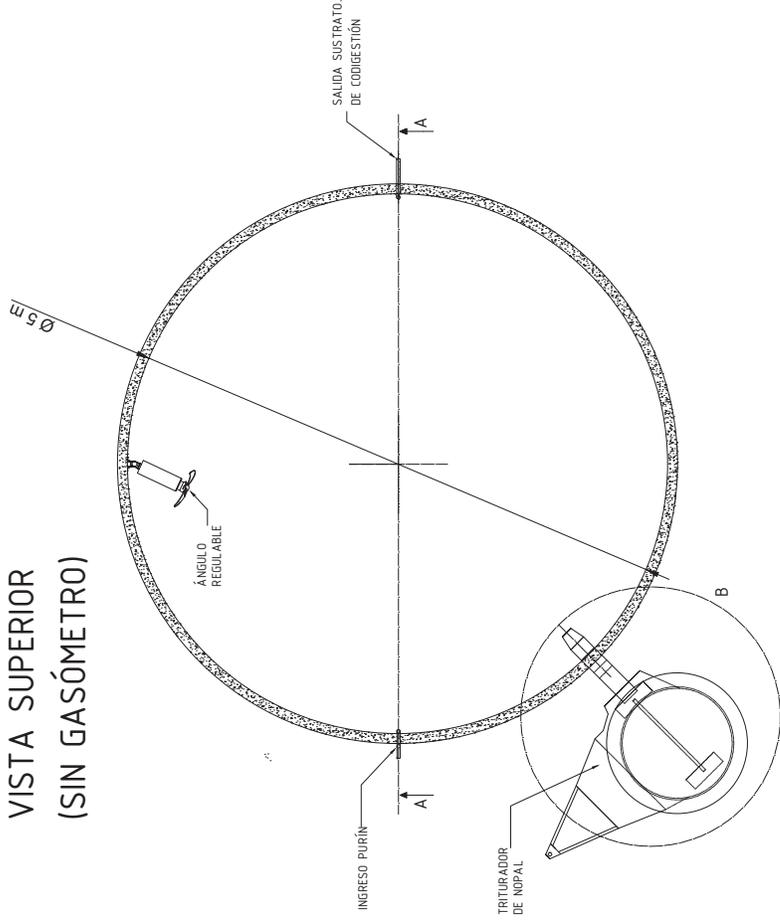
COND. AGUA IC		
Tramo	Largo	Φ ext e
L3.1	34,9 m	63 mm 2 mm
L3.2.a	29,5 m	50 mm 2 mm
L3.2.b	11,8 m	50 mm 2 mm
L3.3.a/b	360,9 m	88,1 mm 33 mm
L3.4.a	36,3 m	50 mm 2 mm
L3.4.b	11,8 m	50 mm 2 mm
L3.5	34,9 m	63 mm 2 mm

Tolerancias generales		Proyctó		Cliente		Tutores	
		Dibujó	Barrionuevo, Franco	EHYS-UNSAM		Ing. Victor Goicoa e Inga. Ruth Rodríguez	
		Revisó	Barrionuevo, Franco				
		Aprobó					
		Escala	Denominación			Año: 2025	
		1:450	PROYECTO FINAL INTEGRADOR DE INGENIERÍA AMBIENTAL				
			- VISTA PERFIL HIDRÁULICO				
		Formato A3			Nº Plano cliente		Pág
					02		-
					Nº cliente		-
							8

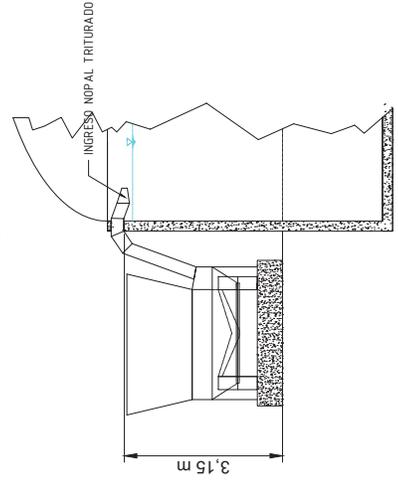
VISTA CORTE A-A



VISTA SUPERIOR (SIN GASÓMETRO)

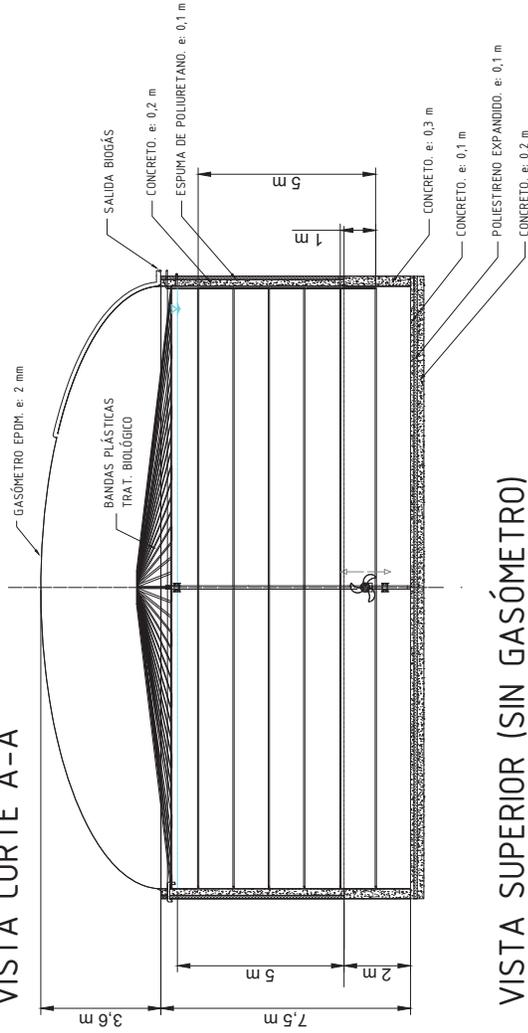


VISTA DETALLE B INGRESO NOPAL

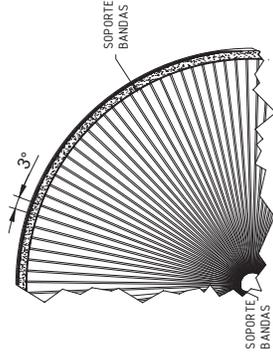


Tolerancias generales	Proyectó	Barrionuevo, Franco	Cliente	EHYS-UNSAM	Tutores	Ing. Victor Goicoa e Inga. Ruth Rodriguez
	Dibujó	Barrionuevo, Franco				
	Revisó					
	Aprobó					
Escala	Denominación	PROYECTO FINAL INTEGRADOR DE INGENIERIA AMBIENTAL - VISTAS TANQUE DE MEZCLA			Año:	2025
	1:100			Nº Plano cliente	03	
		Formato	A3	Nº cliente		Pág

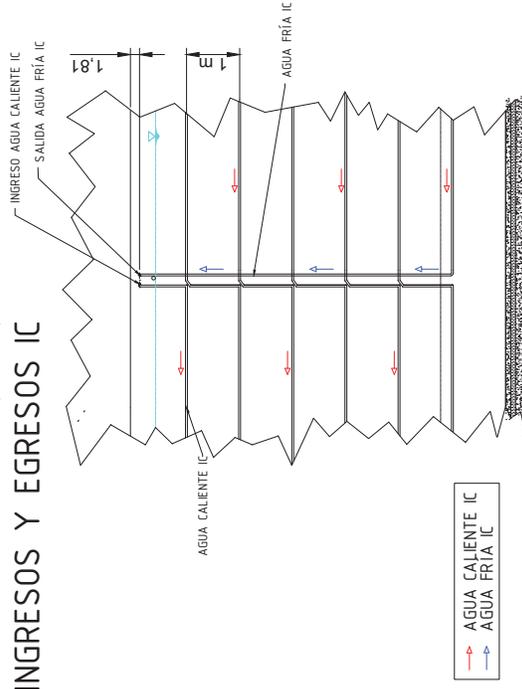
VISTA CORTE A-A



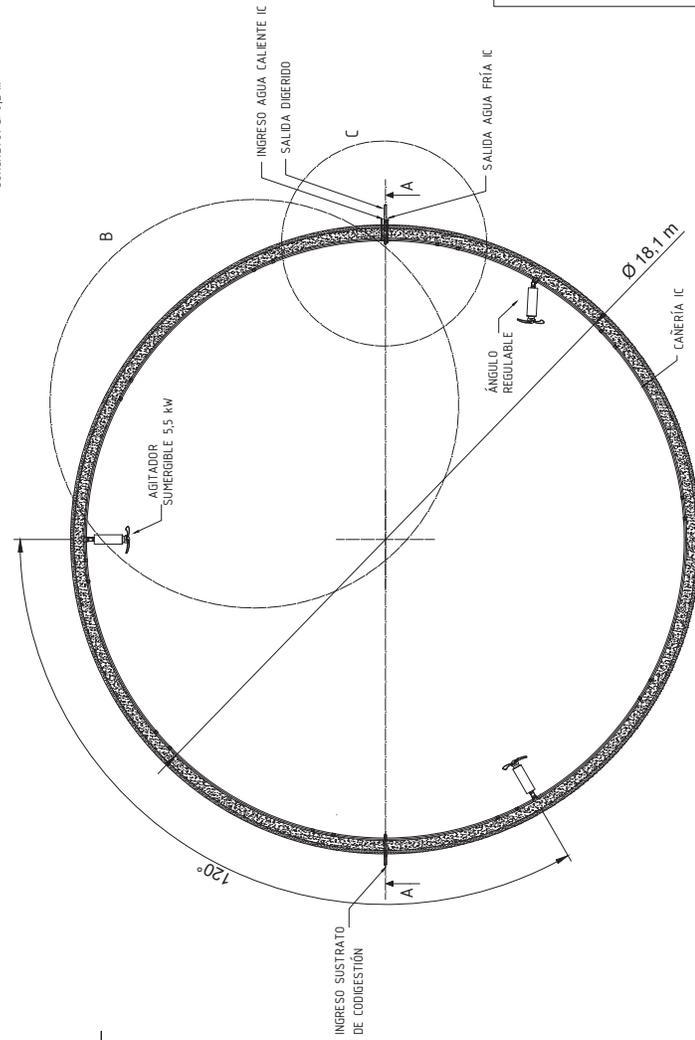
VISTA DETALLE B (1:200) TRAT. BIOLÓGICO



VISTA DETALLE C (1:100) INGRESOS Y EGRESOS IC

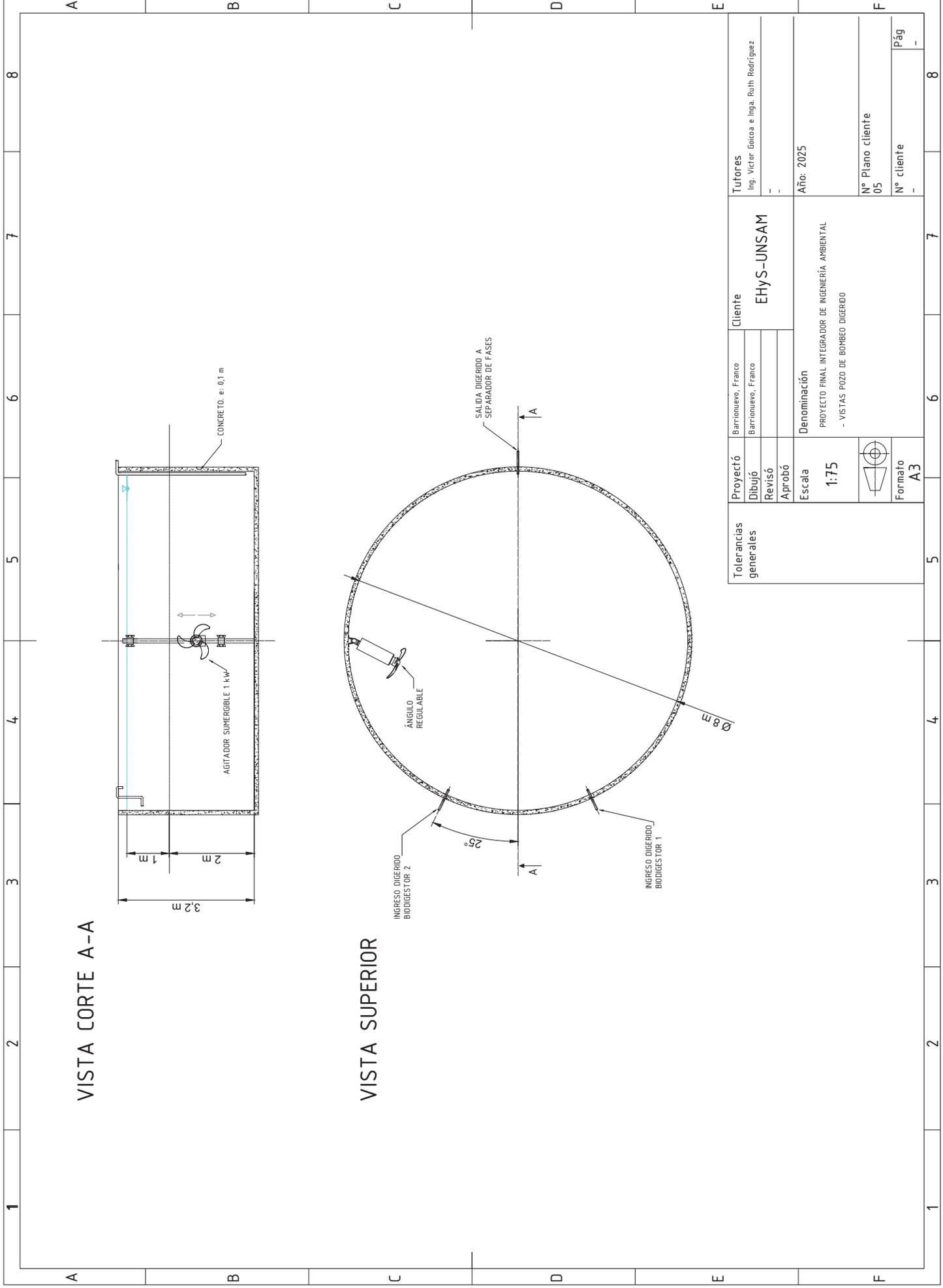


VISTA SUPERIOR (SIN GASÓMETRO)



Tolerancias generales	Proyectó	Cliente	Tutores
	Dibujó	Barrionuevo, Franco	Ing. Victor Guicoa e Inga. Ruth Rodríguez
	Revisó	Barrionuevo, Franco	
	Aprobó		
	Escala	Denominación	Año: 2025
	1:150	PROYECTO FINAL INTEGRADOR DE INGENIERIA AMBIENTAL - VISTAS BIODIGESTOR (1 Y 2)	
	Formato A3		

Nº Plano cliente	Pág
04	-
Nº cliente	-
	8



Tolerancias generales	Proyectó	Barrionuevo, Franco	Cliente	EHYS-UNSAM	Tutores	Ing. Victor Goicoa e Inga. Ruth Rodríguez	
	Dibujó	Barrionuevo, Franco				-	
	Revisó					-	
	Aprobó					-	
Escala	1:75	Denominación	Año: 2025				
		PROYECTO FINAL INTEGRADOR DE INGENIERÍA AMBIENTAL					
		- VISTAS POZO DE BOMBEO DIGERIDO					
Formato	A3	Nº Plano cliente	05	Nº cliente	-	Pág	-

1 2 3 4 5 6 7 8

A A

B B

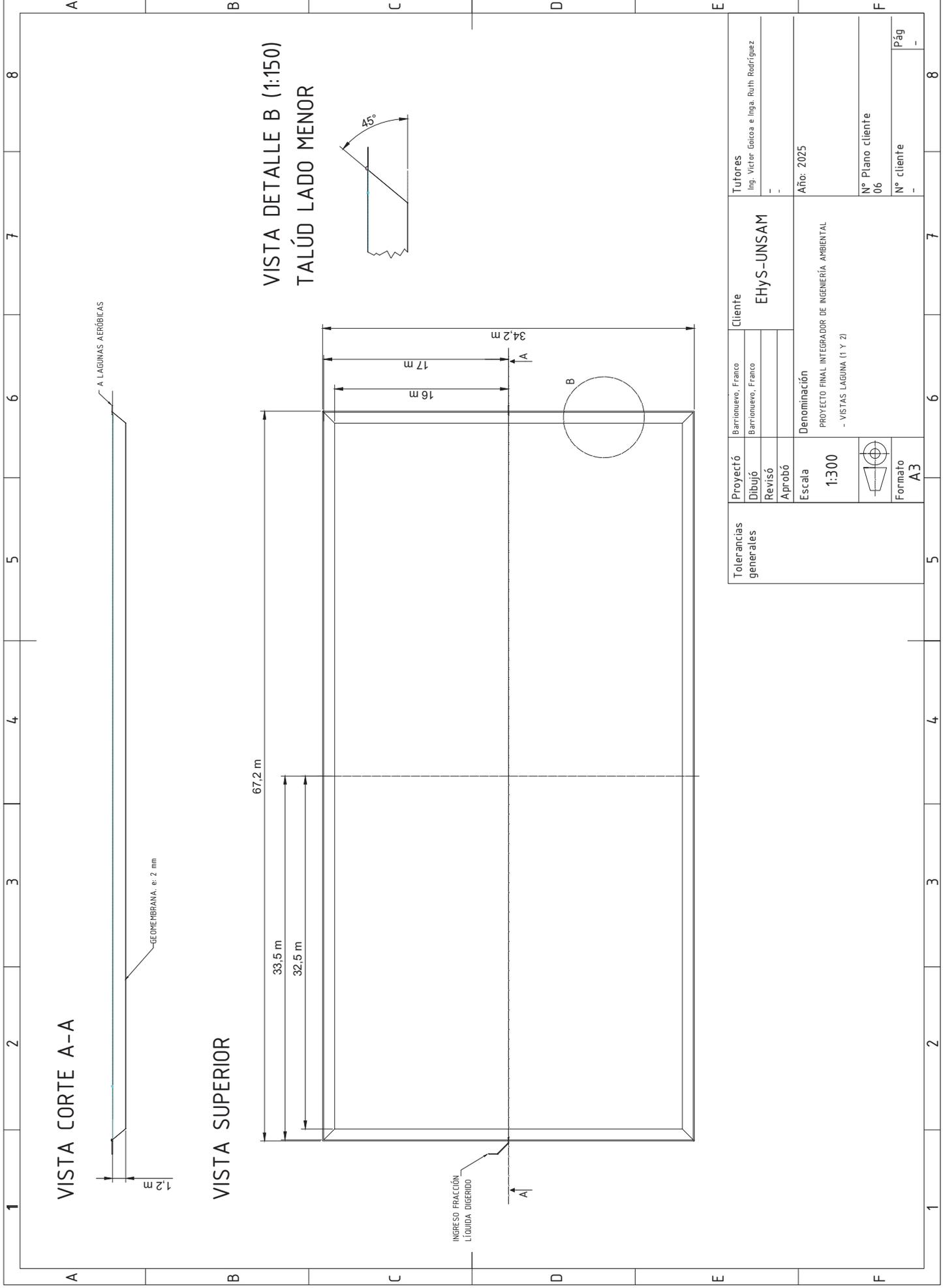
C C

D D

E E

F F

1 2 3 4 5 6 7 8



VISTA CORTE A-A

VISTA SUPERIOR

VISTA DETALLE B (1:150)
TALÚD LADO MENOR

Tolerancias generales	Proyectó	Barrionuevo, Franco	Cliente EHYS-JNSAM	Tutores Ing. Víctor Goicoa e Inga. Ruth Rodríguez
	Dibujó	Barrionuevo, Franco		
	Revisó			
	Aprobó			
Escala 1:300	Denominación	PROYECTO FINAL INTEGRADOR DE INGENIERÍA AMBIENTAL - VISTAS LAGUNA (1 Y 2)		
	Formato A3	Año: 2025		
		Nº Plano cliente 06	Nº cliente	Pág