



Pontificia Universidad Católica Argentina

Santa María de los Buenos Aires

Facultad de Ingeniería y Ciencias Agrarias

Solución Integral a la Disposición de Residuos Orgánicos en Unilever de Argentina S.A. Planta Pilar – Buenos Aires

Trabajo Final de Ingeniería Ambiental

Nicolás Lassalle

Director de Carrera: Pablo Buscemi

Tutor Académico: Álvaro Sanchez Granel

Número de Registro: 15-152027-9

Fecha: Diciembre 2023

Índice

Tema del Trabajo Final	5
Introducción	5
Objetivo del Trabajo Final	6
Objetivos específicos	6
Alcance del Trabajo Final.....	7
Límites del Trabajo Final.....	7
Marco Referencial	8
Política Ambiental de Unilever	8
Marco Teórico	11
Proceso de obtención de biogás a través de un biodigestor anaeróbico	11
Tipos de biodigestores.....	13
Obtención de biogás.....	15
Digerido del biodigestor	18
Marco Legal	20
Caso de estudio	25
Caracterización de los Residuos	25
Tratamiento Integral de los Residuos Orgánicos.....	28
Potencial de generación de biogás.....	30
Dimensionamiento del Biodigestor In Situ	40
Caudal de diseño	41
Dimensiones del tanque de ecualización	42
Dimensiones del biodigestor	42
Dimensiones del tanque de almacenamiento de digestato.....	44
Dimensiones del purificador del biogás	45
Dimensiones del área de compostaje	47
Sistema de calefacción del biodigestor	49
Dimensionamiento hidráulico	53

Impacto Ambiental.....	57
Consumo de recursos	59
Generación de residuos.....	60
Contaminación del suelo y agua.....	61
Contaminación del aire	62
Impacto en la Seguridad e Higiene.....	64
Impacto Económico	66
Costos asociados	67
Beneficios asociados.....	69
Análisis de la relación Costo-Beneficio.....	71
Conclusión	72
Referencias	74
Anexo 1.....	79
Anexo 1.a: Cálculo teórico de generación de biogas	79
Anexo 1.b: Cálculo del caudal del biodigestor	80
Anexo 1.c: Cálculo de las dimensiones del tanque de ecualización.....	82
Anexo 1.d: Cálculo de las dimensiones del biodigestor	83
Anexo 1.e: Cálculo de las dimensiones del tanque de almacenamiento de digestato	87
Anexo 1.f: Cálculos para la depuración de vapor de agua del biogás.....	88
Anexo 1.g: Cálculos para la depuración de ácido sulfhídrico del biogás.....	89
Anexo 1.h: Calefacción del biodigestor	90
Anexo 1.i: Dimensionamiento del sistema de calefacción del biodigestor.....	95
Anexo 1.j: Dimensionamiento de la caldera eléctrica a utilizar	98
Anexo 2.....	100
Anexo 3.....	102
Anexo 3.a: Dimensionamiento del tramo A	102
Anexo 3.b: Dimensionamiento del tramo B	102
Anexo 3.c: Dimensionamiento de los tramos C, E y G	103

Anexo 3.d: Dimensionamiento del tramo D	104
Anexo 3.e: Dimensionamiento del tramo F.....	104
Anexo 3.f: Dimensionamiento del tramo H.....	105
Anexo 3.g: Dimensionamiento del tramo I.1 y I.2	105
Anexo 3.h: Pérdidas de carga	106
Anexo 4.....	111
Anexo 4.a: Bombas hidráulicas	111
Anexo 4.b: Sistema de mezclado o agitación	124

Tema del Trabajo Final

El trabajo final se centra en brindar una solución integral a los residuos orgánicos de una planta industrial de productos alimenticios.

Para lograr esto, se evaluará la factibilidad técnica y económica de implementar un biodigestor y se diseñarán las unidades necesarias para el tratamiento de los residuos orgánicos generados por Unilever Argentina fábrica Pilar.

Los residuos orgánicos que se generan en mayor volumen, y por lo tanto el foco del caso de estudio, son: las grasas que provienen de la planta de tratamiento de efluentes (obtenidas por acción de un desengrasador) y los residuos de las purgas que se realizan en las líneas a la hora de cambiar la producción de un producto por otro.

El objetivo principal del trabajo final consiste en transformar y valorizar un residuo en un recurso a partir de un biodigestor dentro del mismo predio donde se generan dichos residuos. El recurso que se desea aprovechar a partir del residuo es el biogás, el cual es una fuente de energía térmica renovable.

Introducción

Unilever es una empresa multinacional que fabrica bienes de consumo masivo, alcanza más de 100 países en los que radican más de 300 fábricas. Cada fábrica se encarga de la producción de diversos productos que conforman las marcas de Unilever: productos de cuidado personal (aseo personal, cuidado del pelo, higiene oral), productos de cuidado del hogar (líquidos y polvos para lavar la ropa, limpiadores de pisos y de otros elementos del hogar), productos alimenticios (deshidratados, aderezos, salsas), entre otros.

Unilever Argentina S.A. tiene actualmente 5 fábricas en el país: Planta Tortuguitas (localizada en la provincia de Buenos Aires), Planta Pilar (localizada en la provincia de Buenos Aires), Planta Mendoza (localizada en la provincia de Mendoza), Planta Rosario (localizada en la provincia de Santa Fe) y Planta Gualeguaychú (localizada en la provincia de Entre Ríos); cada una de estas fabrica productos de diferente índole.

La Planta Pilar de Unilever es una fábrica de alimentos que cuenta con dos naves productivas específicamente de caldos, sopas, almidón de maíz, aderezos y salsas. Está ubicada en el municipio de Fátima, Provincia de Buenos Aires, y cuenta con un área de aproximadamente 140.000 m².



Mapa 1 - Fábrica Pilar de Unilever Argentina S.A. ilustrada sobre una imagen de Google Maps (Google, s.f.)¹.

La planta mantiene un Sistema de Gestión Ambiental que establece la medición mensual de sus indicadores de impacto ambiental, permitiendo obtener datos de la generación de residuos de manera periódica e ininterrumpida. Esto permite tener claridad de las cantidades de residuos gestionadas y el costo de cada uno de los tratamientos; así como el impacto de los proyectos llevados a cabo.

Objetivo del Trabajo Final

El objetivo del trabajo final es brindar una solución integral a los residuos orgánicos de una planta industrial de productos alimenticios, estudiando la factibilidad técnica y económica de implementar un biodigestor para disminuir las mayores corrientes de residuos orgánicos, con la finalidad de obtener mejoras en los costos de tratamiento y disposición de residuos y en la generación y manejo de impactos ambientales negativos.

Objetivos específicos

Los objetivos específicos se describen a continuación:

- Caracterizar las corrientes de residuos de la fábrica de Unilever Pilar (en costos, cantidades y naturaleza).

¹ Recorte obtenido desde <https://goo.gl/maps/443JfMFk3UzFeBGt6>, mayo 2022.

- Estudiar las características fisicoquímicas de los residuos de interés para analizar la factibilidad técnica del biodigestor.
- Elaborar un diseño básico de un biodigestor (y sus componentes) aplicable a la planta industrial de Unilever Pilar.
- Analizar el potencial de generación de biogás y sus impactos ambientales en la fábrica de Unilever Pilar.
- Evaluar la factibilidad económica del proyecto.

Alcance del Trabajo Final

El alcance del trabajo final corresponde a un marco teórico práctico. En este se analizan ciertas características de los residuos generados en la fábrica Unilever Pilar en el laboratorio del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) para determinar, mediante la aplicación de fórmulas teóricas, la capacidad de generación de biogás. Las características analizadas fueron los sólidos totales, fijos y volátiles, la demanda química del oxígeno (DQO) y el pH.

Límites del Trabajo Final

Quedarán fuera del alcance del trabajo final:

- Análisis fisicoquímico de muestras compensadas en un período de tiempo determinado con la finalidad de que las muestras sean más representativas.
- Cálculo y definición de pérdidas de carga de accesorios tales como codos, válvulas, bombas, etc.
- Análisis de la calidad de la salida de efluentes líquidos generados en el proceso de la biodigestión.
- Análisis y optimización del consumo energético del soplador de aire para la zona de compostaje.

Se asumirán las siguientes suposiciones:

- Los ensayos realizados en las muestras durante el año 2020 seguirán representando la realidad actual de la fábrica, debido a que el proceso y los productos fabricados no han cambiado significativamente desde entonces.
- Las muestras fueron tomadas durante el mismo período de elaboración. En la realidad, las características fisicoquímicas del efluente dependen del tipo de elaboración, por lo que se asume la homogeneidad de sus características a lo largo del tiempo para el ensayo.
- Las impurezas que conforman el biogás, que no sean vapor de agua o ácido sulfhídrico, serán insignificantes y no se considerarán relevantes.

- La remoción de agua de la corriente de biogás obtenida será lo suficientemente completa como para considerarse despreciable en los cálculos posteriores.
- La pérdida de calor en las cañerías hacia y desde el biodigestor serán consideradas insignificantes.
- El efluente, una vez mezclado con el agua recirculada, se comportará físicamente como el agua. Se asume también el comportamiento físico del biogás como metano puro.
- Los filtros de vapor de agua y ácido sulfhídrico no provocarán cambios de presión significativos.
- La cantidad de empleados existente será suficiente para cubrir las actividades necesarias para que el biodigestor funcione correctamente.

Marco Referencial

Política Ambiental de Unilever

La política ambiental de Unilever destaca su compromiso con la sustentabilidad estableciendo que reducirá la cantidad de residuos generados o la cantidad de recursos utilizados por tonelada producida en sus operaciones a través de la mejora continua y del cumplimiento de estándares y objetivos dispuestos por Unilever Global. Tanto los objetivos como las metas asociados a la política ambiental han sido desarrollados de acuerdo con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de las Naciones Unidas (ODS) (Organización de las Naciones Unidas [ONU], 2023).

Los objetivos a corto plazo que deben cumplirse para llevar a cabo la política ambiental (Unilever, 2022a) están relacionados con los indicadores ambientales de cada fábrica y la mejora continua asociada a cada uno de ellos. Coordinados por el equipo de sustentabilidad regional, se desarrollan anualmente teniendo en cuenta: cualquier proyecto planeado para el año próximo, aumento o disminución de la capacidad de las líneas productivas, entre otros. El indicador ambiental en el cual se enfocará este análisis es el indicador de residuos.

Las métricas de residuos reportadas por las fábricas tienen el mismo alcance y unidades sin importar qué es lo que se produce en el lugar. El alcance se define como todo lo que conforma el sistema de gestión ambiental, que es el límite físico del predio en la mayoría de los casos.

Una vez definido el alcance, se determinará como residuo a toda sustancia sólida, semisólida o líquida que salga del límite del sistema de gestión ambiental; que esté relacionado a las operaciones productivas. Es decir, que quedará excluida de este indicador ambiental

cualquier sustancia generada como consecuencia de proyectos planificados de ampliación o reducción de las operaciones de la fábrica, así como los residuos generados por pruebas en las líneas de producción.

Los objetivos a mediano y largo plazo que deben cumplirse para llevar a cabo la política son conocidos en su conjunto como el “Unilever Compass” (Unilever, 2022b). Según el “Unilever Compass”, estos objetivos pueden ordenarse bajo tres ejes de trabajo: “Mejorar la salud del planeta”, “Mejorar la salud de las personas, su confianza y bienestar” y “Contribuir a un mundo justo y más socialmente inclusivo”. A su vez, cada uno de estos puede desagregarse en diferentes objetivos secundarios con sus respectivas metas y plazos de cumplimientos variados.

Aquellos objetivos y metas destinados a “Mejorar la salud del planeta”, o bien, aquellos estrictamente ambientales, pueden ordenarse como se ve en la siguiente ilustración:

Improve the health of the planet		
Climate action	Protect and regenerate nature	Waste-free world
Zero emissions in our operations by 2030	Deforestation-free supply chain in palm oil, paper and board, tea, soy and cocoa by 2023	50% virgin plastic reduction by 2025, including an absolute reduction of 100,000 tonnes
Net zero emissions across Scope 1, 2 and 3 emissions by 2039	Help protect and regenerate 1.5 million hectares of land, forests and oceans by 2030	25% recycled plastic by 2025
Halve greenhouse gas impact of our products across the lifecycle by 2030	100% sustainable sourcing of our key agricultural crops	Collect and process more plastic than we sell by 2025
Replace fossil-fuel derived carbon with renewable or recycled carbon in all our cleaning and laundry product formulations by 2030	Empower farmers and smallholders to protect and regenerate farm environments	100% reusable, recyclable or compostable plastic packaging by 2025
Share the carbon footprint of every product we sell	Implement water stewardship programmes in 100 locations in water-stressed areas by 2030	Halve food waste in our operations by 2025
	100% of our ingredients will be biodegradable by 2030	Maintain zero waste to landfill in our factories
Supported by: €1 billion Climate & Nature Fund		

Ilustración 1 - Objetivos y metas derivados del Compás de Unilever².

El objetivo que más desafía a las plantas productoras de alimentos de Unilever alrededor del mundo es “Un Mundo Libre de Residuos”. Este objetivo desprende diferentes objetivos secundarios y metas para su cumplimiento. Una de las metas más críticas bajo este objetivo es: “reducir a la mitad (respecto de 2019) los residuos de alimentos de las operaciones directas (de

² Recorte de The Unilever Compass [PDF], por Unilever, mayo 2022 (<https://www.unilever.com/files/8f9a3825-2101-411f-9a31-7e6f176393a4/compass-strategy.pdf>).

las fábricas de alimentos de Unilever) para el 2025” (Unilever, 2022c). Esta meta está relacionada con el alcance del ODS-12 Producción y Consumo Responsable.

En lo que respecta a los residuos de alimentos, según lo definido por el *Food Loss and Waste Protocol [FLW³]*, remite tanto a sustancias comestibles que no han sido incorporadas en el producto (por ejemplo, producto purgado de las líneas productivas antes de un cambio de referencia) como a sustancias no comestibles directamente pero que aún contienen materia orgánica aprovechable (por ejemplo, cáscaras y restos de verduras y frutas que son susceptibles de ser transformados en otros productos, alimenticios o no). Este estándar (FLW, 2015), desarrollado por una asociación de partes interesadas y adoptado por Unilever, establece lineamientos acerca de los destinos posibles que se deben dar a los residuos de alimentos para aprovechar su potencial, valorizarlos como recursos y dejar de contabilizarlos como residuos.

Otra meta establecida para el objetivo de “Un Mundo Libre de Residuos” (Unilever, 2022d) implica: “mantener el compromiso de cero residuos no peligrosos a rellenos sanitarios (Zero non-hazardous Waste To Landfill, abreviado, ZWTL) en nuestras fábricas y operaciones”. Es decir, ninguna planta debe enviar residuos no peligrosos a rellenos sanitarios o a incineración sin recupero de energía; lo cual asegura que el residuo se valorizará adecuadamente. Esta meta no tiene un plazo de cumplimiento porque ya está en cumplimiento desde el 2015; por lo que debe mantenerse en el tiempo (Unilever, 2022e).

Unilever contempla la ruta de disposición de los residuos como criterio para determinar si las cantidades de residuos quedan dentro del alcance del indicador ambiental o no, de manera de incentivar a las fábricas a buscar formas innovadoras de tratar y disponer estos residuos. Por lo que, cumpliendo con el compromiso de Cero Residuos No Peligrosos a Rellenos Sanitarios (Unilever, 2022e), las opciones para el destino final de cualquier residuo no peligroso generado en la planta quedan reducidas al reúso⁴ o reciclaje⁵. Si el residuo es reutilizado, quedará fuera del alcance del indicador ambiental; no así si es reciclado. Además, Unilever define al residuo una vez que este abandona el sistema que lo ha generado, por lo que reciclar residuos dentro de la fábrica no será cuantificado por el indicador de residuos interno.

³ Organización no-gubernamental asociada con Unilever y otras empresas alrededor del mundo para reducir la cantidad de desperdicios y residuos de alimentos (<https://www.flwprotocol.org/>).

⁴ Unilever define como reúso a todo proceso o actividad que utilice al residuo para el mismo fin para el cual fue concebido, sin que sea transformado física o químicamente.

⁵ Unilever define como reciclaje a todo proceso o actividad que transforme física o químicamente al residuo para que sea susceptible de utilizarse como materia prima nuevamente.

Marco Teórico

Los biodigestores anaeróbicos o reactores biológicos anaeróbicos consisten en la digestión o degradación de un residuo por acción de diferentes microorganismos, transformándolo en gases de potencial aprovechamiento energético. El tratamiento anaeróbico permite un tratamiento de residuos con baja generación de olores desagradables, tiene un menor impacto ambiental que las alternativas de disposición y es susceptible ser agregado a un proceso de tratamiento de residuos previamente instalado.

Algunos de los beneficios de este tratamiento incluyen:

- El aprovechamiento del biogás generado a partir de la degradación de residuos orgánicos. El cual puede usarse para obtener una fuente de energía independiente de la red de gas natural nacional, renovable y generada a partir de un residuo.
- La disminución del volumen de los residuos enviados a disposición; y por lo tanto del impacto ambiental de dicha disposición y de sus costos asociados.

Proceso de obtención de biogás a través de un biodigestor anaeróbico

Este tratamiento es especialmente aprovechable por su capacidad de generar biogás, el cual puede ser usado como reemplazo directo del gas natural sin mayores modificaciones en la red. Aunque es menos eficiente energéticamente, reduce significativamente la huella de carbono.

Para maximizar la producción de gas metano, principal componente del biogas, y la remoción de componentes orgánicos del efluente tratado, se debe asegurar el equilibrio de las comunidades bacterianas que intervienen en el proceso:

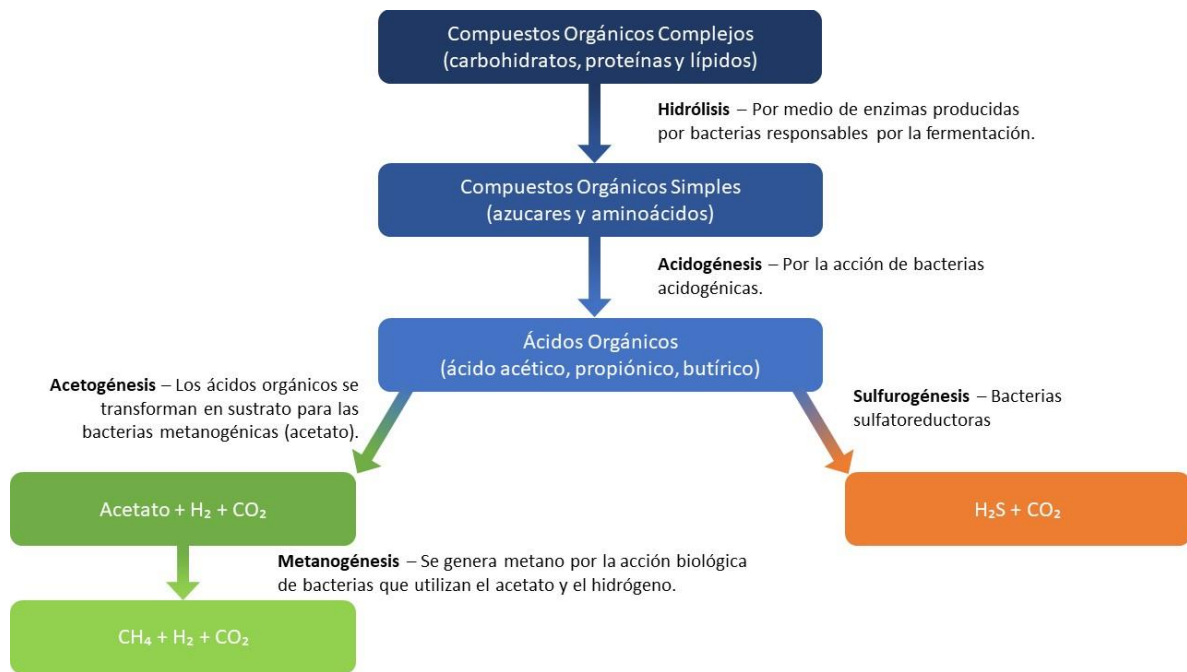


Ilustración 2 - Reacción anaerobia del efluente dentro del biodigestor⁶.

Lograr el equilibrio deseado implica mantener elevada la actividad de las bacterias metanogénicas por encima de las bacterias sulfurogénicas (responsables del mal olor proveniente del ácido sulfhídrico). Winkler (2000) establece que para lograrlo se deben mantener ciertas condiciones específicas:

- el pH debe estar entre 6 y 8 (idealmente mayor a 6,2 para evitar la acumulación de ácidos grasos y su notorio olor agrio),
- no debe haber compuestos tóxicos en concentraciones significativas para las bacterias metanogénicas (como amoníaco, sulfuros, metales pesados, entre otros),
- debe haber suficientes macro y micronutrientes para dichas bacterias,
- la temperatura debe mantenerse entre 20°C y 55°C para incentivar la actividad bacteriana metanogénica y favorecer a la solubilidad de los sustratos (a mayor temperatura, menor será el tiempo de retención del efluente y menor el volumen necesario para el biodigestor), y
- el oxígeno disuelto debe mantenerse al mínimo.

Si se consiguen alcanzar las condiciones específicas mencionadas, el proceso de degradación de la materia orgánica contenida en el efluente tratado liberará gases compuestos

⁶ Gráfico de elaboración propia en base a la teoría de la cátedra Procesos y Operaciones (2019), Winkler (2000) y Metcalf & Eddy (1995).

en su mayoría por metano y dióxido de carbono. Ambos compuestos son poco solubles y se encuentran en forma gaseosa, por lo que escapan de la solución disminuyendo así el contenido de materia orgánica en el efluente. Una vez capturado, deben eliminarse las impurezas, que, en su mayor parte, están conformadas por compuestos de azufre generados por la acción de las bacterias sulfurogénicas y por vapor de agua, para así obtener el biogas propiamente dicho.

Debe tenerse en cuenta al calcular el volumen de biogas que reemplazará al gas natural que alrededor del 30% del biogas está conformado por CO₂ (Winkler, 2000), un gas no reactivo a la oxidación por encontrarse ya en su forma más oxidada. Es decir, que al intentar oxidar CO₂ no se obtendrá energía, por lo que su poder calorífico será menor (se necesitará un mayor volumen de biogás para reemplazar al gas natural). La tasa de generación de metano varía enormemente dependiendo de las características del efluente o lodo a tratar.

Según Winkler, al hablar de digestores convencionales, el tiempo de residencia en condiciones mesofílicas (30-35°C) se encuentra como mínimo en los 10 o 12 días, pero para asegurarse de que las bacterias metanogénicas hayan degradado la materia orgánica (asumiendo posibles inhibiciones al proceso biológico), recomienda extender el tiempo de residencia a alrededor de 30 días. Además, la entrada de efluentes al sistema cerrado suele hacerse más de una vez al día, mientras que las extracciones suceden semanal o diariamente.

Tipos de biodigestores

Existen muchos tipos de biodigestores, los diferentes diseños corresponden a factores como el espacio, la carga diaria de residuos a tratar, su funcionamiento aeróbico o anaeróbico, así como el tipo de circulación que sucede dentro de ellos. Si se entiende a los biodigestores como procesos unitarios de tratamiento biológico se los puede clasificar de la siguiente manera (Metcalf & Eddy, 1995):

- Procesos Aerobios:
 - Cultivo en suspensión: Los microorganismos están libres en el mismo efluente a tratar y actúan sobre las partículas orgánicas directamente.
 - Procesos de lodos activados: convencional (de flujo en pistón), de mezcla completa, entre otros.
 - Nitrificación de cultivos en suspensión.
 - Lagunas aireadas.
 - Digestión aerobia: utilizando aire o con oxígeno puro.
 - Cultivo fijo: Los microorganismos se organizan sobre una estructura sólida y porosa y el efluente entra en contacto con estos al pasar a través de la estructura porosa.

- Filtros percoladores: pudiendo ser para baja o alta carga orgánica del efluente a tratar.
 - Filtros de desbaste.
 - Sistemas biológicos rotativos de contacto (RBC).
 - Reactores de lecho compacto.
- Procesos combinados: Biofiltros activados (consiste en la combinación de filtros percoladores con contacto de sólidos, procesos de fangos activados con biofiltros, proceso de filtros percoladores y/o fangos activados en serie).
- Procesos Anóxicos:
 - Cultivo en suspensión: desnitrificación con cultivo en suspensión.
 - Cultivo fijo: desnitrificación de película fija.
- Procesos Anaerobios:
 - Cultivo en suspensión:
 - Digestión anaerobia: pudiendo ser para baja o alta carga orgánica del efluente a tratar, en una o en dos etapas.
 - Proceso anaerobio de contacto.
 - Reactor anaerobio de manto ascendente (también conocido como UASB⁷ por sus siglas en inglés).
 - Cultivo fijo: como son el filtro anaerobio o el biodigestor de lecho expandido.
- Procesos Anaerobios, Anóxicos o Aerobios combinados:
 - Cultivo en suspensión: pudiendo ser de una o varias etapas.
 - Procesos combinados: pudiendo ser de una o varias etapas.
- Procesos en estanques:
 - Lagunas aerobias.
 - Estanques de maduración (terciarios).
 - Estanques facultativos.
 - Estanques anaerobios.

Funcionamiento de un reactor anaerobio de manto ascendente (UASB)

Para el caso de estudio, se opta por diseñar un reactor anaerobio de manto ascendente. En este proceso, como es descrito por Metcalf & Eddy (1995), la corriente afluyente entra en contacto con las partículas formadas por el ecosistema de bacterias que habitan dentro del

⁷ Upflow Anaerobic Sludge Blanket.

reactor, las cuales liberan el biogás al degradar la materia oxidable del efluente a tratar. El flujo es ascendente debido a que el efluente a tratar se introduce por la parte inferior del reactor, los microorganismos se adhieren a las partículas de materia oxidable y la degradan a compuestos gaseosos, lo cual crea una corriente ascendente de partículas. Los gases son liberados al entrar en contacto con la superficie y son recolectados para su posterior tratamiento y uso. Las partículas desgasificadas vuelven a caer hasta la superficie del fango en el fondo. Para aumentar la homogenización entre el fango y el líquido se utilizan mezcladores.

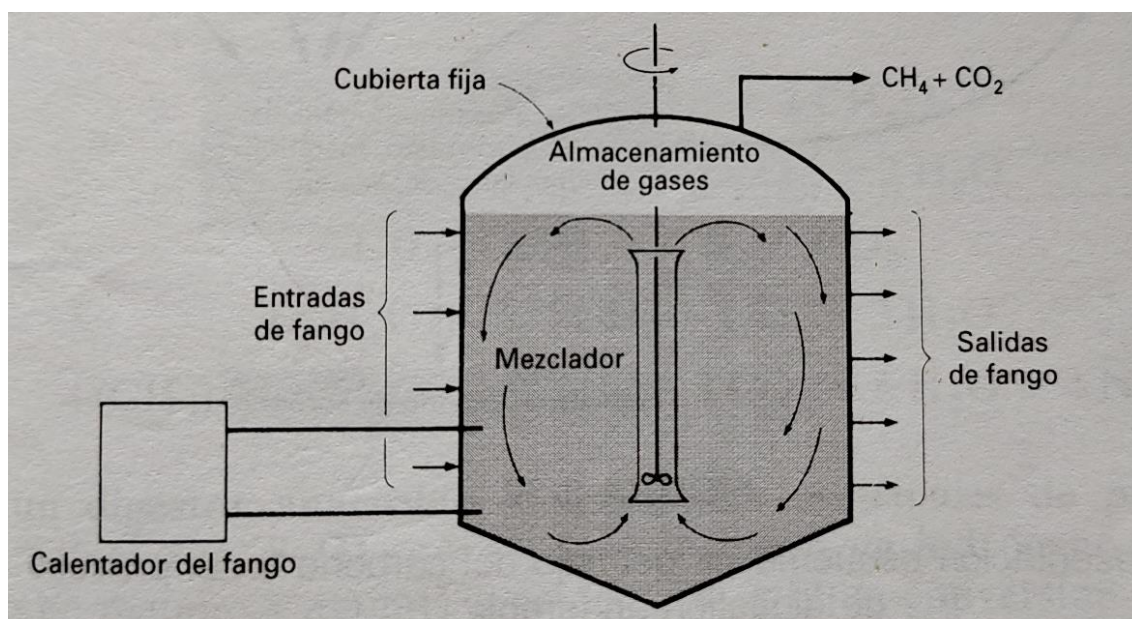


Ilustración 3 – Representación gráfica de un digestor de anaerobio típico de proceso de fase única, tanque de mezcla completa y alta carga (que incluye el mecanismo de funcionamiento UASB)⁸.

El biodigestor utiliza un mezclador para optimizar su funcionamiento y rendimiento de biogás. El mezclador suele utilizar un medio de agitación mecánico, por lo general, dos ejes con paletas de baja velocidad de giro para homogenizar los efluentes y liberar las partículas de gas (Metcalf & Eddy, 1995). Se debe tener cuidado de las fugas de gas en el sellado de los ejes en caso de que se conecten externamente.

Obtención de biogás

El gas resultante de la digestión anaeróbica tendrá como fin ser utilizado para alimentar las calderas de la producción, por lo que deberá limpiarse de sus impurezas previo a su uso para aprovechar su potencial energético al máximo. El biogás crudo estará compuesto en distintas

⁸ Metcalf & Eddy (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, Vertido y Reutilización* (p. 481). McGraw-Hill.

proporciones por (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2019a):

- Metano: Gas combustible que se desea obtener en mayor proporción.
- Dióxido de carbono: Es el segundo gas que se obtiene en mayor proporción, como se trata de un gas ya oxidado (y, por lo tanto, no combustible) se desea disminuir la concentración de dicho gas en el biogás.
- Sulfuro de hidrógeno: Este gas es tóxico, corrosivo y oloroso. Tiene un efecto degradante en la vida útil de los equipos que lo transportan.
- Hidrógeno: Se encuentra en bajas concentraciones, es un gas combustible que reacciona con el oxígeno.
- Nitrógeno gaseoso: En sistemas de biodigestores aplicados a la industria se encuentra en concentraciones muy bajas.
- Oxígeno.
- Vapor de agua.

Almacenamiento del biogás

Para el almacenamiento de biogás a baja presión existen distintos tipos de sistemas (adaptables a distintas escalas):

- Cámara de biogás en el biodigestor: Se almacena en el mismo biodigestor, la dificultad más grande de este sistema es la incapacidad de mantener constante la presión del biogás.
- Gasómetro de campana flotante: La campana flotante permite mantener constante la presión del biogás, se usa líquido como sello hidráulico para evitar el contacto del biogás con el aire.
- Gasómetro de doble membrana: La doble membrana flexible permite mantener constante la presión del biogás, ya que utiliza la cámara entre ambas membranas para ejercer presión sobre el biogás. Las membranas deben ser capaces de soportar la acción corrosiva interna de los sulfuros y la acción desgastante externa de los elementos (como el viento o el granizo); razón por la cual debe seleccionarse cuidadosamente el material de ambas membranas.

Luego de ser almacenado, el biogás puede utilizarse como reemplazo del gas natural. Sin embargo, su poder calorífico será considerablemente menor si no es purificado para transformarlo en biometano.

Purificación y uso final del biogás

Para lograr el uso más eficiente del poder calorífico del biogás se lo debe transformar en biometano, y para esto se deben instalar equipos limpiadores de los gases no combustibles y de las impurezas (las cuales están compuestas mayoritariamente por sulfuro de hidrógeno, materia particulada y vapor de agua).

Los equipos limpiadores incluyen diferentes técnicas para la remoción de los gases no deseados (FAO, 2019a):

- La eliminación de vapores de agua a través de sistemas de enfriamiento o compresión del gas, adsorción en carbón activado o absorción de la humedad a través del uso de silica gel, de sales higroscópicas o de soluciones de glicol.
- La eliminación de sulfuro de hidrógeno a través de agregados químicos como el cloruro ferroso o férrico (las sales metálicas forman sales insolubles con el sulfuro, no permitiendo así que se liberen junto con el biogás), adición de oxígeno (para permitir el desarrollo de microorganismos aeróbicos que consumirán el sulfuro de hidrógeno) y del uso de filtros (adsorbentes, absorbentes y biológicos).
- La eliminación de dióxido de carbono puede lograrse a través de:
 - Lavados:
 - Químicos: la utilización de aminas, metildietanolamina y monoetanolamina puede remover el dióxido de carbono, así como el sulfuro de hidrógeno.
 - Con agua bajo presión: método económico para bajos caudales de biogás en donde se disuelve el dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno en agua a bajas temperaturas y alta presión, el agua puede reutilizarse al revertirse las condiciones.
 - Físico con disolventes orgánicos: este método permite eliminar varios compuestos a la vez.
 - Químico con disolventes orgánicos: método que combina elementos fisicoquímicos para capturar y separar el dióxido de carbono de la mezcla de gases.
 - Separación:
 - Con membranas: Si se trabaja a una temperatura de 45°C y a una presión de 8 bar, se logra una pureza de metano de alrededor de 96%.

- Criogénica: Si se disminuye drásticamente la temperatura (hasta alrededor de -90°C), el dióxido de carbono puede licuarse y extraerse de la mezcla de gases para lograr una pureza de metano de alrededor del 99%. Sin embargo, requiere un gran costo de inversión para los equipos necesarios para llegar a dicha temperatura y una gran cantidad de energía para operar el proceso.
- Otros compuestos minoritarios (como son los siloxanos y el oxígeno o aire) pueden ser eliminados con diversas técnicas si su concentración se considera lo suficientemente elevada. Los siloxanos pueden dañar los equipos y perjudicar su vida útil, mientras que el aire y el oxígeno pueden crear una peligrosa y explosiva mezcla de gases. Se recomienda monitorear periódicamente para asegurar que no hay riesgos innecesarios en la obtención de biogás.

Una vez obtenido el biogás con la purificación deseada, el gas puede almacenarse de forma segura y de fácil acceso para su uso. Según la *Guía Teórico-Práctica Sobre El Biogás y los Biodigestores* (FAO, 2019a), la mayoría de los biodigestores se diseñan para consumir una cierta producción diaria, para lo cual se necesita el almacenamiento a presiones bajas (<30 mbar), sin ningún tipo de compresión. Solamente en el caso de que el objetivo final sea su inyección a la red de gas natural se debe comprimir previamente.

La combustión del biogás en equipos que utilizan gas natural requiere una modificación en la apertura de la válvula dosificadora de gas (para permitir un mayor caudal y lograr una combustión más eficiente).

Digerido del biodigestor

La función principal de un biodigestor recae en la obtención de biogás a través de la digestión anaeróbica biológica de residuos orgánicos. Sin embargo, el residuo ya degradado y digerido puede ser utilizado para la obtención de biofertilizantes.

De otra manera, el efluente resultante del proceso de biodigestión, o digerido, debe tratarse en una planta de tratamiento de efluentes para alcanzar los parámetros necesarios para su vuelco en un curso de agua.

Para usarse como biofertilizante, el digerido debe presentar una relación de nitrógeno inorgánico disponible tal que permita la rápida absorción de los cultivos y una porción asimilable de fósforo; además de no presentar metales pesados en cantidades significativas susceptibles de dañar los cultivos (FAO, 2019a).

Para tener mayor control y asegurar un almacenamiento apropiado del digerido, se lo debe separar en fase sólida y líquida. La separación de fases puede lograrse a través de diferentes equipos como: lechos de secado, separadores rotativos, separadores helicoidales o de tornillo, separadores gravimétricos o centrífugas. Se deben tomar consideraciones para no perder el nitrógeno por su volatilización como mantener el pH inferior a 8.0, la temperatura menor a 20°C y evitar el contacto directo con el aire (FAO, 2019a).

En el caso de que no puedan asegurarse las cantidades y proporciones adecuadas de nitrógeno o fósforo, el digerido se denomina *compost*, no biofertilizante. Puede ser considerado un estado intermedio para ciertas industrias que no tienen el poder económico necesario para invertir en los equipos y aplicación de métodos para mantener las condiciones apropiadas para el biofertilizante.

El compostaje del digerido en condiciones aerobias acelera la descomposición de la materia y da lugar a un aumento de temperatura suficiente para la destrucción de patógenos y la minimización de olores desagradables (a medida se descompone, puede alcanzar temperaturas de entre 40°C a 70°C).

Tipos de compostaje

Según Metcalf & Eddy (1995), los tres principales sistemas de compostaje normalmente utilizados son:

- Pila estática aireada: Sistema que consiste en una red de tuberías de conducción de aire sobre las que se distribuye una mezcla de fango deshidratado y un material soporte (por ejemplo, astillas de madera). Para mejorar la eficiencia del proceso y disminuir la generación de olores, las tuberías deben cubrirse por completo. Una vez que se lleva a cabo la maduración del compost (en alrededor de 30 días), se criba al compost maduro.
- Pilas volteadas: Sistema que consiste en operaciones de mezclado y cribado similares a las pilas estáticas aireadas, con la excepción de que las pilas son mezcladas y volteadas periódicamente en vez de ingresar aire con tuberías al interior de estas. El tiempo de maduración es similar al de las pilas estáticas aireadas.
- Sistemas de compostaje cerrados: Este sistema se realiza en el interior de depósitos o reactores cerrados para minimizar la producción de olores y la duración del proceso, ya que se tiene mayor control sobre las condiciones externas (como la circulación del aire, la temperatura y la concentración del oxígeno en el aire).

Marco Legal

Dentro del marco legal nacional se pueden encontrar instrumentos que enmarcan cuestiones relacionadas con el uso de un biodigestor como solución integral al tratamiento de residuos orgánicos y al uso del biogás consecuente de dicho proceso.

Los instrumentos legales⁹ que enmarcan la relación de actividades industriales con el medioambiente en términos de impacto y prevención pueden ordenarse de acuerdo con su alcance:

- Nacional:
 - Ley Nacional N°24.430 – Constitución de la Nación Argentina: Sancionada el 15/12/1994, establece en su artículo 41 que las actividades productivas satisfagan las necesidades presentes sin comprometer las de las generaciones futuras.
 - Ley Nacional N°25.675 – Ley General de Ambiente o Política Ambiental Nacional: Sancionada el 6/11/2002, establece los presupuestos mínimos nacionales para el logro de una gestión sustentable y adecuada del ambiente, la preservación y protección de la diversidad biológica y la implementación del desarrollo sustentable.
 - Decreto N°776/1992 y 674/1989: Sancionados el 12/05/1992 y el 24/05/1989 respectivamente, reglamentan acerca del tratamiento y manejo de los efluentes industriales, pluviales y cloacales.
 - Ley Nacional N°25.612 - Gestión Integral de Residuos Industriales y de Actividades de Servicios: Sancionada el 03/07/2002 establece los presupuestos mínimos para la protección ambiental en la gestión integral de residuos industriales y de actividades de servicio en todo el territorio nacional, incluyendo aspectos como niveles de riesgo, tecnologías, registros, responsabilidades y autoridades de aplicación.
 - Ley Nacional N°27.191 - Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la Producción de Energía Eléctrica: Sancionada el 21/10/2015 establece objetivos y metas de participación de

⁹ Los instrumentos legales enumerados fueron seleccionados de la legislación relacionada con la generación de energía utilizando biomasa presentada en la página web de Probiomasa (s.f.) de acuerdo con su aplicabilidad al biogás y a su relevancia al caso de estudio (actividad industrial) y de la legislación detallada en la *Guía técnico-regulatoria para la habilitación de plantas de biogás y homologación de artefactos y equipos para su uso* (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO], 2019b).

energías renovables en la matriz energética argentina, promoviendo su desarrollo y utilización en todo el territorio nacional, a través de incentivos fiscales y financieros. Establece modificaciones a la ley nacional N°26.190.

- Decreto N°531/2016: Sancionada el 30/03/2016 establece un régimen de fomento para la generación distribuida de energía renovable integrada a la red eléctrica, mediante el cual se promueve la instalación de pequeñas centrales de energía renovable, con el fin de incentivar la producción de energía limpia y reducir la dependencia de los combustibles fósiles.
- Ley Nacional N°24.051 - Residuos peligrosos: Sancionada el 17/12/1991 establece el marco regulatorio para la gestión de residuos peligrosos, fijando los objetivos, criterios y procedimientos necesarios para minimizar el impacto ambiental y la protección de la salud pública. Se establece la responsabilidad de los generadores, transportistas y operadores de las instalaciones de tratamiento y disposición final, así como la obligación de las autoridades de control y la creación de un registro nacional de empresas y operadores. También se establecen sanciones para las infracciones a la ley.
 - Decreto N°831: Sancionada el 23/04/1993 reglamenta la ley nacional N°24.051.
- Ley Nacional N°19.587/72: Sancionada el 21/04/1972 establece las normas de seguridad e higiene en el trabajo en Argentina, con el objetivo de prevenir accidentes y enfermedades laborales, y garantizar un ambiente de trabajo seguro y saludable. La ley establece las responsabilidades y obligaciones de los empleadores, los trabajadores y las autoridades competentes en materia de seguridad del trabajo, y establece medidas para la identificación, evaluación y control de los riesgos laborales.
- Ley Nacional N°24.557/95: Sancionada el 13/09/1995 establece el régimen de riesgos del trabajo en Argentina, con el objetivo de prevenir la siniestralidad laboral y garantizar la protección de los trabajadores en caso de accidentes o enfermedades profesionales. La ley establece las obligaciones de los empleadores y trabajadores en materia de prevención, así como los procedimientos para la determinación y reparación de los daños sufridos por los trabajadores a causa de un accidente de trabajo o enfermedad profesional.
- Ley Nacional N°24.076/1992: Sancionada el 20/05/1992 establece el marco normativo de las actividades de transporte y distribución de gas natural,

también crea al Ente Nacional Regulador del Gas, o ENARGAS, como su autoridad de aplicación. Entre las facultades de ENARGAS, se incluye la de dictar reglamentos a los que deben ajustarse todos los sujetos de la ley en materia de seguridad, normas y procedimientos técnicos.

- Decreto Reglamentario Nacional N°1.738/1992: Sancionado el 18/09/1992 define "gas" como “gas natural procesado o sin procesar, gas natural líquido vaporizado, gas sintético o cualquier mezcla de estos gases en estado gaseoso, y que consistan primordialmente en metano”. Esta definición permite incluir al biogás dentro de los gases regulados por esta ley en cuanto a su transporte, distribución y almacenamiento.
 - ◇ Resolución Nacional de ENARGAS N°3.665/16: Sancionada el 26/02/2016 aprueba la Norma NAG-140-2016 “Sistemas De Tuberías Plásticas De Polietileno (PE) Para El Suministro De Combustibles Gaseosos” que establece los requisitos mínimos para las tuberías que transportan combustibles gaseosos.
- Ley Nacional N°13.660/1949: Sancionada el 30/09/1949 establece las instalaciones de elaboración, transformación y almacenamiento de combustibles sólidos minerales, líquidos o gaseosos deberán ajustarse, en todo el territorio de la Nación, a las normas y requisitos que establezca el Poder Ejecutivo para satisfacer la seguridad y salubridad de las poblaciones, la de las instalaciones mencionadas, el abastecimiento normal de los servicios públicos y privados y las necesidades de la defensa nacional.
 - Decreto Reglamentario Nacional N°10.877/1960: Sancionado el 16/09/1960 aprueba la reglamentación relativa a la seguridad de las instalaciones de elaboración, transformación y almacenamiento de combustibles sólidos, minerales, líquidos y gaseosos.
- Ley Nacional N°26.093/2006: Sancionada el 15/05/2006 define como biocombustibles el bioetanol, biodiesel y biogás que se produzcan a partir de materias primas de origen agropecuario, agroindustrial o desechos orgánicos, que cumplan los requisitos de calidad que establezca la autoridad de aplicación.
 - Decreto Reglamentario Nacional N°109/2007: Sancionado el 18/12/2007 especifica que quedan sujetas al régimen las actividades de producción, mezcla, comercialización, distribución, consumo y uso sustentables de biocombustibles.

- ◇ Resolución Nacional N°1.296/2008: Sancionada el 18/11/2008 establece las condiciones mínimas que deben cumplir las plantas de elaboración, almacenamiento y mezcla de biocombustibles en relación con la seguridad en caso de incendio. Esta norma está enfocada en la habilitación de plantas de biodiesel.
 - Ley Nacional N°19.587/1972, o Ley de Higiene y Seguridad del Trabajo, y su Decreto reglamentario N°351/1979: establecen la protección mínima contra incendios que debe llevarse a cabo en actividades industriales.
- Provincial (Provincia de Buenos Aires):
 - Constitución de la Provincia de Buenos Aires: Sancionada el 13/09/1994 establece en su artículo N°28, entre otros aspectos, que se “deberá preservar, recuperar y conservar los recursos naturales, renovables y no renovables del territorio de la Provincia, planificar el aprovechamiento racional de los mismos, controlar el impacto ambiental de todas las actividades que perjudiquen al ecosistema y promover acciones que eviten la contaminación del aire, agua y suelo.”
 - Ley Provincial N°11.459 – Ley de Radicación Industrial: Sancionada en 21/10/1993, establece disposiciones destinadas a la protección del medioambiente, como la prevención y el control de la contaminación, la gestión de residuos, la protección de la fauna y la flora, la conservación de áreas naturales, y la promoción de la educación ambiental y la participación ciudadana. Los distintos requisitos de radicación de industrias varían en función del riesgo o molestia a la seguridad, salubridad o higiene de la población, bienes materiales o ambiente.
 - Resolución N°494/2019: Sancionada el 15/07/2019 es una resolución emitida por el Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible (OPDS) para regular el manejo, transporte, tratamiento y disposición final de los residuos peligrosos en la provincia de Buenos Aires, garantizando la protección de la salud humana y el medio ambiente.
 - Ley Provincial N°5.965: Sancionada el 30/10/1958 establece la protección a las fuentes de provisión y a los cursos y cuerpos receptores de agua y a la atmósfera para así proteger al patrimonio natural y cultural de la provincia de Buenos Aires.

- Decreto N°1.074/18 – Sancionado el 13/09/2018 reglamenta el vertido de efluentes gaseosos a la atmósfera.
- Resolución N°159/96: Sancionado el 15/07/1996 es una resolución de control de emisión de ruidos al vecindario.
- Ley Provincial N°11.720: Sancionada el 02/11/1995 establece, en sus artículos 1 al 4, la generación, manipulación almacenamiento, transporte, tratamiento y disposición final de residuos especiales en el territorio de la Provincia de Buenos Aires. Brinda además la definición de Residuo Especial para el territorio de la Provincia de Buenos Aires.
 - Decreto N°806/97: Sancionado el 16/04/1997 reglamenta la ley provincial N°11.720.
- Resolución OPDS N°3.722/16: Sancionado el 19/10/2016 reglamenta el deber de informar a la Autoridad de Aplicación modificaciones significativas de actividades operativas habituales; así como cualquier eventualidad, un incidente o una emergencia.
- Resolución OPDS N°139/2013: Sancionada el 9/12/2013 establece el deber de presentar el Plan de Gestión de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) al momento de renovar el Certificado de Aptitud Ambiental (CAA) al OPDS. El OPDS solicitará a los establecimientos industriales considerados Grandes Generadores de Residuos Sólidos según el artículo 3 de la Ley 14.273 que estén instalados en el Área Metropolitana de Buenos Aires, la presentación de un Plan de Gestión de Residuos Sólidos al momento de renovar su Certificado de Aptitud Ambiental.

Además del conjunto de instrumentos legales, se debe tener en cuenta el conjunto de normas y especificaciones técnicas que los complementan. En el caso particular de los combustibles gaseosos, este conjunto de normas se denomina el Código Argentino de Gas, o NAG, y son de carácter obligatorio para la industria del gas en Argentina (el conjunto de normas se encuentra disponible en la página web de ENARGAS (s.f.)). Los documentos que los componen están regulados por ENARGAS y pueden organizarse en seis grupos de normas diferenciados por su ámbito de aplicación:

- Grupo 1: Redes de distribución, líneas de transmisión e instalaciones complementarias.
 - Incluye a la norma NAG-140, anteriormente nombrada y aprobada por la Resolución Nacional de ENARGAS N°3.665/16, que informa sobre el uso de tuberías plásticas de polietileno para el suministro de combustibles gaseosos y las conexiones entre las mismas.

- Grupo 2: Instalaciones internas.
 - Incluye a la norma NAG-201 que presenta recomendaciones para las instalaciones industriales de gas.
- Grupo 3: Artefactos.
 - Incluye a la norma NAG-300 que determina los requisitos mínimos de seguridad y eficiencia energética para artefactos de uso doméstico que utilizan gas como combustible.
- Grupo 4: Gas natural comprimido.
 - Incluye a la norma NAG-443 que establece las pautas mínimas a observar en el proyecto, construcción, pruebas y habilitación de las instalaciones pertenecientes a plantas de carga y descarga de gas natural comprimido o a presión abastecido por vía terrestre. Además, presenta pautas para tener en cuenta en la operación y mantenimiento del sistema a fin de garantizar condiciones de seguridad y minimizar situaciones de riesgo por error humano.
- Grupo 5: Almacenamiento.
 - Incluye a la norma NAG-501, norma mínima de seguridad para plantas de almacenamiento de gas natural licuado en tierra.
- Grupo 6: Control operativo de gas y despacho.
 - Compuesto por la norma NAG-602 que establece las especificaciones de calidad para el transporte y distribución de gas natural y otros gases análogos.

En el ámbito internacional existen otros conjuntos de normas para la generación, almacenamiento, distribución, transporte y uso del biogás. Se destacan las normas de Alemania (dictadas por tres asociaciones: DVGW, FVB y DWA), Francia, Estados Unidos, Chile, México y Colombia. La arista en común a todas las normativas son las medidas que se deben tomar para minimizar los riesgos de incendio y asegurar la protección de los trabajadores.

Caso de estudio

Caracterización de los Residuos

La caracterización de los residuos puede hacerse de variadas maneras, entre las cuales se encuentran: la distinción según su naturaleza química (orgánico o inorgánico), según la corriente de residuo (se los agrupa en categorías por materiales) o según el estado de la materia del residuo (sólido, líquido o gaseoso).

Unilever planta Pilar es una fábrica que produce alrededor de 100.000 toneladas de productos alimenticios al año, es esperable que la mayor porción de los residuos generados por la misma sea de naturaleza orgánica:

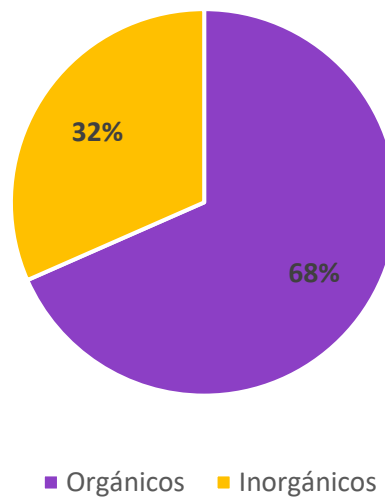


Gráfico 1 - Generación de residuos según su naturaleza química¹⁰.

Los residuos de naturaleza inorgánica serán reusados en el caso de que mantengan su integridad física (como sucede comúnmente con los pallets o las cajas de cartón), o bien, reciclados en caso de que no sean susceptibles de ser usados para el mismo fin para el cual fueron concebidos inicialmente (como sucede con los residuos plásticos tanto rígidos como flexibles).

Los residuos de naturaleza orgánica son susceptibles de ser compostados, ser utilizados como alimento animal, incinerarse con recuperación de energía, utilizarse en otros procesos, entre otras opciones.

Distinguiendo los residuos según su corriente se obtiene el siguiente gráfico:



Gráfico 2 - Residuos generados anualmente según destino final¹¹.

¹⁰ Gráfico de elaboración propia. Datos calculados del sistema de reporte de performance ambiental interno a través de un promedio de los datos obtenidos en el 2020.

¹¹ Gráfico de elaboración propia. Datos calculados del sistema de reporte de performance ambiental interno a través de un promedio de los datos obtenidos en el 2020.

Por otro lado, al segregar a los residuos según el estado de la materia, los residuos pueden diferenciarse en residuos sólidos, líquidos y gaseosos. Los residuos sólidos son almacenados hasta ser retirados por el proveedor de tratamiento de residuos. Ya sea en el área de reciclaje donde se separan los residuos por el material que los componen; o en contenedores paralelos a la producción donde son retirados semanalmente. A su vez, los residuos gaseosos son monitoreados periódicamente.

Los residuos líquidos o efluentes pueden ser de origen:

- Pluvial: Generados por las precipitaciones. Debido a sus características fisicoquímicas y por no poseer carga contaminante, no requiere de un tratamiento de depuración y por lo tanto es conducido por el sistema de colección y desagües de la planta y volcado en las zanjas que rodean al predio.
- Cloacal: Generados por las instalaciones sanitarias del establecimiento. Estos servicios sanitarios son utilizados por el personal y generan un volumen promedio de 80 m³/día. Los efluentes cloacales se acumulan en una cámara séptica y son bombeados a la planta de tratamiento de efluentes, donde se mezclan con los efluentes industriales para ser tratados. El efluente tratado es volcado a la colectora del parque industrial donde se encuentra ubicada la fábrica, y de allí a un cuerpo de agua superficial.
- Industrial: Generados por la operación de la planta. Son conducidos a través de cañerías bajo tierra hasta la planta de tratamiento de efluentes, donde se mezclan con los efluentes cloacales para ser tratados. El efluente tratado es volcado a la colectora del parque industrial donde se encuentra ubicada la fábrica, y de allí a un cuerpo de agua superficial. El efluente tratado es monitoreado diariamente por la empresa y en forma mensual por la municipalidad.

La planta de tratamiento de efluentes es capaz de tratar efluentes con elevada carga orgánica derivados principalmente de las limpiezas de líneas de producción. Para disminuir la carga orgánica a niveles aceptables por la legislación argentina, el efluente debe pasar a través de las unidades de tratamiento que componen la planta de tratamiento de efluentes (en este caso tratamientos físicos, biológicos y químicos).

El pretratamiento consiste en diferentes procesos físicos que logran un efluente limpio de impurezas lo suficientemente grandes que puedan obstaculizar los procesos de los tratamientos posteriores. Comienza con una cámara de rejillas para separar pedazos grandes que puedan obstruir el flujo normal de la planta de tratamiento, le sigue un separador de grasas y

finaliza con un ecualizador para homogenizar los efluentes y alimentar al tratamiento con un caudal y calidad aproximadamente constante. Las grasas y barros retirados en el pretratamiento son acumulados en un pozo de bombeo desde el cual son retirados de la planta con camiones cisterna.

El tratamiento biológico consiste en procesos biológicos que utilizan microorganismos para degradar los contaminantes de los efluentes. El afluente del tratamiento biológico reúne al efluente industrial pretratado y al efluente cloacal. Está compuesto por una cámara de carga previa a dos lagunas aeróbicas (aireada con equipos de oxigenación para oxigenar a los microorganismos y evitar que se estratifique el sustrato en las lagunas) y un biorreactor de membranas.

El tratamiento fisicoquímico incluye dos sedimentadores de tipo rotativo (que acumulan el barro en el fondo), un laberinto de cloración, o cámara de desinfección (de dosificación automática), y una cámara de aforo previo al vuelco fuera de la planta. Los barros resultantes son acumulados en un digestor y luego son secados con un filtro de bandas para finalmente ser compostados por un tercero; mientras que el efluente tratado es recuperado para limpieza del predio y riego.

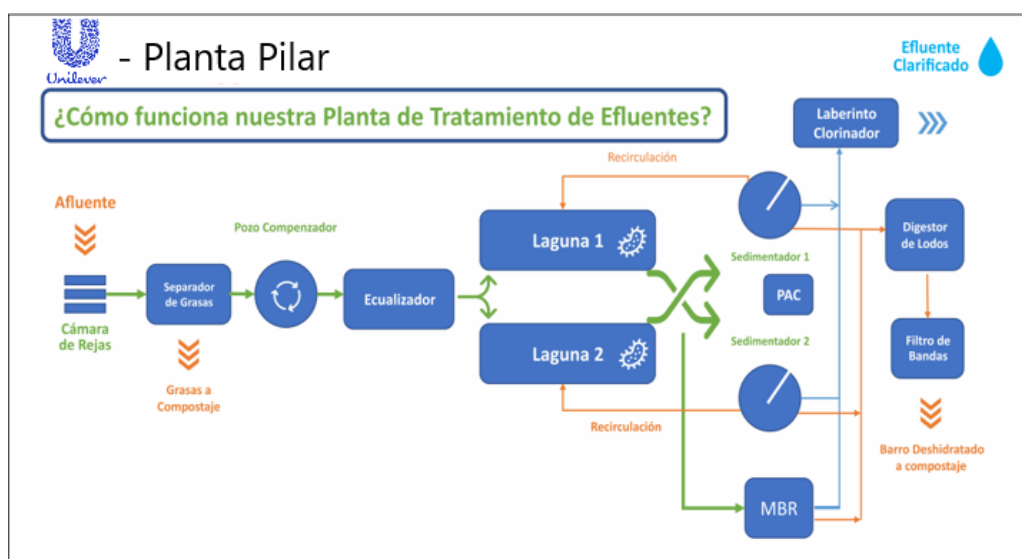


Ilustración 4 - Flujo de procesos que sufren los efluentes líquidos industriales antes de ser descargados¹².

Tratamiento Integral de los Residuos Orgánicos

Se centrará el análisis en las corrientes de residuos orgánicos reciclados, ya que son aquellas que impactan en el indicador de la generación de residuos de la planta de manera más

¹² Diagrama de procesos de la planta de tratamiento de efluentes líquidos proveniente de la fábrica Unilever Pilar.

significativa. Actualmente, las diferentes corrientes de residuos orgánicos reciclados son tratadas o enviadas a disposición final según la siguiente tabla:

Corriente de residuo	Cantidades (kg)	Destino	Costo	Costo
			Total (€)	Unitario (€/ton)
Grasas de la PTEL	3.050.000	Compostaje	130.000	42,6
R. Mixto	2.000.000	Incineración con recupero de energía	300.000	150,0
R. de materias primas	995.000	Compostaje	70.000	70,4
Barro de la PTEL	850.000	Compostaje	40.000	47,1
R. de producto terminado	290.000	Incineración con recupero de energía	43.500	150,0
Madera	155.000	Donación	-	-

Tabla 1 - Costo de tratamiento según corriente de residuo orgánico reciclado¹³.

El residuo que se genera en mayor cantidad son las grasas capturadas por las trampas de grasa de la planta de tratamiento de efluentes líquidos de la fábrica, alcanzando aproximadamente 3.050 toneladas por año. Actualmente este residuo se compostea en el predio de un tercero; cuyo proceso es auditado anualmente para corroborar que se lleve a cabo bajo los lineamientos del estándar de Cero Residuos No Peligrosos a Rellenos Sanitarios (Unilever, 2022e). Según lo detallado anteriormente, esta corriente de residuo impacta directamente en el indicador, dejando a la fábrica en jaque debido a la complejidad de tratar con ese caudal de residuo constantemente.

A continuación, se analizará como alternativa al tratamiento de las corrientes de residuos orgánicos reciclados la implementación de un biodigestor. Estos últimos, conforman la parte más crítica de los residuos de la Planta Pilar por su caudal de generación (se consideran residuos orgánicos reciclados aptos para el biodigestor a las grasas y a las purgas de las diferentes líneas, también denominado residuo producto terminado y de materias primas). No se tendrá en cuenta a la corriente de residuo “Madera” porque la donación a la comunidad es considerada una buena práctica para mantener buenas relaciones con los vecinos. La elección de un biodigestor dentro de la fábrica como alternativa de tratamiento tiene como finalidad obtener un recurso renovable de un residuo.

¹³ Tabla de elaboración propia. Datos calculados del sistema de reporte de performance ambiental interno a través de un promedio de los datos obtenidos en el 2020.

Potencial de generación de biogás

Para determinar el potencial de generación de biogás utilizando los residuos orgánicos de la planta, se deben de realizar muestreos y determinaciones fisicoquímicas. Se utilizarán los ensayos realizados en el 2020 por la Ingeniera Ambiental Agustina Rodríguez Saracho, graduada de la Universidad Nacional de San Martín, en el laboratorio del INTI como parte de su trabajo en planta.

Dicho ensayo determina la cantidad de biogás que se podría obtener a partir de la digestión anaeróbica de los efluentes en base a su concentración de sólidos orgánicos. El potencial de generación de biogás puede expresarse¹⁴ en:

- $Nm^3 CH_4 / g SV_{Sustrato}$
- $Nm^3 CH_4 / Tonelada_{Sustrato}$

El ensayo utilizó blancos y otros compuestos conocidos para contrastar contra muestras puntuales tomadas en distintos puntos de la planta de tratamiento de efluentes y así caracterizar los tipos de sustratos que componen al efluente. Las muestras puntuales fueron tomadas de:

1. La cámara de flotación o separador de grasas.
2. La purga de producción de mayonesa (que se almacenan en tachos previo a su tratamiento fuera de la fábrica).

El potencial de generación de biogás puede variar según las características de los sustratos utilizados para producirlo. De manera que se utilizaron diferentes combinaciones de dichos sustratos para identificar la proporción que maximizaría el potencial de generación de biogás.

¹⁴ Una forma estándar de expresar volúmenes de gases es a través del volumen que ocuparía en condiciones normales de presión y temperatura. Se considerarán las condiciones normales de presión y temperatura cuando la presión absoluta se encuentre en 1 atm y la temperatura se encuentre en 0°C. De otra manera habría que especificar las condiciones de presión y temperatura para que el gas ocupe dicho volumen.

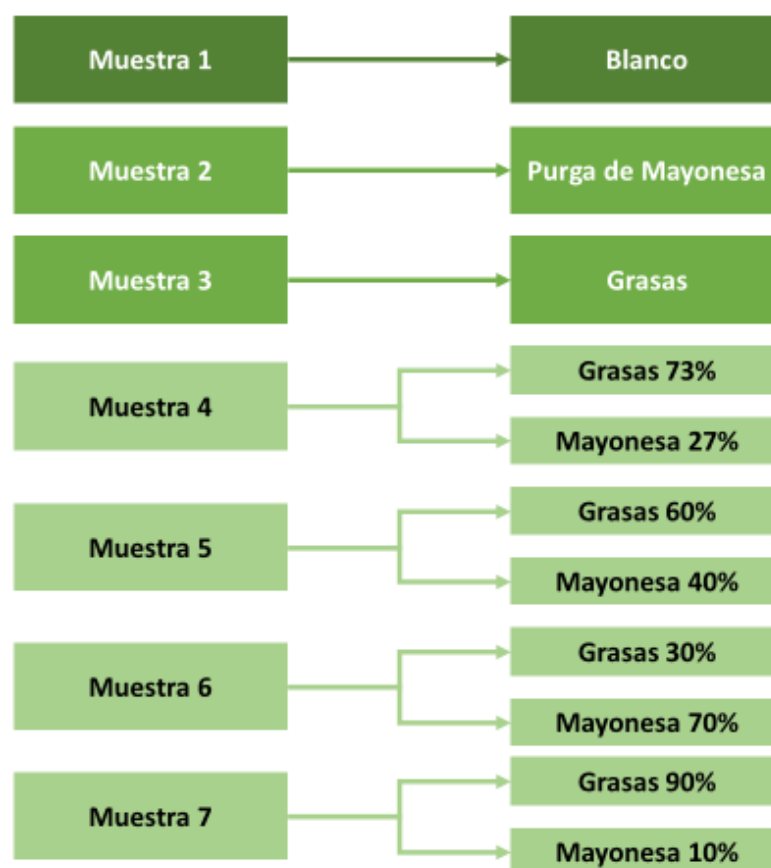


Ilustración 5 – Muestras compuestas realizados en diferentes proporciones en base a los sustratos que alimentarían el biodigestor¹⁵.

Cada ensayo fue duplicado para comprender el comportamiento de las reacciones y evitar errores humanos de medición. Los ensayos que fueron realizados sobre las muestras compuestas 4, 5, 6 y 7 representan diferentes proporciones de los residuos orgánicos más representativos de la fábrica para evaluar si alguna de las proporciones optimiza la generación de metano, o bien la disminuye por alguna razón. La razón por la cual la muestra compuesta 5 tiene proporciones tan específicas, es porque es la proporción de generación mensual promedio de ambos residuos.

Las muestras fueron tomadas durante el mismo período de elaboración, por lo que se asume la homogeneidad de sus características para el ensayo. Para realizar un estudio completo se deben analizar muestras representativas de todo el año productivo para que contemplen los distintos cambios en la producción.

¹⁵ Ilustración de elaboración propia basada en el “Informe técnico – Ensayo de producción de biometano” (INTI).



Imagen 1 – Fotografía tomada previa a la realización de los ensayos sobre las muestras por la Ingeniera Ambiental Agustina Rodríguez Saracho, 2020.

Para realizar los ensayos fue necesario inocular las muestras con microorganismos que puedan realizar la biodigestión anaerobia de los residuos de manera similar a como ocurriría en el biodigestor que se pretende diseñar. El inóculo que fue utilizado se basó en una mezcla de barros diluidos obtenidos de la planta de tratamientos de efluentes domiciliarios de AySA (Agua y Saneamientos Argentinos) y del reactor anaeróbico de la planta de tratamiento de efluentes cloacales de COMACO (Cooperativa de Martin Coronado). Este inóculo se mantiene en condiciones estables que permiten la proliferación de los microorganismos, se encuentra en el Departamento de Evaluación y Control de la Contaminación y es utilizado en diversos ensayos anaeróbicos del INTI.

Metodología del ensayo

Los ensayos se realizaron siguiendo la misma metodología para poder obtener resultados comparables. En este caso la metodología consistió en:

1. Caracterización de sólidos totales, fijos y volátiles, demanda química del oxígeno (DQO) y pH del inóculo y de las muestras a utilizar.
2. Cálculo de la masa de sustrato e inóculo en base a los datos obtenidos en la caracterización y en las condiciones del ensayo a realizar.

3. Ajuste de pH en cada biorreactor con una solución de ácido clorhídrico 1M o de hidróxido de sodio 1M (en cuyo caso corresponda).

Los parámetros seleccionados para la caracterización de las muestras de sustratos son elementos esenciales para el desarrollo microbiano, y por ende para la determinación del potencial de generación de biometano. La variación del pH inhibe el crecimiento de los microorganismos, los sólidos volátiles permiten calcular la carga orgánica que recibirá el biodigestor dimensionado y la demanda química de oxígeno asegura que los compuestos utilizados como sustrato tengan la capacidad de oxidarse (la diferencia entre la DQO inicial y la final en el ensayo indica la eficiencia de la degradación microbiológica del inóculo utilizado).

			Metodologías utilizadas para la determinación de cada parámetro:		
Proporción de la muestra			PEF 19.33	SM 21° ed. Met 2560 G	PEF 19.01
Muestra (N)	Mayonesa (% vol.)	Grasas (% vol.)	pH	Sólidos Volátiles (% m/m)	DQO (g/kg)
2	100	0	4,06	47,31	499,0
6	70	30	4,62	37,10	447,4
5	40	60	4,69	26,89	395,8
4	27	73	4,89	22,47	373,4
7	10	90	5,05	16,68	344,2
3	0	100	5,34	13,28	327,0

Tabla 2 – Caracterización inicial de las muestras del ensayo¹⁶.

Antes de comenzar con el ensayo, debido a la dificultad de manipular los sustratos en el laboratorio, se los diluyó al 10%. Todos los cálculos consecuentes contemplan esta dilución y los resultados se expresan en función de la masa total del sustrato. Se debe tener en cuenta que la concentración de sólidos no debe superar el 12% de Sólidos Totales para evitar problemas en su conducción por bombeo y en la mezcla mecánica dentro del biodigestor (FAO, 2011).

Los ensayos se realizaron en reactores piloto, o botellas, y los datos iniciales que se obtuvieron fueron los siguientes:

¹⁶ Tabla de elaboración propia a partir de los datos obtenidos de la caracterización inicial de las muestras del “Informe técnico – Ensayo de producción de biometano” (INTI).

Botella N	Relación (g SV) Inóculo: Sustrato	ms (g de sustrato)	mi (g de inóculo)	Proporción del sustrato utilizado		pH inicial	Volumen de HCl 1M (ml)	pH ajustado
				Mayonesa (% vol.)	Grasas (% vol.)			
1	-	0	400	0	0	7,62	1,0	7,51
2	-	0	400	0	0	7,62	1,2	7,50
3	2:1	15,3	384,7	100	0	7,75	1,2	7,50
4	2:1	15,3	384,7	100	0	7,71	1,0	7,50
5	2:1	49,6	350,4	0	100	7,62	0,6	7,49
6	2:1	49,6	350,4	0	100	7,58	0,6	7,50
7	2:1	30,9	369,1	27	73	7,58	0,6	7,50
8	2:1	30,9	369,1	27	73	7,60	0,5	7,50
9	2:1	26,1	373,9	40	60	7,75	1,2	7,50
10	2:1	26,1	373,9	40	60	7,62	1,2	7,48
11	2:1	40,5	359,5	10	90	7,64	0,6	7,50
12	2:1	40,5	359,5	10	90	7,65	0,7	7,50
13	2:1	19,3	380,7	70	30	7,73	0,9	7,49
14	2:1	19,3	380,7	70	30	7,78	1,2	7,49

Tabla 3 – Datos iniciales del ensayo para cada uno de los reactores o botellas¹⁷.

Resultados de los ensayos

Se realizaron cálculos con los datos obtenidos de la caracterización de las muestras en la Tabla 2 y con los valores iniciales obtenidos de los reactores de la Tabla 3 para estimar los valores de los sólidos volátiles y de la demanda química de oxígeno.

Luego se realizó la medición de los valores de pH final de cada uno de los reactores, se unieron los volúmenes de los reactores y se realizó un ensayo de sedimentación y de determinación de la DQO sobre estos. El ensayo de sedimentación consistió en dejar reposar los reactores unificados por 24 horas para identificar los diferentes volúmenes y proporciones sobrenadante en comparación al lodo, y en medir la demanda química de oxígeno del

¹⁷ Tabla de elaboración propia a partir de los datos obtenidos de la caracterización inicial de los reactores o botellas del “Informe técnico – Ensayo de producción de biometano” (INTI).

sobrenadante como medida de eficiencia del proceso de digestión al compararlo con los valores originales.

Los resultados obtenidos se encuentran resumidos en la siguiente tabla:

Botella N	Mayonesa (% vol.)	Grasas (% vol.)	pH final	Sedimentación		
				Volumen total (ml)	Volumen total de barro (ml)	Volumen total del sobrenadante (ml)
1	0	0	8,26	740	170	570
2	0	0	8,27			
5	0	100	8,23	740	180	560
6	0	100	8,18			
11	10	90	8,19	740	180	560
12	10	90	8,14			
7	27	73	8,21	740	180	560
8	27	73	8,19			
9	40	60	8,19	750	190	560
10	40	60	8,2			
13	70	30	8,19	760	180	580
14	70	30	8,16			
3	100	0	8,23	750	190	560
4	100	0	8,23			

Tabla 4 – Resultados de la sedimentación para cada uno de los reactores o botellas¹⁸.

Cabe resaltar que el volumen de barro obtenido en cada uno de los reactores se encuentra en valores similares. Esta conclusión es relevante a la hora de dimensionar el biodigestor, puede argumentarse que la proporción de mayonesa y grasas es independiente del volumen de barro obtenido en 24 horas.

El ensayo de determinación de la DQO del sobrenadante de los reactores determinará la eficiencia en la remoción de la DQO inicial. Se debe tener en cuenta que este ensayo se realizó a escala laboratorio y que las condiciones se considerarán ideales.

Los resultados obtenidos se encuentran resumidos en la siguiente tabla:

¹⁸ Tabla de elaboración propia a partir de los resultados de la sedimentación de los reactores o botellas del “Informe técnico – Ensayo de producción de biometano” (INTI).

Botella N	Mayonesa (% vol.)	Grasas (% vol.)	DQO inicial mezcla (g)	DQO salida sobrenadante (g)	DQO salida mezcla (g)	Remoción DQO considerando DQO inicial y final de la mezcla (%)
3, 4	100	0	6.331	660	5.055	-20,2%
5, 6	0	100	8.085	605	4.973	-38,5%
7, 8	27	73	7.128	678	4.832	-32,2%
9, 10	40	60	6.886	601	4.883	-29,1%
11, 12	10	90	7.620	573	5.948	-21,9%
13, 14	70	30	6.536	637	5.421	-17,1%

Tabla 5 - Resultados de la determinación de la remoción de la DQO para cada uno de los reactores o botellas¹⁹.

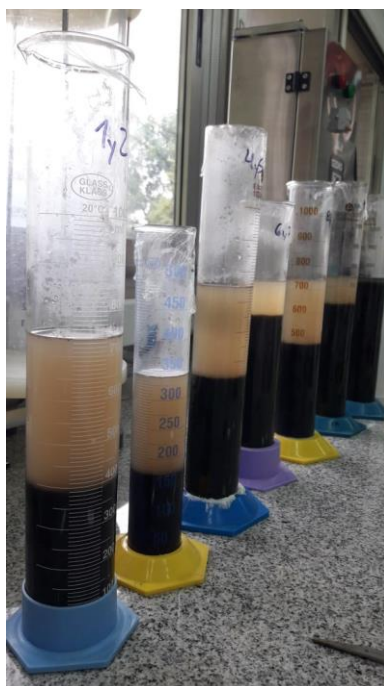


Imagen 2 - Fotografía tomada durante la realización de los ensayos de sedimentación sobre las muestras por la Ingeniera Ambiental Agustina Rodríguez Saracho, 2020.

Estimación del potencial de generación de biogás

Se deben tener en cuenta algunas suposiciones al determinar el potencial de generación de biometano de los distintos reactores, en base a las características obtenidas al final del

¹⁹ Tabla de elaboración propia a partir de los resultados de la determinación de la remoción de la DQO de los reactores o botellas del “Informe técnico – Ensayo de producción de biometano” (INTI).

ensayo, utilizando cálculos. Como lo indica la memoria de cálculo en el Anexo 1.a, se asumen condiciones anaeróbicas y un comportamiento ideal de los gases generados por la descomposición de la materia orgánica (que a su vez se asume será en su totalidad glucosa). Se calculan entonces los valores de la siguiente tabla:

Botella N	Mayonesa (% vol.)	Grasas (% vol.)	DQO inicial mezcla (g)	DQO final mezcla (g)	DQO removido (g)	Volumen de CH ₄ Teórico (ml)	Potencial de generación de metano (ml CH ₄ / g sustrato)	Potencial de generación de metano (ml CH ₄ / g SV)
3, 4	100	0	6.331	5.055	1.276	446,6	291,90	581,07
5, 6	0	100	8.085	4.973	3.112	1.089,2	219,60	1.577,36
7, 8	27	73	7.128	4.832	2.296	803,6	260,06	1.104,13
9, 10	40	60	6.886	4.883	2.003	701,1	268,60	945,95
11, 12	10	90	7.620	5.948	1.672	585,2	144,49	825,37
13, 14	70	30	6.536	5.421	1.115	390,3	202,20	517,14

Tabla 6 – Cálculo teórico de la generación de metano utilizando los resultados del ensayo²⁰.

En el laboratorio, se realizó un análisis de generación de metano dejando actuar al inóculo durante 15 a 60 días. Sin embargo, cuando la producción de gases se volvió despreciable (producción de gases menor a 5 Nml por día) se detuvo el ensayo. En base a este ensayo se determinó la siguiente tabla:

Botella N	Mayonesa (% vol.)	Grasas (% vol.)	Volumen de CH ₄ (Nml)	Periodo de generación promedio (d)	Promedio de CH ₄ (Nml)	Potencial de generación de metano (ml CH ₄ / g SVs)	Potencial de generación de metano (ml CH ₄ / g sustrato)
1	0	0	16,3	2	20,3	-	-
2	0	0	24,2				
3	100	0	321,7	7	329,95	429,3	203,1
4	100	0	338,2				
5	0	100	403,4	18	386	559	74,2
6	0	100	368,6				
7	27	73	426,3	9	414,2	569,1	127,9
8	27	73	402,1				
9	40	60	362,8	10	366,7	494,8	133,1
10	40	60	370,6				
11	10	90	391,4	13	388,4	547,8	91,4
12	10	90	385,4				
13	70	30	385,7	9	374,45	496,2	184,1
14	70	30	363,2				

²⁰ Tabla de elaboración propia a partir de cálculos basados en los resultados del “Informe técnico – Ensayo de producción de biometano” (INTI).

Tabla 7 – Resultados del potencial de generación de biometano para cada uno de los reactores o botellas²¹.

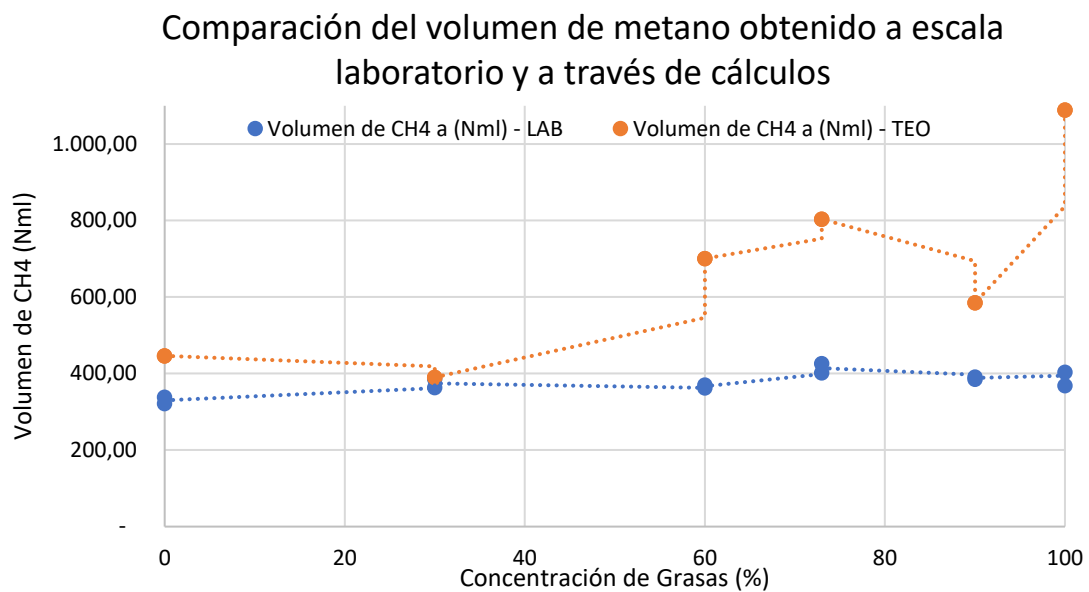


Gráfico 3 – Comparación entre el volumen de metano esperado en base a cálculos teóricos y condiciones ideales y el volumen de metano obtenido a escala laboratorio²².

En el Gráfico 3 se observan los distintos resultados obtenidos a escala laboratorio en contraste con el volumen de metano esperado por los cálculos teóricos que se basan en la cantidad de DQO removida de cada una de las muestras. El eje horizontal del Gráfico 3 representa la concentración de grasas del reactor, por lo que se comienza analizando el reactor que utilizó como sustrato solamente a la mayonesa devenida de la purga de las líneas de producción. De este gráfico se plantean hipótesis y conclusiones que explican dichas desviaciones como:

- La mayonesa es susceptible de contener una mayor cantidad de glucosa; molécula de la cual se parte para el análisis de generación de metano teórico o esperado. De manera que la diferencia entre la generación de metano teórico y a escala laboratorio será mayor, a mayor contenido de grasas en el reactor.
- El gas generado por la acción del inóculo no tiene un comportamiento ideal. Esto puede deberse a que el reactor no se encontraba en condiciones normales de presión y temperatura, afectando el comportamiento del gas.

²¹ Tabla de elaboración propia a partir de los resultados del potencial de generación de biometano del “Informe técnico – Ensayo de producción de biometano” (INTI).

²² Gráfico de elaboración propia comparando de los resultados del potencial de generación de biometano del “Informe técnico – Ensayo de producción de biometano” (INTI) y el potencial de generación teórico en base a cálculos (basado en la remoción de DQO presentada en los ensayos).

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos y los cálculos realizados, se entiende que la mayonesa se degrada más rápido que la grasa, pero que produce un volumen menor de metano en consecuencia. Con el inóculo utilizado, la degradación de la mayonesa alcanza un rendimiento de generación de metano aproximadamente 65% mayor que el de las grasas.

Si se desea conocer cuál es la composición que maximiza el potencial de generación de metano en base a los promedios de las tasas de generación de metano obtenidos en el laboratorio, se puede utilizar el siguiente cuadro:

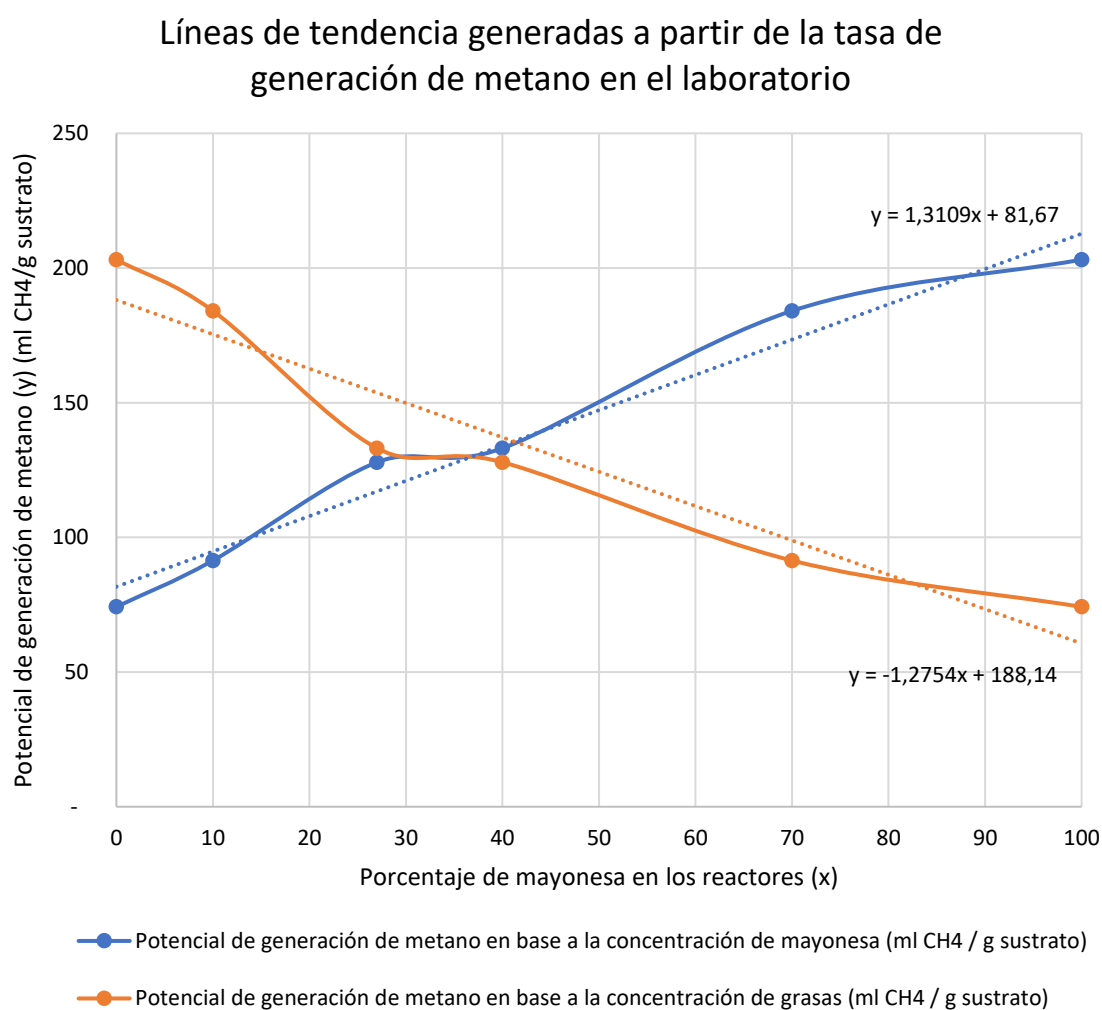


Gráfico 4 – Comparación del potencial de generación de metano en base a la composición de mayonesa y grasa obtenido a escala laboratorio²³.

Al igualarse las ecuaciones de tendencia se obtiene la concentración que maximiza el potencial de generación de metano:

²³ Gráfico de elaboración propia comparando de los resultados del potencial de generación de biometano del “Informe técnico – Ensayo de producción de biometano” (INTI) en base a la concentración de purgas de mayonesa y grasas en los reactores o botellas.

$$1,3109 X_{mayonesa} + 81,67 = -1.2754 X_{mayonesa} + 188,14$$

$$1,3109 X_{mayonesa} + 1.2754 X_{mayonesa} = 188,14 - 81,67$$

$$2,5863 X_{mayonesa} = 106,47$$

$$X_{mayonesa} = 41,17\%$$

$$X_{grasa} = 100 - X_{mayonesa} = 58,83\%$$

Si se tiene en cuenta la situación más cercana a la realidad, el caso del reactor con un volumen de sustrato de grasas de 73% y de mayonesa de 27%, se logra un resultado 37% menor al ideal de la mayonesa por sí sola en términos de generación de metano por unidad de sustrato, pero alcanzando el tiempo máximo de generación de metano alrededor de los 9 días. En los cálculos teóricos, esta combinación de sustratos alcanzó el segundo pico de generación de volumen de metano en base a la DQO removida, por lo que existe la oportunidad de mejorar la tasa de generación interviniendo sobre parámetros que aumenten la actividad microbiana; como la adición de calor o mayor movimiento de la mezcla para aumentar el contacto entre el sustrato y los microorganismos.

Dimensionamiento del Biodigestor In Situ

Se analizará la posibilidad de instalar un biodigestor anaerobio dentro del predio de la fábrica que sea susceptible de recibir la mayor cantidad posible de residuos y transformarlos en energía sin que estos salgan de los límites de la fábrica. De esta manera, el reciclaje ocurrirá dentro del alcance del sistema de gestión ambiental, reduciendo el impacto de los residuos significativamente (al no ser contabilizados en el indicador interno de residuos) y proveyendo energía que contribuirá al plan de neutralización de emisiones de carbono de la planta.

En el caso de estudio, los procesos industriales resultan en efluentes con elevada carga orgánica, creando la oportunidad de utilizar un reactor anaeróbico adicional al tratamiento existente, para obtener biogas como subproducto. Este tiene la capacidad de ser usado como reemplazo directo del gas natural sin mayores modificaciones en la red; aunque menos eficiente energéticamente, reduce significativamente la huella de carbono. Según Winkler (2000), los procesos anaerobios de digestión, en comparación con los procesos aerobios, pueden lidiar con concentraciones de sustratos más elevadas, descomponer las materias grasas, evitar olores, salpicaduras e intrusiones de insectos u animales (por estar necesariamente cerrados para aislar al oxígeno del ambiente). Sin embargo, son más lentos (requieren mayor tiempo de retención) y suelen ser más costosos en cuanto a la inversión inicial.

El sistema adicional se dimensiona para recibir un ingreso de residuos de 4.335 toneladas anuales, 75% del ingreso corresponde a las grasas y el 25% restante a purgas de las líneas de producción. El potencial de generación de metano para estas cantidades es aproximadamente 517.356 m³ anuales utilizando los valores obtenidos en el análisis de laboratorio, y de 1.051.962 m³ anuales utilizando los valores teóricos. Se espera que el valor real obtenido del biodigestor se encuentre cercano al valor obtenido del laboratorio.

El sistema de tratamiento adicional puede dividirse en las siguientes áreas:

1. Tanque de ecualización.
2. Biodigestor anaeróbico.
3. Purificador del biogás.
4. Compostaje del digerido.

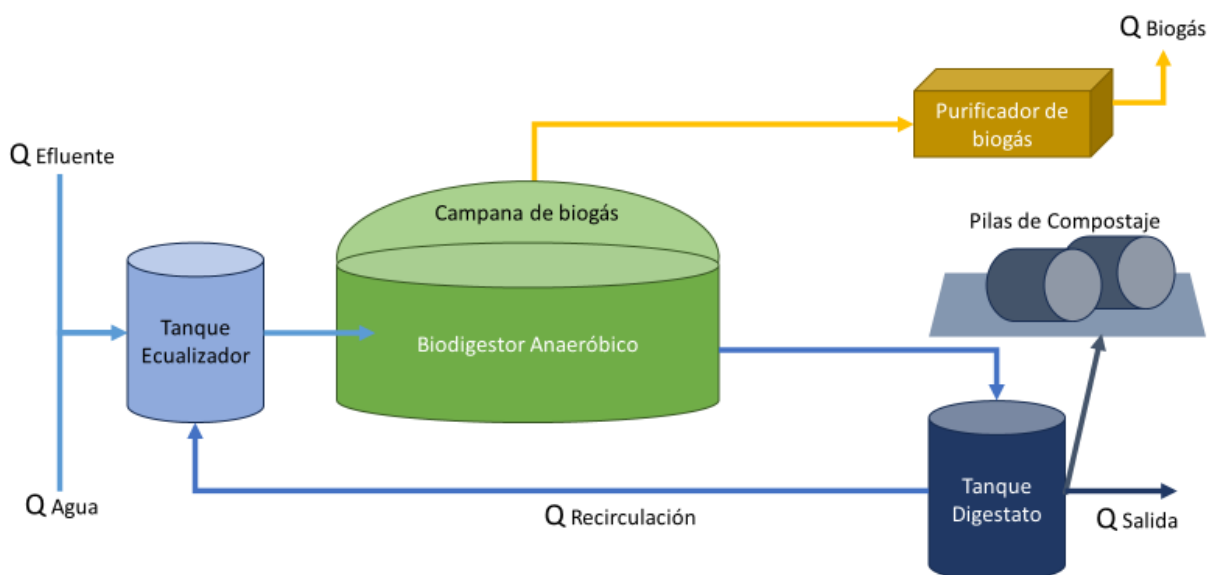


Ilustración 6 – Etapas del sistema de tratamiento adicional que se abordará en el dimensionamiento²⁴.

Caudal de diseño

El primer paso para el diseño del sistema es comprender los caudales que ingresarán y circularán por el mismo. Este es el parámetro de diseño más importante para interpretar el tamaño real de los distintos elementos y entender si se dispone de espacio suficiente en la fábrica.

A partir del caudal de entrada se calcula el caudal de recirculación, factor clave para mantener la temperatura del biodigestor estable y a los microorganismos activos.

²⁴ Ilustración de elaboración propia, debe aclararse que es una simplificación del proceso.

En el Anexo 1.b, se encuentran los cálculos realizados que determinan los caudales de entrada, recirculación y entrada de agua para mantener los sólidos totales menores a 12% (FAO, 2011), para evitar problemas en las bombas que trasladarán al efluente a través del sistema de tratamiento. Los valores de los caudales de diseño son los siguientes:

$$Q_{Entrada} = 9,35 \frac{m^3}{día}$$

$$Q_{Recirculación} = 4,25 \frac{m^3}{día}$$

$$Q_{Agua} = 20,4 \frac{m^3}{día}$$

Dimensiones del tanque de ecualización

Se deberá dimensionar un tanque de homogenización o ecualización previo al biodigestor anaeróbico para estabilizar los parámetros del efluente a tratar. Para lograr una homogenización apropiada, se utiliza un tiempo de retención de dos días.

De acuerdo con los cálculos del Anexo 1.c, se definen las siguientes características para un tanque de ecualización cilíndrico que reciba 34 m³ diarios, con un tiempo de retención de dos días:

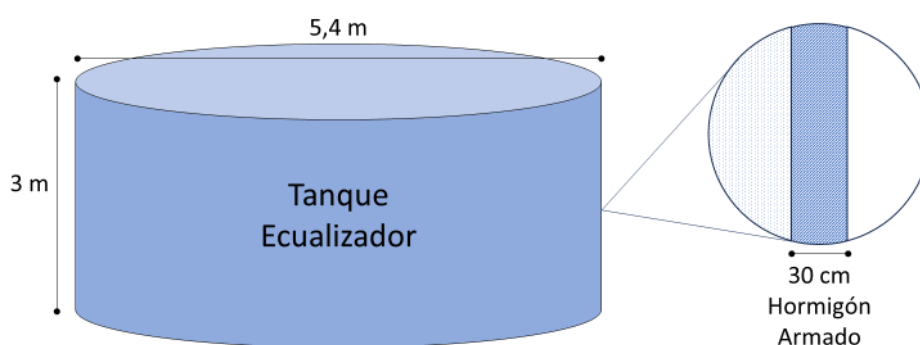


Ilustración 7 – Dimensiones del tanque de ecualización²⁵.

Se define el material de construcción del tanque de hormigón armado de 30 cm de espesor.

Dimensiones del biodigestor

Según Winkler (2000), al hablar de digestores convencionales, el tiempo de residencia en condiciones mesofílicas (30-35°C) se encuentra como mínimo en los 10 o 12 días. Además, la

²⁵ Ilustración de elaboración propia en base a los resultados obtenidos en el Anexo 1.c: Cálculos para el dimensionamiento del tanque de ecualización.

entrada de efluentes al sistema cerrado suele hacerse más de una vez al día, mientras que las extracciones suceden semanal o diariamente. Se deberá tener en cuenta que los sólidos totales no superen 12% de concentración (FAO, 2011), ya que valores mayores podrían obstruir el transporte del efluente y la mezcla a través de las bombas del sistema; por lo que se utilizará el caudal total calculado en el Anexo 1.b.

Al basarse en los resultados obtenidos en planta, se opta por diseñar un reactor anaerobio de manto ascendente (también conocido como UASB²⁶ por sus siglas en inglés). En este proceso, como es descrito por Metcalf & Eddy (1995), la corriente afluyente entra en contacto con las partículas formadas por el ecosistema de bacterias que habitan dentro del reactor, las cuales liberan el biogás al degradar la materia oxidable del efluente a tratar. El flujo es ascendente debido a que el efluente a tratar se introduce por la parte inferior del reactor, al adherirse a partículas biológicas son degradadas a compuestos gaseosos, lo cual crea una corriente ascendente de partículas. Los gases son liberados al entrar en contacto con la superficie y son recolectados para su posterior tratamiento y uso. Las partículas desgasificadas vuelven a caer hasta la superficie del fango en el fondo. Para aumentar la homogenización entre el fango y el líquido se utilizan mezcladores (ver Ilustración 3).

En el Anexo 1.d, se define que la planta Pilar de Unilever tendrá un biodigestor anaerobio cilíndrico de base cónica (con pendiente hacia un punto de extracción de fangos digeridos), de funcionamiento tipo manto ascendente (o UASB). A raíz de estas características, se calculan las dimensiones del biodigestor con el método de retención celular.

El biodigestor que recibirá los 34 m³ diarios del tanque de ecualización, tendrá un diámetro de 12 m y una altura de 5,96 m (sin tener en cuenta la altura de la campana) para asegurar un tiempo de retención celular de 17 días. Además, la forma cónica con una inclinación de 11,2°, facilitará el drenaje del barro consecuente desde un punto fijo en el sistema. El material de construcción, al igual que el tanque de ecualización descrito anteriormente, será de hormigón armado de 30 cm de espesor.

La mezcla de los gases resultantes de la digestión con el aire puede dar como resultado una mezcla explosiva, por lo que se deberán incluir parallamas en las tuberías y válvulas de gas del sistema de conducción de gas. El gas no consumido se debe quemar con antorcha para disminuir el efecto invernadero del metano, ya que al oxidarse se convierte en dióxido de carbono.

²⁶ Upflow Anaerobic Sludge Blanket.

Las dimensiones calculadas para el biodigestor pueden resumirse en la siguiente ilustración:

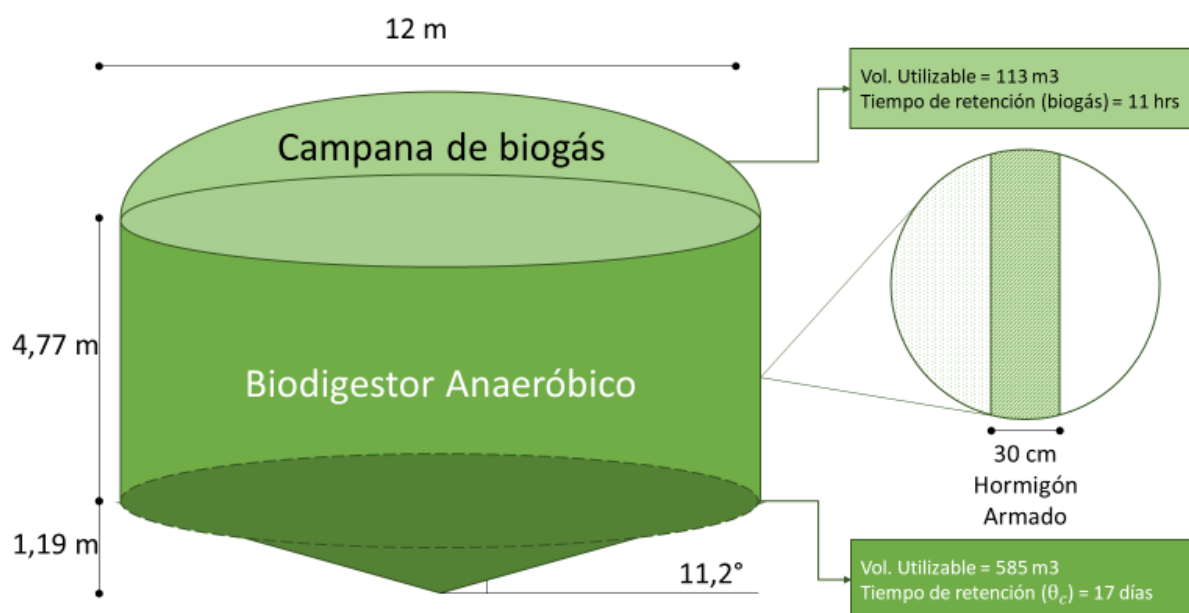


Ilustración 89 – Dimensiones del tanque biodigestor²⁷.

Como se denota en la Ilustración 6, desde el biodigestor se desprenderán dos corrientes en dos fases diferentes: El biogás generado que debe ser purificado en estado gaseoso y el fango digerido que se dirigirá al tanque digestato.

Dimensiones del tanque de almacenamiento de digestato

Se deberá dimensionar un tanque de almacenamiento de digestato posterior al biodigestor anaeróbico para captar el efluente líquido tratado y ser capaz de recircularlo (es decir, enviarlo al tanque de equalización) de ser necesario o de enviarlo a su disposición final (pilas de compostaje para la parte sólida y la planta de tratamiento de efluentes para la parte líquida).

De acuerdo con los cálculos del Anexo 1.e, se definen las siguientes características para un tanque de almacenamiento de digestato de forma cilíndrica que reciba 34 m³ diarios de efluente tratado del biodigestor y pueda disponer 3,26 m³ diarios de lodo, con un tiempo de retención de 30 días:

²⁷ Ilustración de elaboración propia en base a los resultados obtenidos en el Anexo 1.d: Cálculo de las dimensiones del biodigestor.

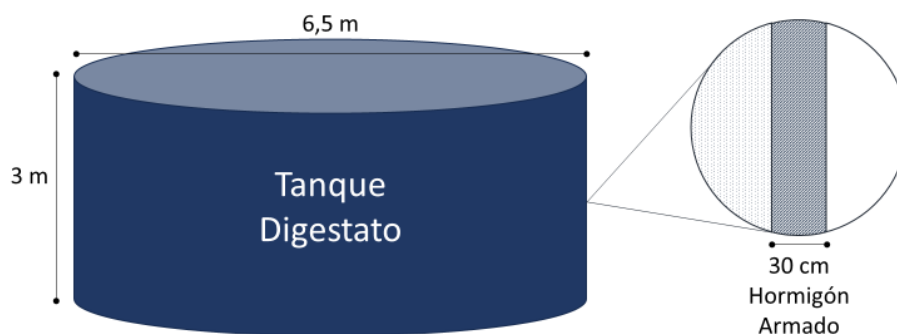


Ilustración 949 – Dimensiones del tanque digestato²⁸.

Se define el material de construcción del tanque de hormigón armado de 30 cm de espesor.

Dimensiones del purificador de biogás

El purificador de biogás es necesario para poder aumentar la capacidad calorífica del biogás de manera que aumente la concentración de biometano en la corriente gaseosa. Una vez purificado el gas, se utilizará para alimentar las calderas de la producción, reemplazando al gas natural.

Para determinar las dimensiones aproximadas del purificador de biogás, se debe determinar las distintas instancias de tratamiento que recibirá el biogás que sale de la campana del biodigestor. Se determinarán las especificaciones de los siguientes tratamientos:

1. Depuración de vapor de agua.
2. Depuración de ácido sulfhídrico.

Se asumirá que el resto de las impurezas que conforman el biogás serán insignificantes y no se tendrán en cuenta en los cálculos posteriores.

Depuración de vapor de agua

De acuerdo con los cálculos realizados en el Anexo 1.f, se generan 10 kg de vapor de agua diarios dentro de la generación de biogás. Por lo que se deberá elegir un equipo de trampa de vapor de agua para que capture como mínimo dicha cantidad diaria.

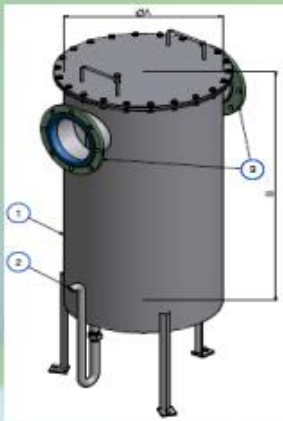
Se elige al proveedor Aqualimpia, empresa alemana de ingeniería integral especializada en instrumentos de depuración de biogás, así como en la instalación de biodigestores industriales. Las trampas de condensado que ofrece actúan por mecanismos ciclónicos,

²⁸ Ilustración de elaboración propia en base a los resultados obtenidos en el Anexo 1.e: Cálculos para el dimensionamiento del tanque de almacenamiento de digestato.

permitiendo así reducir, no solo el contenido de vapor, sino también partículas sólidas que puedan haber sido arrastradas por el flujo gaseoso y que puedan dañar sistemas posteriores.

Los modelos varían en base al caudal de biogás que son susceptibles de recibir:

APLICACIONES Y DIMENSIONES



1. Cuerpo
2. Sifon (1")
3. Entrada / Salida de gas

Modelo	Diámetro	Altura	Caudal	Conexión
	A in mm	B in mm	Nm ³ /h	DN
AQLCP01	300	800	< 200	80
AQLCP02	480	1000	200 - 400	125
AQLCP03	640	1200	400 - 750	200
AQLCP04	955	1400	750 - 1200	250
AQLCP05	1273	2100	1200 - 1800	300

Ilustración 1012 – Porfolio de trampas de condensado de Aqualimpia²⁹.

Se selecciona el modelo AQLCP01 debido al caudal de gas por hora estimado de 10 m³. Las dimensiones de este modelo de forma cilíndrica dan como resultado un volumen de 0,057 m³. Si el equipo recibe 10 kg de agua diarios del biogás, recibirá a su vez 0,01 m³ de agua diarios; por lo que podrán pasar alrededor de 6 días antes de que se llene por completo. Se recomienda vaciar el equipo con una frecuencia máxima de cada 3 días para asegurar su correcto funcionamiento, o bien optar por un vaciado por sifón cuidando que el agua sea dirigida o almacenada correctamente. El efluente resultante de la trampa de condensado será susceptible de ser devuelto a la planta de tratamiento de efluentes.

²⁹ Ofrecido por Aqualimpia, agosto 2023 ([https://www.purificacion-biogas.com/espa%C3%B1ol-filtro-de-condensados/](https://www.purificacion-biogas.com/espa%C3%B1ol/filtro-de-condensados/)).

Depuración de ácido sulfhídrico

De acuerdo con los cálculos realizados en el Anexo 1.g, se generan 1,8 kg de ácido sulfhídrico diarios dentro de la generación de biogás. Por lo que se deberá elegir un equipo de adsorción de carbón activado para que capture como mínimo dicha cantidad diaria.

Se elige nuevamente al proveedor Aqualimpia por su filtro de carbón activado para la adsorción de las partículas de ácido sulfhídrico y de siloxanos. Este filtro tiene una vida útil media de alrededor de 20 años para asegurar su viabilidad económica en el tiempo, si se mantiene adecuadamente. Para asegurar su correcto funcionamiento, se debe realizar un mantenimiento anual a través del lavado inverso con aire limpio o bien la incineración del filtro a 200°C durante un corto período de tiempo. No se abordará en este caso la evaluación económica del mantenimiento anual del filtro de carbón activado

Se ofrecen varios modelos dependiendo de en qué parte del proceso se situará el equipo (antes o después del soplador o unidad de cogeneración). Debido al caudal de biogás que se estima para el caso de estudio se selecciona el filtro de carbón activado AQL100ST, cuyas especificaciones son:

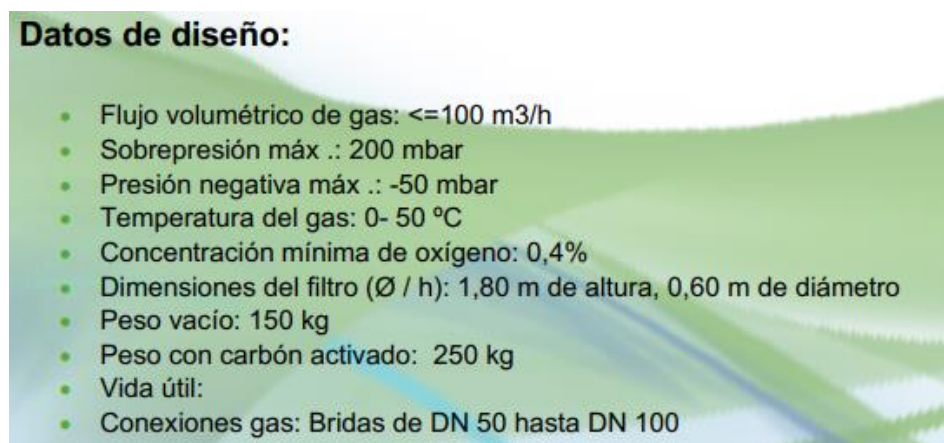


Ilustración 113 – Especificaciones Filtro AQL100ST de acero inoxidable³⁰.

Dimensiones del área de compostaje

El digestato consecuente del proceso de digestión anaeróbica será utilizado para producir compost que será vendido o regalado a los proveedores de materias primas de la fábrica.

El compostaje en condiciones aerobias acelera la descomposición de la materia y da lugar a un aumento de temperatura suficiente para la destrucción de patógenos y la

³⁰ Ofrecido por Aqualimpia, agosto 2023 (<https://www.aqualimpia.com/biodigestores/biogas-purificacion/>).

minimización de olores desagradables (a medida se descompone, puede alcanzar temperaturas de entre 40°C a 70°C). Por simplicidad y para aprovechar mejor el espacio libre en la fábrica, se utilizará un sistema de pila estática aireada para el tratamiento del digestato resultante; y así transformarlo en compost.

El principio de funcionamiento de este sistema está constituido por una red de tuberías de plástico que conducen aire sobre las cuales se distribuye una mezcla de fango deshidratado y material de soporte o estructural (como astillas de madera) para aumentar la superficie de acción del aire.

Las pilas tienen una altura promedio de 2 a 2,5 metros de alto, estarán cubiertas para evitar la dispersión de olores. Los tiempos típicos de compostaje se encuentran alrededor de las tres semanas, con un mes adicional de maduración (dos meses en total). El compostaje podrá utilizarse para el digestato obtenido en el funcionamiento del biodigestor anaerobio, así como para el barro resultante de la operación de la planta de efluentes.

Para calcular el valor del caudal que recibirá la pila de compostaje por parte del biodigestor anaerobio, se debe tener en cuenta que previo a la maduración de este debe extraerse el agua para disminuir el volumen. Se utilizará el equipo de filtro de bandas existente en la fábrica. La eficiencia de remoción de agua de este equipo se encuentra en alrededor de 60% (al ser un equipo de más de 10 años, su eficiencia se vio disminuida con el tiempo). Si aplicamos este factor de remoción de agua a las cantidades obtenidas de digestato (3,26 m3 diarios previo al filtro de bandas), se tendrán 1,96 m3 diarios.

Además, se considerará realizar el compostaje del barro de la planta de tratamiento de efluentes dentro de la planta en conjunto con el digestato proveniente del biodigestor, siempre y cuando el análisis químico y biológico lo permita. De esta manera, el volumen diario será de:

$$Q_{barroPTEL} = 850.000 \frac{kg}{año} = 2.329 \frac{kg}{dia}$$

Utilizando la densidad aproximada de barros tratados después de un tratamiento de efluentes de 1.005 kg/m3 (Laca Pérez y Díaz Fernández, 2019), se obtiene entonces:

$$Q_{barroPTEL} = \frac{2.329 \frac{kg}{dia}}{1.005 \frac{kg}{m^3}} = 2,32 \frac{m^3}{dia}$$

De esta manera, la zona de compostaje recibirá 4,28 m3 diarios durante dos meses; o bien 257 m3 considerando 60 días de operación. Si se diseñan las pilas para que tengan 2 metros de alto, ocuparán un área de 128,5 m2.

Si se asume una forma rectangular, con un ancho aproximado de 2 metros, ocuparán de largo 64,25 metros. Se dividirán a su vez en 4 pilas para permitir caminar entre las pilas y establecer un sistema de maduración claro, por lo que cada franja tendrá 16,1 metros de largo.

De esta manera, si cada día se disponen 4,28 m³ de mezcla de digestato y barros de la planta de tratamiento de efluente, y cada pila tiene una altura y ancho definido de 2 metros, cada día se llenará el equivalente a 6,7% de la pila. Es decir que cada pila se llenará en 15 días, permitiendo el descarte de la primer pila con dos meses de maduración cuando se comienza el llenado de la cuarta pila.

El efluente resultante del filtro de bandas volverá a la planta de tratamiento de efluentes, tal como es su funcionamiento actual. Se debe tener en cuenta que las pilas deben ser manejadas a través de un operario en un montacarga con pala frontal, debido al peso neto de la mezcla de digestato y barros de la planta de tratamiento de efluente. A su vez, el área destinada a almacenar las pilas de compostaje deberá estar aislada del suelo y las pilas cubiertas para evitar la escorrentía de efluente sin tratar.

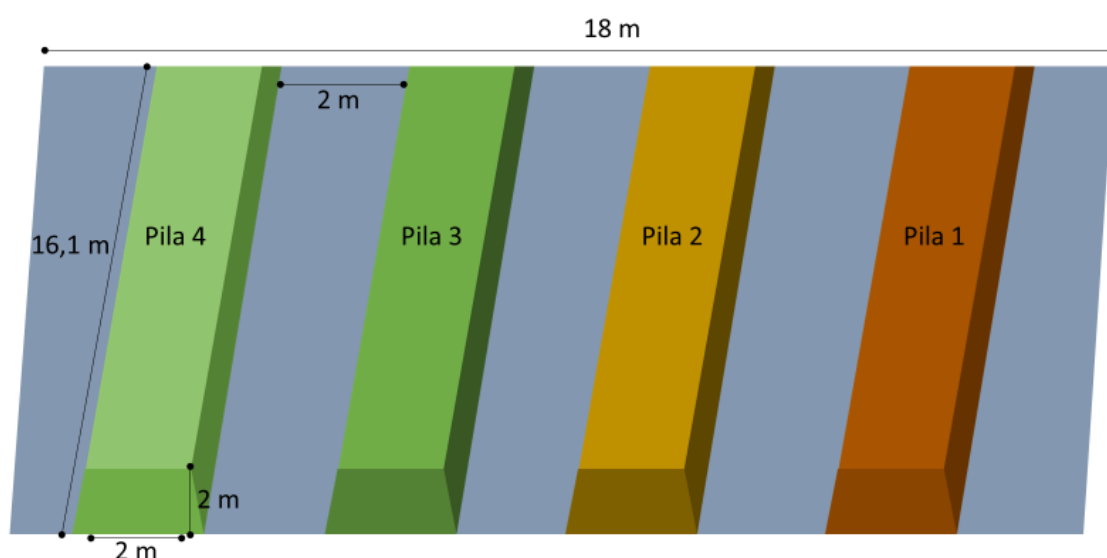


Ilustración [1244](#) – Pilas estáticas de compostaje en el orden de maduración³¹.

Sistema de calefacción del biodigestor

La calefacción del biodigestor es fundamental para mantener la temperatura de operación constante, de manera de eliminar una de las variables en la degradación de la materia orgánica y en la producción de biogás.

³¹ Ilustración de elaboración propia en base a los datos obtenidos en el dimensionamiento del área de compostaje.

El calor que debe aportarse al sistema puede caracterizarse en:

- Calor para aumentar la temperatura del afluente hasta alcanzar la temperatura interior del biodigestor.
- Calor para compensar las pérdidas de calor que se producen a través de las dimensiones del biodigestor (paredes, fondo y cubierta) y a través de las conexiones entre la fuente de calor y el tanque de digestión. Esta cantidad depende de la temperatura externa y como tal, variará a lo largo de las estaciones del año dependiendo del lugar en donde se encuentre.

La forma más eficiente de transferir el calor, en este caso, es con un intercambiador de calor o serpentín. Este puede estar situado en el exterior del sistema o puede recircular el fango calentado. Para el caso de estudio, se asume que el biodigestor tendrá un intercambiador de calor externo con agua como fluido térmico. En este caso la temperatura de funcionamiento seleccionada fue de 35°C, es decir, mesofílica.

Como se muestra en el Anexo 1.h, el calor a suministrar en el sistema para mantener su temperatura interna constante de 35°C, dependerá en mayor proporción de la energía que requiere calentar al efluente a 35°C más que de las pérdidas del sistema en sí. El Gráfico 5 muestra información relevante de la distribución del calor a suministrar en base a las temperaturas externas al biodigestor. El conjunto de temperaturas promedio diarias fueron extraídas del Servicio Meteorológico Nacional y corresponden a los últimos 12 meses desde su fecha de extracción, y provienen de la estación meteorológica más cercana a la fábrica, el Observatorio Pilar.

Pérdida de Calor Diaria del Biodigestor en base a las temperaturas promedio diarias registradas durante el último año

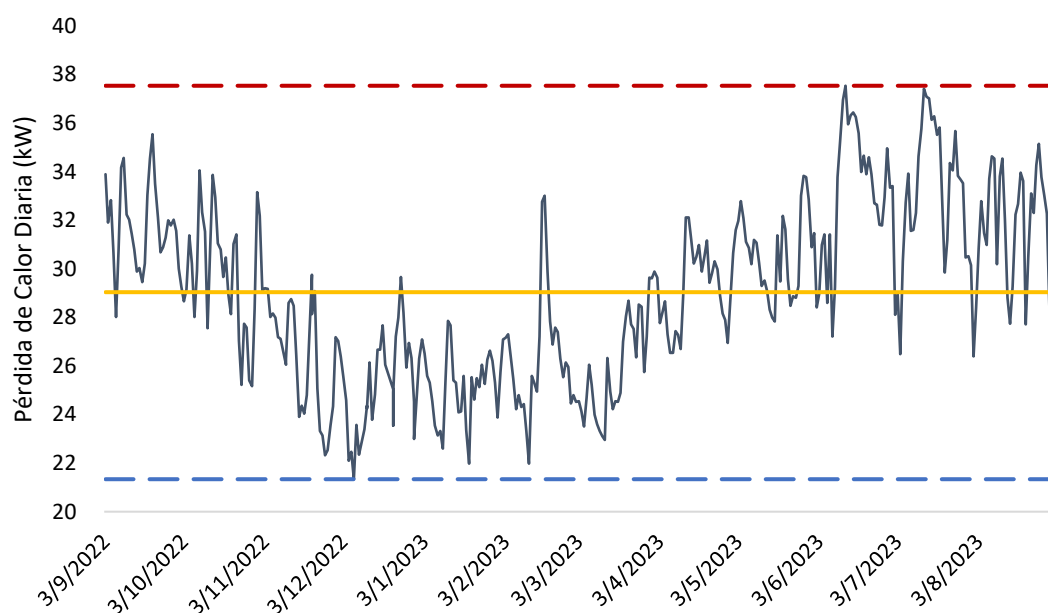


Gráfico 5 – Pérdida de calor diaria del biodigestor considerando: el consumo energético de mantener el efluente internamente a 35°C fijo y la pérdida de calor de las superficies del biodigestor en función de la temperatura diaria promedio del último año³².

El Gráfico 5 arroja un valor máximo del calor a suministrar de 37,5 kW durante el invierno, un valor promedio del calor a suministrar de 29 kW durante varias instancias del año y un valor mínimo del calor a suministrar de 21,3 kW durante el verano.

El Anexo 1.i describe los cálculos para dimensionar el serpentín que se utilizará para mantener el sistema en 35°C, aún en las temperaturas más frías registradas en los últimos 12 meses. El intercambiador de calor será de acero inoxidable, utilizará agua a 70°C como fluido térmico y la tubería tendrá 19,05 mm de diámetro interior con un espesor de 3 mm.

Para mantener la temperatura interior constante, a pesar de la pérdida de calor, el serpentín deberá dar 3 vueltas alrededor de un diámetro de 5 metros, con una separación de 1 metro entre cada vuelta. De esta manera, el sistema calentador tendrá una altura total de alrededor de 2,1 metros.

³² Gráfico de elaboración propia en base a los resultados obtenidos en el Anexo 1.h: Calefacción del biodigestor.

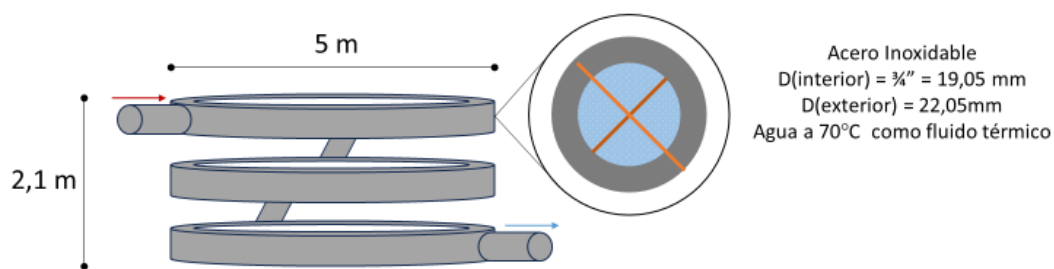


Ilustración 1345 – Dimensiones y características generales del intercambiador de calor a utilizar dentro del biodigestor³³.

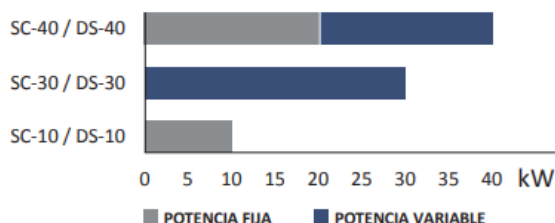
Para que la temperatura se mantenga constante a 35°C en el interior del biodigestor, se deben suministrar alrededor de 25 litros de agua caliente por minuto al intercambiador de calor. Esto puede lograrse instalando una caldera eléctrica de 30 kW de potencia en un ciclo cerrado, tal como se muestra en el Anexo 1.j.

La caldera seleccionada para realizar el calentamiento es el modelo *Advance SC30 Control-30 Kw - Calefacción-Potencia Variable-Acero Inoxidable* (Climatécnica, 2023), que utilizará energía eléctrica para calentar el agua desde alrededor de 55°C (asumiendo una pérdida en el trayecto desde la salida del biodigestor hasta la entrada del termotanque) hasta los 70°C. La cañería del serpentín y los orificios de conexión de la caldera eléctrica tienen el mismo diámetro de manera de minimizar las pérdidas de cargas.

³³ Ilustración de elaboración propia en base a los resultados obtenidos en el Anexo 1.i: Dimensionamiento del sistema de calefacción del biodigestor.

POTENCIAS y APLICACIONES

MODELOS		POTENCIA MAXIMA		PRESTACIONES	
SOLO CALEFACCION	DOBLE SERVICIO	KW	Kcal/h	SUPERFICIE CALEFACCION	AGUA CALIENTE
ADVANCE SC -10	ADVANCE DS -10	10	8600	Hasta 110 m ²	Solicitar asesoramiento
ADVANCE SC -30	ADVANCE DS -30	30	25800	Hasta 330 m ²	Hasta 2 puntos de consumo
ADVANCE SC -40	ADVANCE DS -40	40	34400	Hasta 440 m ²	Hasta 3 puntos de consumo



DIMENSIONES y CONEXIONES

Ref	Descripción	Medida Conexión
1	Alimentación Calefacción	H 3/4" BSP
2	Agua Caliente (ACS)	H 1/2" BSP
3	Ingreso Agua Fría	H 1/2" BSP
4	Retorno Calefacción	H 3/4" BSP
5	Llenado del Sistema	H 1/2" BSP

Ref	Medida
A	410 mm
B	320 mm
C	790 mm
D	137 mm
E	51 mm

Ref	Medida
F	116 mm
G	176 mm
H	295 mm
I	313 mm
K	51 mm

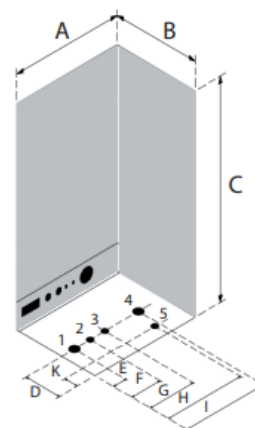


Ilustración 1446 - Especificaciones Advance SC30 Control-30 Kw de acero inoxidable³⁴.

Dimensionamiento hidráulico

Una vez dimensionados los elementos que conformarán al sistema integral de tratamiento de residuos orgánicos, se debe dimensionar la red de cañerías, tuberías y bombas que harán circular al efluente de un punto al otro. Como se explica en el alcance del proyecto, no se calcularán las pérdidas por las conexiones.

Los cálculos específicos de cada una de las líneas se detallan en el Anexo 3, para facilitar la trazabilidad a los cálculos, a cada tramo se le asigna una letra para poder simplificar las direcciones y especificaciones:

³⁴ Ofrecido por Climatécnica, octubre 2023 (<https://www.climatecnica.com/dl.3108.caldera-el-ctrlica-flowing-advance-caldera-el-ctrlica-flowing-advance-dimensionamiento-simplificado.pdf>).

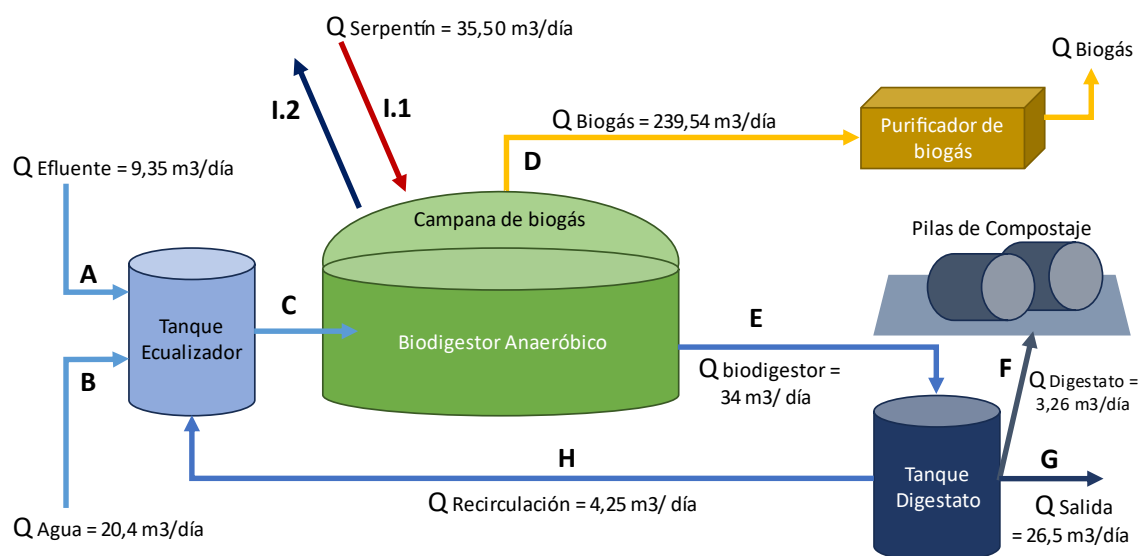


Ilustración 1547 – Etapas del sistema de tratamiento adicional, con los caudales de cada tramo, que se abordará en el dimensionamiento hidráulico³⁵.

Se utilizará acero inoxidable 304 como material para las cañerías de los tramos A, B, C, E, F, G, H, I.1 e I.2. Este material es resistente a la corrosión que pueda causar el efluente y permite trabajar con las temperaturas de trabajo del sistema biodigestor. Por otro lado, el tramo D (o línea de biogás) utilizará PVC como material de cañería, ya que es más efectivo al resistir la corrosividad del ácido sulfhídrico que contiene el biogás impuro.

Las características hidráulicas de cada tramo de cañería se resumen en la siguiente tabla:

Tramo	Diámetro (m)	Longitud Estimada (m)	Velocidad del fluido (m/s)	Caudal del fluido (m³/día)	Temperatura (°C)	Material de la tubería	Pérdida de carga (m)
A	0,0127	210	0,854	9,35	23	Acero Inoxidable	21,31
B	0,0191	152	0,828	20,40	23	Acero Inoxidable	8,62
H	0,0095	40	0,690	4,25	35	Acero Inoxidable	3,84
C	0,0254	15	0,777	34,00	23	Acero Inoxidable	0,52
E	0,0254	22	0,777	34,00	35	Acero Inoxidable	0,74
F	0,0254	13	0,600	3,26	35	Acero Inoxidable	0,27
G	0,0254	60	0,777	26,50	35	Acero Inoxidable	2,01
D	0,0762	127	0,610	239,54	35	PVC	0,77
I.1	0,0191	55	1,462	36,00	70	Acero Inoxidable	8,33
I.2	0,0191	62	1,462	36,00	55	Acero Inoxidable	9,53

Tabla 8 – Características hidráulicas de cada tramo de cañería del sistema biodigestor³⁶.

³⁵ Ilustración de elaboración propia en base a los resultados obtenidos en el Anexo 1.

³⁶ Tabla de elaboración propia en base a los resultados obtenidos en el Anexo 3.

Las pérdidas de carga aumentan la resistencia al movimiento del fluido. En el caso de estudio, se deberán analizar la necesidad de utilizar bombas para inducir el flujo uniforme de cada tramo, lo que significa un gasto energético adicional a la fábrica. Los cálculos de las bombas se detallan en el Anexo 4.a:

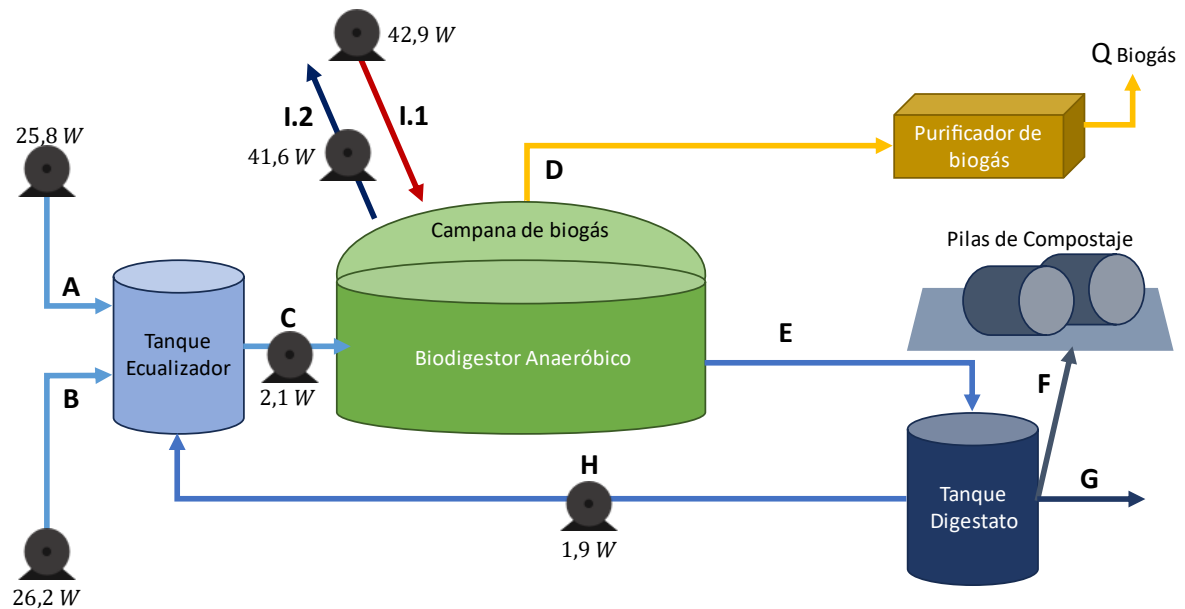


Ilustración 1618 – Etapas del sistema de tratamiento adicional, con las bombas y sopladores (de ser necesarios) de cada tramo³⁷.

El sistema biodigestor utilizará un mezclador para optimizar su funcionamiento y rendimiento de biogás. Se usará un medio de agitación mecánica con dos ejes con paletas de baja velocidad de giro para homogenizar los efluentes y liberar las partículas de gas. Se opta por usar agitadores mecánicos de hélice para este trabajo, se detallan los cálculos en el Anexo 4.b.

³⁷ Ilustración de elaboración propia en base a los cálculos detallados en el Anexo 4.a.

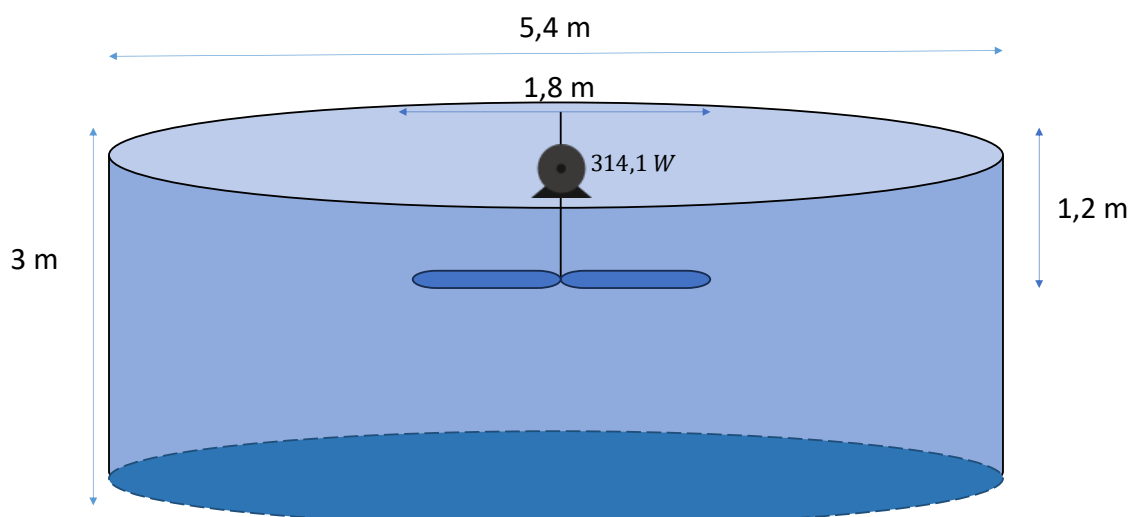


Ilustración 1749 – Dimensionamiento interno del tanque de ecualización, incluyendo el diámetro, largo y potencia de la hélice utilizada para homogenizar el efluente³⁸.

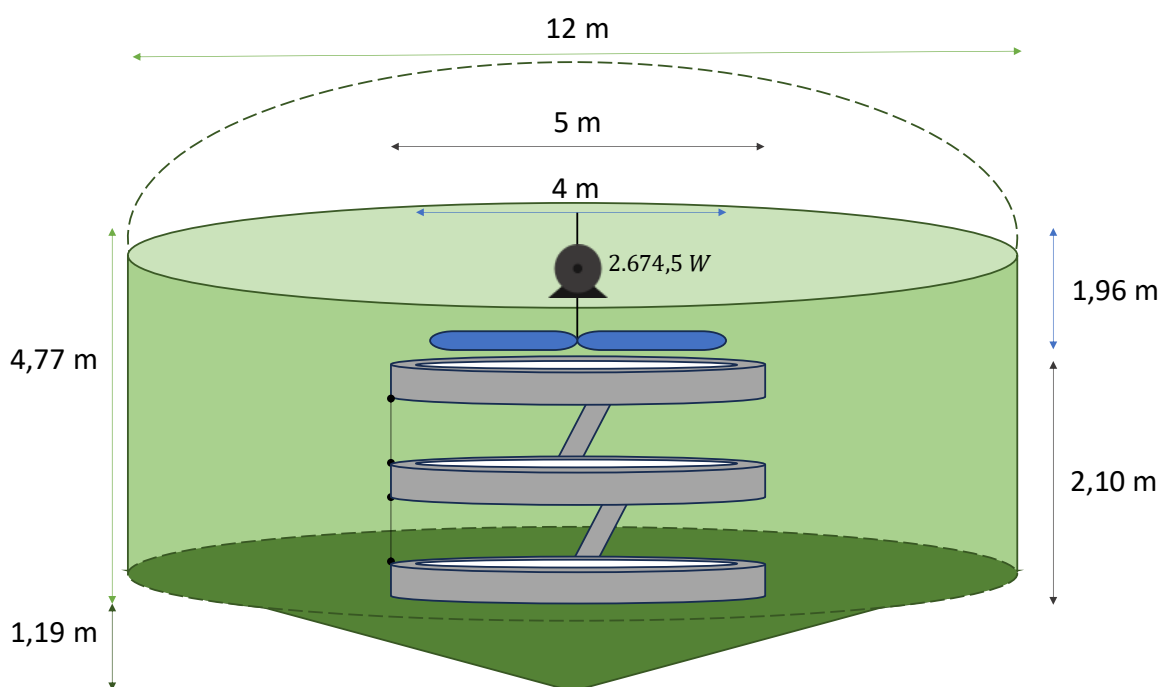


Ilustración 1820 – Dimensionamiento interno del tanque del biodigestor, incluyendo el diámetro, largo y potencia de la hélice utilizada para homogenizar el efluente y asegurar una reacción anaeróbica eficiente³⁹.

³⁸ Ilustración de elaboración propia en base a los cálculos detallados en el Anexo 4.b.1.

³⁹ Ilustración de elaboración propia en base a los cálculos detallados en el Anexo 4.b.2.

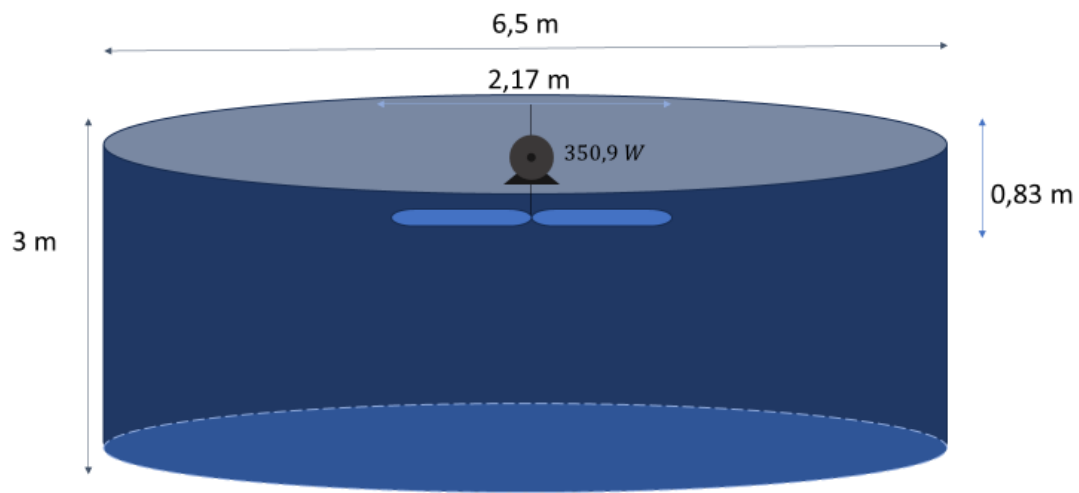


Ilustración ~~1921~~ – Dimensionamiento interno del tanque de digestato, incluyendo el diámetro, largo y potencia de la hélice utilizada para homogenizar el efluente antes de ser recirculado o enviado a la planta de tratamiento de efluentes⁴⁰.

El gasto total energético para el movimiento y homogenización del fluido se estima en 3.451 kW.

Impacto Ambiental

La instalación del sistema biodigestor al sistema de tratamiento actual de la fábrica debe llevarse a cabo cuidando las variables de operación. Ya sea para controlar el proceso o para controlar que las variables no excedan límites legales. Se propone el siguiente plan de monitoreo adicional al que se lleva a cabo actualmente:

⁴⁰ Ilustración de elaboración propia en base a los cálculos detallados en el Anexo 4.b.3.

Punto/Área de Medición	Variable	Frecuencia
Sustrato	Sólidos Totales	Semanal
	Sólidos Volátiles	Semanal
	DQO	Semanal
	Nitrógeno Total	Semanal
	Nitrógeno Amoniacal	Semanal
	Fósforo Total	Semanal
	Ácidos Orgánicos FOS/TAC	Semanal
	pH	Diario
	Temperatura	Diario
Biogás	CO2	Diario
	H2S	Diario
	Vapor de agua	Diario
	Flujo de biogás a quemar	Constante
	Presión	Constante
Tanque de ecualización	Control de nivel	Constante
	Flujo de sustrato	Constante
Biodigestor	Control de nivel	Constante
	Temperatura	Constante
	pH	Constante
	Presión	Constante
	Flujo de biogás generado	Constante
Tanque de digestato	Flujo de digestato descargado	Constante

Tabla 9 – Variables a medir, frecuencia de medición y áreas o puntos de medición adicional al actual sistema de monitoreo⁴¹.

Una vez definido cómo se medirán las variables del sistema, se deberá entender el impacto ambiental del proyecto en distintos ejes:

- Consumo de recursos
 - Agua
 - Energía
 - Químicos
- Generación de residuos
- Contaminación del suelo y agua
- Contaminación del aire

⁴¹ Tabla de elaboración propia para resumir el sistema de monitoreo planteado.

Consumo de recursos

Agua

Durante el dimensionamiento, para que los sólidos totales del efluente a tratar fueran aceptables para no causar problemas en las bombas que lo transportan (menores al 12% (FAO, 2011)), se definió como necesario agregar agua. Se propone utilizar parte del agua tratada a la salida de la planta de tratamiento de efluentes líquidos y recircularla diariamente.

Se debe procurar que la cantidad diaria necesaria de 20,4 m³ se encuentre dentro de los parámetros de vuelco para no causar la inhibición de los microorganismos del biodigestor. De lo contrario, se deberá extraer agua limpia para cumplir dicha condición para evitar obstrucciones en el sistema.

Se debe considerar también el agua necesaria para la limpieza ocasional del sistema y el mantenimiento del volumen de agua dentro del serpentín (al ser un sistema cerrado se considerará mínimo).

Energía

Para el balance de energía, deberán considerarse la generación de la energía tanto como los gastos energéticos para mantener el sistema:

Elementos de consumo/generación energética	Δ Balance de potencia (W)
Quemador del biogás en la caldera industrial	0,0
Caldera Eléctrica del serpentín	3.000,0
Bomba (A)	25,8
Bomba (B)	26,2
Bomba (H)	1,9
Bomba (C)	2,1
Bomba (I.1)	42,9
Bomba (I.2)	41,6
Agitador mecánico (tanque de ecualización)	314,1
Agitador mecánico (biodigestor)	2.674,5
Agitador mecánico (tanque de digestato)	350,9
Filtro de bandas	0,0
Soplador de aire (zona de compostaje)	1.491,4

Tabla 10 – Balance energético comparando el antes y después de la instalación del sistema biodigestor⁴².

La totalidad del biogás generado será utilizado para alimentar a la caldera industrial, reemplazando al gas natural. De esta manera se utilizará la misma energía, pero se cambiará el

⁴² Tabla de elaboración propia para resumir los gastos energéticos que presenta el sistema biodigestor en comparación al sistema previo.

origen de la misma. A su vez, se reutilizará el filtro de bandas que hubiese quedado obsoleto al incorporar la totalidad de las grasas al biodigestor (utilizando la misma energía que en el sistema previo).

El sistema del serpentín contrapone la pérdida de calor del sistema, debido a que fue dimensionado para contrarrestar dichos efectos. La potencia que las bombas y los agitadores necesitarán fueron calculadas en el Anexo 3 y 4.

Se asume la incorporación de un soplador de aire en la zona de compostaje para asistir a la oxigenación de las pilas de compostaje.

Químicos

Se incluirán dentro de los recursos químicos el filtro de carbón activado utilizado por el equipo para eliminar el ácido sulfhídrico del biogás. Sin embargo, como el filtro seleccionado tiene una vida útil media de alrededor de 20 años no se abordará en este caso la evaluación económica del mantenimiento anual del filtro de carbón activado.

Los combustibles utilizados también entrarán bajo esta categoría. El combustible adicional utilizado por el minicargador para despejar, ordenar y cargar las pilas de compostaje se asumirá fijo y alrededor de un tanque por mes (65 litros aproximadamente).

Se debe tener en cuenta el químico estabilizador del pH que se utilizará para neutralizar al sustrato y permitir una reacción anaeróbica efectiva en el biodigestor. Como parte del ensayo de la capacidad de la generación de biometano, en la Tabla 3, se utilizaron alrededor de 0,6 ml de ácido clorhídrico 1M para neutralizar el pH del reactor con 30,9 gramos de sustrato (con composición de 73% de grasas y 27% de purgas de mayonesa).

$$Vol_{HCl} = 4.335 \frac{ton}{año} \frac{0,6 ml}{30,9 g} \frac{m^3}{1.000.000 ml} \frac{1.000.000 g}{ton}$$

$$Vol_{HCl} = 84,18 \frac{m^3}{año}$$

Si extrapolamos los resultados del ensayo con la cantidad de sustrato que ingresa anualmente, se obtendrán alrededor de 84,2 m³ de ácido clorhídrico 1M al año.

Generación de residuos

El sistema biodigestor fue diseñado para incorporar 4.335 toneladas anuales de residuos orgánicos generados en la fábrica, de los cuales 3.035 toneladas corresponden a grasas obtenidas en la cámara de flotación y pretratamiento de la planta de tratamiento de efluentes

y 1.300 toneladas corresponden a los residuos de las purgas de las líneas en las que se produce mayonesa.

El digestato resultante será vendido u obsequiado como fertilizante a los proveedores de las materias primas para mantener buenas relaciones e incrementar la circularidad de los recursos en la cadena de suministro. Esta cantidad equivale a 1.570 toneladas anuales que no serán consideradas como residuos sino como recursos.

Se deberá considerar también que la operación y mantenimiento del sistema biodigestor traerá aparejado la generación de residuos generales y especiales, adicionales a los que la fábrica generaba previo al proyecto. Se utilizará un estimado de 0,5 kg/día para residuos generales y 0,5 kg/día para residuos especiales, estos variarán dependiendo de cuánto mantenimiento se realice.

No se considerarán parte de la generación de residuos adicional a los residuos plásticos, de cartón y vidrio resultante de los ensayos de laboratorio que deberán realizarse como parte del sistema de monitoreo, ya que serán muy similares a la condición previa.

En lo que respecta al indicador de residuos utilizado por Unilever, se podría reducir el indicador de residuos de la fábrica un 65%, cumpliendo con los lineamientos del ZWTL (Unilever, 2022e) y con el compromiso asumido de reducción de residuo de alimentos (Unilever, 2022d).

Contaminación del suelo y agua

El biodigestor debe encontrarse fuera de zonas inundables para evitar rebalses del sistema y la posterior contaminación del suelo y la napa. Además de asegurar una capa impermeable sobre la superficie que sea capaz de drenar cualquier exceso de agua hacia la planta de tratamiento de efluentes, se debe analizar el perfil del suelo debajo de la fábrica para mitigar los riesgos en caso de producirse un desastre.

El área donde se estabilizarán las pilas de compostaje debe mantenerse impermeable y seco para evitar lixiviados que se filtren al suelo. Las pilas deberán cubrirse con un manto plástico para evitar que se humedezcan demasiado y produzcan lixiviados.

En el caso de la fábrica de Pilar, en el área donde se pretende instalar el sistema biodigestor, se presenta un perfil de suelo limoso hasta los 37 metros de profundidad y a partir de ese punto el perfil del suelo se vuelve arcilloso, lo que funciona como una barrera en el transporte de contaminantes hacia el agua subterránea (el perfil litográfico fue descrito por la Jefa de Medioambiente de la fábrica).

La planta de tratamiento de efluentes deberá tratar el efluente resultante para acondicionarlo a los parámetros de vuelco previo a su vertido fuera de la fábrica. Se asume que esto será posible sin la ampliación de la capacidad de la misma, ni con una demanda de químicos significativamente mayor.

Contaminación del aire

La contaminación del aire indirecta proviene de fugas en el sistema biodigestor. Deben mantenerse al mínimo procurando que la campana de biogás y las cañerías que lo transportan estén herméticamente selladas. Los gases provenientes del biodigestor susceptibles de contaminar la atmósfera de manera más significativa son: el metano, el monóxido de carbono, el dióxido de carbono y el ácido sulfhídrico. Si el biodigestor está correctamente sellado, no debería de producir olores.

La estabilización de las pilas de compostaje al aire libre puede generar trazas de gases como amoníaco, por lo que se cubren con un manto plástico para minimizar la dispersión de olores. Sin embargo, la generación de olores debería de disminuir a medida que se estabiliza el digestato.

La contaminación directa del aire proviene de la combustión del biogás en el quemador de la caldera industrial. En ese caso, se verá una reducción de la contaminación de la atmosfera, al tener el biogás un potencial de calentamiento global menor que el gas natural, de alrededor de 32 toneladas de CO₂ equivalente por año. Para la energía eléctrica se compran bonos de carbono de proyectos argentinos para poder neutralizar su efecto en la atmósfera, por lo que se asumirá nulo su efecto.

	Gas Natural	Biogas	Diesel
IPCC Factor de emisión CO ₂ (kg/GJ)	56,10	54,60	74,10
IPCC Factor de emisión CH ₄ (kg CO ₂ eq/GJ)	0,03	0,03	0,08
IPCC Factor de emisión N ₂ O (kg CO ₂ eq/GJ)	0,03	0,03	0,16
IPCC Factor de emisión CO₂eq (kg/GJ)	56,16	54,66	74,35

Situación previa al sistema biodigestor	Energía (GJ)	CO ₂ asociado (ton CO ₂ eq)
Gas natural utilizado anualmente	48.030	2.697

Situación posterior al sistema biodigestor	Energía (GJ)	CO ₂ asociado (ton CO ₂ eq)
Gas natural utilizado anualmente	25.385	1.425
Biogas natural utilizado anualmente	22.645	1.238
Diesel utilizado anualmente en el mini montacarga	29	2,12

Δ Huella de Carbono de la fábrica (ton CO₂eq)	-32
---	------------

Tabla 11 – Balance de gases de efecto invernadero, comparando el antes y después de la instalación del sistema biodigestor⁴³.

Se deberá instalar un sistema de antorcha de seguridad para asegurar que en caso de ser necesario un venteo del biogás, se ventee dióxido de carbono y no metano (de manera de reducir su potencial contaminante); esto se logra a través de la combustión del biogás.

Dimensionamiento de la antorcha de seguridad

Se determinó que el caudal máximo de biogás que pueda llegar a quemarse (durante la operación normal del biodigestor) será de 239,54 m³/día, o bien 9,98 m³/h. Si aplicamos un factor de seguridad de 30%, se tendrá un valor del caudal máximo ampliado de 12,98 m³/h.

Se elige a la antorcha FAI 15-350 del proveedor Zorg, ya que está hecha con acero inoxidable (lo cual garantiza una vida útil lo suficientemente larga) y debido a que trabaja con un caudal de entre 0,9 Nm³/h y 14 Nm³/h.

⁴³ Tabla de elaboración propia utilizando los datos del IPCC para los factores de emisión (IPCC, 2023a), el potencial de calentamiento global (IPCC, 2023b) y los datos del consumo de la fábrica durante el 2020.

Impacto en la Seguridad e Higiene

Un proyecto completo debe incluir la evaluación de los riesgos asociados a la seguridad de los trabajadores de la fábrica y de las comunidades que la rodean. Como la planta se encuentra en un parque industrial no apto para la vivienda, se considerarán solamente los riesgos de los trabajadores de la fábrica y operarios del sistema biodigestor a instalar.

Riesgo de incendio

Se deben tener en cuenta decisiones estructurales a la hora de diseñar el sistema biodigestor para incrementar la protección contra incendios: El biodigestor debe contar con un aislamiento térmico no inflamable o poco inflamable y se debe tener distancias de seguridad para ralentizar el avance del fuego y evitar su propagación en caso de que se produzca un incendio (de manera de proteger la campana de almacenamiento del biogás crudo). Las distancias mínimas de seguridad deben respetar al menos 6 metros en sentido horizontal entre los tanques de almacenamiento de gas y las instalaciones, equipos y edificios adyacentes no relacionados con el biogás (GIZ, 2023).

Riesgo eléctrico

Al ser el biogás un gas altamente inflamable, todo equipo con tensión cercano al sistema biodigestor debe estar identificado. Se recomienda colocar sensores de gases con alarmas en las paredes de los espacios en donde podrían existir concentraciones significativas del gas.

La energía del biogás será de uso exclusivamente térmico, por lo que no se generará electricidad de ninguna fuente adicional en comparación al sistema previo.

Riesgo de envenenamiento o asfixia

En concentraciones altas, la inhalación de biogás puede producir síntomas de asfixia, e incluso ser fatal. El ácido sulfhídrico puede ser tóxico en bajas concentraciones, por lo que se debe tener especial cuidado con el biogás crudo. Cualquier espacio cerrado que tenga el riesgo de ser infiltrado por el biogás debe estar bien ventilado.

Riesgo de explosión

El biogás se vuelve un gas reactivo al entrar en contacto con el oxígeno, ya que está compuesto en su gran mayoría por metano. Sin embargo, el riesgo de explosividad y la velocidad de propagación de la llama son más bajas en comparación con otros gases; como el gas natural, el propano, el metano puro y el hidrógeno.

Riesgo laboral

Además de mitigar los riesgos desde el diseño de la infraestructura, se deben mitigar los riesgos a las personas que trabajan en el sistema biodigestor. Para influenciar en posibles

comportamientos que pongan en riesgo a los trabajadores se deberá: trabajar con el sistema LOTO con los equipos que posean tensión, mantener las áreas que integran al sistema biodigestor correctamente señalizadas (deberán mostrar claramente los posibles riesgos y los equipos de protección personal a utilizar en cada área), e imponer una estricta norma de uso de equipos de protección personal en todo momento.

Se debe tener especial cuidado al realizar el mantenimiento de las diferentes unidades que integrarán el sistema biodigestor, se recomienda que se utilicen mascarillas de medio rostro con filtros para gases orgánicos. Idealmente, los trabajadores deberán llevar un sensor portátil para el ácido sulfhídrico con alarmas sonoras y vibrantes cuando se detecten niveles no aceptables.

Dependiendo de la tarea a realizar, los trabajadores deberán utilizar equipos de protección personal para mitigar el riesgo sobre el cual no puedan influir con sus acciones:

- Zapatos dieléctricos y guantes para trabajos que involucren estar cerca del biogás o simplemente para trabajos con equipos con tensión.
- Protección auditiva leve debido a que la única fuente de ruido serán las bombas y compresores del sistema.
- Gafas de seguridad, uniforme de protección reflectante y casco para protegerse de cualquier salpicadura o golpe.
- Cuando el trabajo lo requiera, sistemas de sujeción o arneses y máscaras con filtro.



Ilustración 2022 – Equipo de protección personal (EPP) recomendado para un trabajador de una planta de biogás⁴⁴.

Impacto Económico

La evaluación del impacto económico del proyecto es fundamental para entender las inversiones, los ahorros y el plazo de repago. Se deberán evaluar los costos y los beneficios asociados fijos y variables. Se utilizará el dólar como moneda de comparación en esta sección y se determina la vida útil del proyecto en 12 años.

⁴⁴ Obtenido de Directrices para el uso seguro de la tecnología del biogás [PDF], por GIZ recuperado en noviembre 2023 (<https://www.giz.de/en/downloads/Guia%20%20Seguridad%20Biogas%20GIZ.PDF>).

Costos asociados

Los costos de operación del proyecto incluyen:

	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12
Costos operativos	\$ 8.244	\$ 8.433	\$ 8.610	\$ 8.782	\$ 8.958	\$ 9.146	\$ 9.375	\$ 9.609	\$ 9.850	\$ 10.096	\$ 10.348	\$ 10.607
Consumo de recursos	\$ 6.270	\$ 6.552	\$ 6.847	\$ 7.155	\$ 7.477	\$ 7.814	\$ 8.165	\$ 8.533	\$ 8.917	\$ 9.318	\$ 9.737	\$ 10.175
Energía eléctrica	\$ 5.081	\$ 5.310	\$ 5.549	\$ 5.799	\$ 6.060	\$ 6.332	\$ 6.617	\$ 6.915	\$ 7.226	\$ 7.551	\$ 7.891	\$ 8.246
Combustible para la pala cargadora	\$254	\$265	\$277	\$290	\$303	\$317	\$331	\$346	\$361	\$377	\$394	\$412
Ácido clorhídrico	\$935	\$977	\$1.021	\$1.067	\$1.115	\$1.165	\$1.217	\$1.272	\$1.329	\$1.389	\$1.451	\$1.517
Generación de residuos	\$1.974	\$2.062	\$2.155	\$2.252	\$2.354	\$2.459	\$2.570	\$2.686	\$2.807	\$2.933	\$3.065	\$3.203
Tratamiento de residuos especiales	\$587	\$613	\$641	\$669	\$699	\$731	\$764	\$798	\$834	\$872	\$911	\$952
Tratamiento de residuos mixtos	\$1.387	\$1.449	\$1.515	\$1.583	\$1.654	\$1.728	\$1.806	\$1.888	\$1.972	\$2.061	\$2.154	\$2.251

Inflación Anual Dólar	4,5%	2,3%	2,1%	2,0%	2,0%	2,1%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%	2,5%
-----------------------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------	------

Tabla 12 – Costos operativos variables en función del tiempo, durante la vida útil del proyecto⁴⁵.

⁴⁵ Tabla de elaboración propia en base a los datos obtenidos de la planta en cuanto al costo del tratamiento de los residuos. La inflación anual del dólar se adopta de los valores de Statista (2023).

Los costos de obra civil y de los equipos son parte de la inversión inicial y deberán de ser pagados al inicio del proyecto (no se extenderán durante la vida útil del proyecto):

	Año 1
Costos de obra civil	\$ 242.795
Construcción Cañerías	\$ 12.161
Tramo A (D= 1/2'; L= 210m; Acero Inoxidable 304)	\$ 2.980
Tramo B (D= 3/4'; L= 152m; Acero Inoxidable 304)	\$ 2.782
Tramo C (D= 1'; L= 15m; Acero Inoxidable 304)	\$ 341
Tramo D (D= 3'; L= 127m; PVC)	\$ 1.043
Tramo E (D= 1'; L= 22m; Acero Inoxidable 304)	\$ 501
Tramo F (D= 1'; L= 13m; Acero Inoxidable 304)	\$ 296
Tramo G (D= 1'; L= 60m; Acero Inoxidable 304)	\$ 1.366
Tramo H (D= 3/8'; L= 40m; Acero Inoxidable 304)	\$ 710
Tramo I.1 (D= 3/4'; L= 55m; Acero Inoxidable 304)	\$ 1.007
Tramo I.2 (D= 3/4'; L= 62m; Acero Inoxidable 304)	\$ 1.135
Drenaje de área Compostaje hacia la PTEL (D= 1'; L= 110m; Acero Inoxidable 304)	\$ 2.504
Tramo soplador de aire Área Compostaje (D= 3'; L= 80m; PVC)	\$ 657
Construcción Tanques (Cotización personalizada en la fábrica)	\$ 133.834
Tanque ecualizador (69 m3)	\$ 7.627
Tanque biodigestor (585 m3)	\$ 115.153
Tanque digestato (100 m3)	\$ 11.054
Instalación eléctrica y cableado (Cotización personalizada en la fábrica)	\$ 9.359
Sistemas de seguridad	\$ 17.121
Instalación de sensores de biogás (Cotización personalizada en la fábrica)	\$ 4.011
Antorcha de biogás (Zorg Biogas - FAI 15-350)	\$ 13.110
Impermeabilización de la zonas (Cotización personalizada en la fábrica)	\$ 70.321

Tabla 13 – Costos de obra civil que deberán pagarse como inversión inicial del proyecto⁴⁶.

⁴⁶ Tabla de elaboración propia en base a cotizaciones recibidas por empresas de ingeniería y precios comerciales.

	Año 1
Costos de equipos	\$ 143.601
Agitadores de hélice sumergibles	\$ 19.915
<i>Agitador del tanque ecualizador (D= 1,8m; 314W) (Bremen - Werksneues 0,75 KW / 92 Upm Balkenrührwerk-FIT/B)</i>	\$ 3.920
<i>Agitador del tanque biodigestor (D= 4m; 2.675W) (Bremen - 2,2 kW / 46 rpm blades agitator-FIT/B)</i>	\$ 12.074
<i>Agitador del tanque digestato (D= 2,17m; 351W) (Bremen - Werksneues 0,75 KW / 92 Upm Balkenrührwerk-FIT/B)</i>	\$ 3.920
Bombas y Compresores	\$ 18.076
<i>Bomba Sumergible del Tramo A (0,4 m3/h; 25,8 W) (Grundfos SL1.50.65.40.2.51E.C)</i>	\$ 3.142
<i>Bomba Sumergible del Tramo B (0,9 m3/h; 26,2 W) (Grundfos SL1.50.65.40.2.51E.C)</i>	\$ 3.142
<i>Bomba Sumergible del Tramo C (1,4 m3/h; 2,1 W) (Grundfos SL1.80.100.15.4.50D.C)</i>	\$ 1.852
<i>Bomba Sumergible del Tramo H (0,2 m3/h; 1,9 W) (Grundfos SL1.80.100.15.4.50D.C)</i>	\$ 1.852
<i>Bomba Sumergible del Tramo I.1 (1,5 m3/h; 42,9 W) (Grundfos SL1.50.65.40.2.51E.C)</i>	\$ 3.142
<i>Bomba Sumergible del Tramo I.2 (1,5 m3/h; 41,6 W) (Grundfos SL1.50.65.40.2.51E.C)</i>	\$ 3.142
<i>Soplador de aire del área de compostaje (Atenas SOPLADOR E INYECTOR DE AIRE 2 HP 220V 2800RPM)</i>	\$ 1.804
Caldera eléctrica del serpentín (ClimaTecnica Advance SC30 Control-30 Kw)	\$ 3.495
Gasómetro de tipo cúpula (Zorg Biogas 1/5 D)	\$ 23.681
Filtro de H2S (AQL100ST - Aqualimpia)	\$ 12.844
Trampa de vapor (CP01 - Aqualimpia)	\$ 14.011
Equipos de medición	\$ 51.579
<i>Caudalímetro del tanque ecualizador (Krohne Wafer 4". Modelo: OPTIFLUX 1000+ IFC 050)</i>	\$ 7.050
<i>Caudalímetro del tanque biodigestor (Krohne Wafer 4". Modelo: OPTIFLUX 1000+ IFC 050)</i>	\$ 7.050
<i>Caudalímetro del tanque digestato (Krohne Wafer 4". Modelo: OPTIFLUX 1000+ IFC 050)</i>	\$ 7.050
<i>Sensores de nivel (SENSOR DE NIVEL LP 30 C/ SONDA DE 1000 MM SPIRAX SARCO)</i>	\$ 2.438
<i>Controladores de nivel (CONTROLADOR DE NIVEL LC 3050 SPIRAX)</i>	\$ 1.837
<i>Analizador de gases estático (SSM 6000 Classic- Zorg Biogas)</i>	\$ 18.331
<i>Analizador de gases portátil (MT 540 - Zorg Biogas)</i>	\$ 7.823

Tabla 14 - Costos de equipos que deberán pagarse como inversión inicial del proyecto⁴⁷.

Beneficios asociados

Los beneficios económicos que se obtendrán con la implementación de este proyecto incluyen:

- Ahorro en el tratamiento de residuos.
- Ahorro en el consumo de gas natural.
- Potencial venta del compost.

⁴⁷ Tabla de elaboración propia en base a cotizaciones recibidas por empresas de ingeniería y precios comerciales.

El ahorro en el tratamiento de residuos puede estimarse con información obtenida de la fábrica y contemplando una vida útil del sistema de biodigestor de 12 años. El tratamiento se paga por peso, por lo que debe hacerse una proyección para entender los costos futuros que se estarían evitando de llevarse a cabo este proyecto:

Tipo de Residuo	Peso (kg)	Costo de Tratamiento (\$)
Grasas	3.050.000	\$ 148.200
Purgas	1.300.000	\$ 129.390
Barro de la PTEL	850.000	\$ 45.600
Total	5.200.000	\$ 323.190

Tabla 15 – Costo de tratamiento por tipo de residuo⁴⁸.

Año	Costo Evitado de Tratamiento	Inflación Anual dólar
1	\$ 323.190	4,5%
2	\$ 327.602	2,3%
3	\$ 311.084	2,1%
4	\$ 301.161	2,0%
5	\$ 291.840	2,0%
6	\$ 283.085	2,1%
7	\$ 274.862	2,5%
8	\$ 267.660	2,5%
9	\$ 259.630	2,5%
10	\$ 251.842	2,5%
11	\$ 244.286	2,5%
12	\$ 236.958	2,5%
	\$ 3.373.199	

Tabla 16 – Costo evitado de tratamiento para los residuos incorporados como recursos en el sistema biodigestor⁴⁹.

El ahorro en el consumo de gas natural puede estimarse si se sabe cuánto biogás se obtendrá anualmente del biodigestor, en el caso de estudio se estiman alrededor de 87.432 m3 por año. Esta cantidad debe convertirse a energía para poder calcular cuánta energía se dejará de usar a través de la combustión del gas natural, para esto se utiliza el valor de conversión 25,9 MJ/m3 (Winkler, 2000). Se obtienen los siguientes resultados que se asumirán constantes durante la duración de la vida útil del sistema biodigestor:

⁴⁸ Tabla de elaboración propia en base a los datos obtenidos durante el 2020 convertidos a dólar (ver Tabla 1).

⁴⁹ Tabla de elaboración propia en base a los valores promedio obtenidos en la Tabla 14, considerando un 3% de disminución anual en el volumen de peso a tratar como parte de posibles proyectos que mejoren la generación de residuos de la fábrica. La inflación anual del dólar se adopta de los valores de Statista (2023).

Gas natural utilizado anualmente (GJ)	48.029,6
Biogás producido anualmente (GJ)	22.644,9

Precio gas natural (GJ/\$)	0,17
----------------------------	------

Ahorro anual en el consumo de gas natural (\$)	3.856
Ahorro total en el consumo de gas natural al final de la vida útil del proyecto (\$)	46.272

Tabla 17 – Costo evitado del consumo de gas natural de la red nacional⁵⁰.

Si bien el objetivo del compost generado no es la venta, se determina el valor de la venta de un tercio del compost generado anualmente para presentar como posible beneficio económico durante la vida útil del proyecto. Esto equivale a 523 toneladas de compost siendo vendidas cada año a 25 centavos de dólar el kilogramo (dato obtenido del promedio del precio del compost actual⁵¹, considerando un 30% menor debido a la calidad del compost), se obtendrán alrededor de \$ 130.000,0- cada año durante la vida útil del sistema biodigestor. Es decir, un total de aproximadamente \$ 1.560.000,0-.

Los beneficios económicos del proyecto darán como resultado un ahorro total al final de la vida útil del proyecto de \$ 4.979.471,0-.

Análisis de la relación Costo-Beneficio

Se deberá analizar el efecto añadido de los costos y los beneficios en términos de inversión inicial, ahorro en el tiempo por costos evitados, beneficios económicos y costos operativos en el periodo de vida útil del proyecto.

De esta manera, se analizan:

- Costos evitados: \$ 3.419.471,0-
- Beneficios económicos: \$ 1.560.000,0-
- Inversión inicial: \$ 386.396,0-
- Costos operativos: \$ 127.479,0-

$$\frac{\text{Beneficio}}{\text{Costo}} = \frac{\$ 4.979.471}{\$ 513.875} = 9,69$$

Si el proyecto es viable, la relación beneficio costo debe ser mayor a 1. Por lo que se puede suponer que el proyecto será viable desde un punto de vista económico. Aún si se ignora

⁵⁰ Tabla de elaboración propia. Precio del gas natural obtenido del sistema de reporte de performance ambiental interno a través de un promedio de los datos obtenidos en el 2020.

⁵¹ Datos obtenidos el 02/12/2023, en pesos argentinos contra la cotización de dólar menos favorable.

la posibilidad de venta del compost (es decir, se regala toda su producción), se obtendría una relación de 6,65; seguiría siendo económicamente viable ya que el mayor beneficio económico se obtiene del costo evadido del tratamiento de residuos.

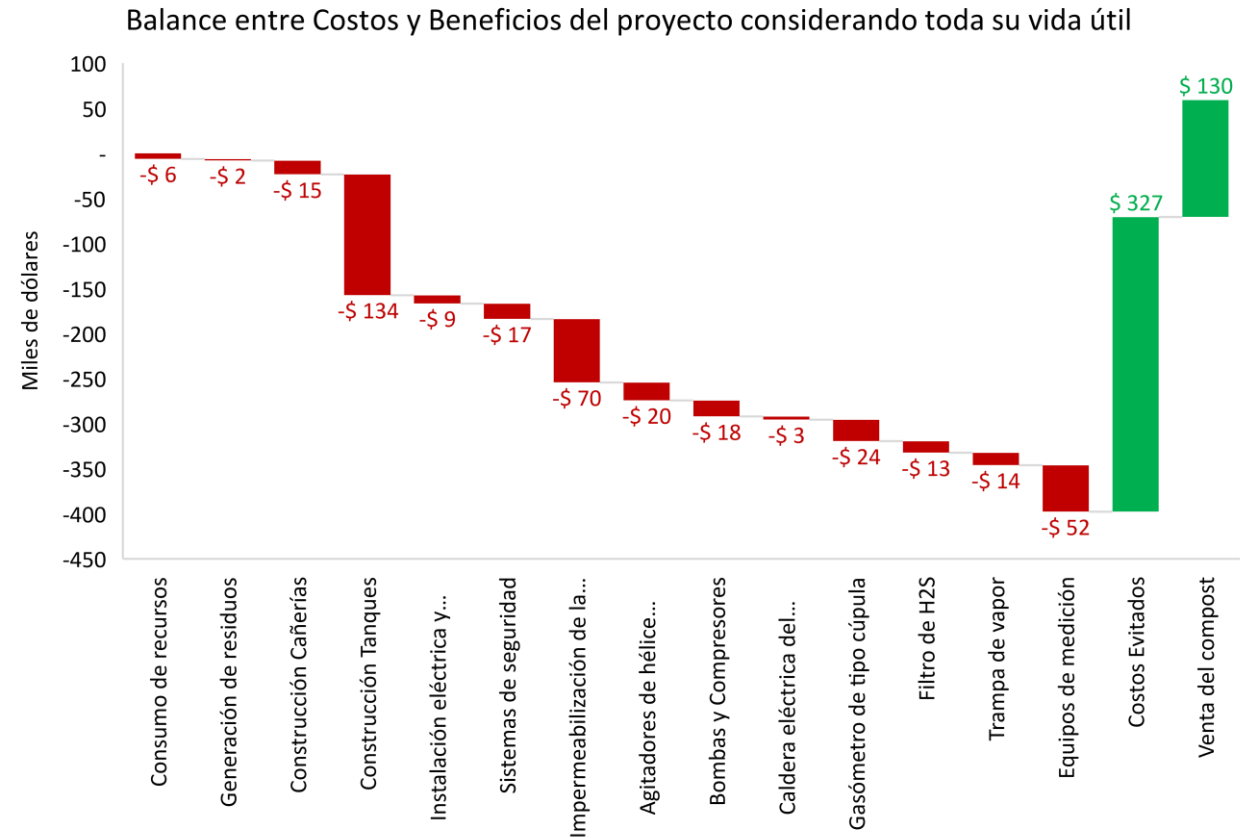


Gráfico 6 – Balance entre Costos y Beneficios del proyecto considerando toda su vida útil⁵².

Conclusión

El valor de los residuos como recursos sigue siendo en la actualidad un problema de compleja solución. Para asegurar que los residuos sean valorados adecuadamente y de manera sostenible, los cambios deben realizarse lo más cercanos al origen de los mismos; logrando minimizar la huella ambiental consecuente de depender de tratamientos fuera de la fábrica.

Las empresas, con sus indicadores internos, compromisos y estándares, crean una fuerza de cambio y oportunidades para el desarrollo y optimización de procesos que sean integrales desde el punto de vista del sistema fábrica. En Argentina, existen actualmente pocos incentivos para el desarrollo de este tipo de proyectos.

⁵² Gráfico de elaboración propia a partir de los datos utilizados para determinar los costos y beneficios económicos.

Se procedió a dimensionar el sistema biodigestor a medida y a analizar el consecuente impacto ambiental, económico y social de implementar una solución integral al problema del tratamiento de residuos orgánicos en la fábrica. El sistema biodigestor podría disminuir significativamente la cantidad de proveedores de servicios de tratamiento de residuos, minimizar la cantidad de gas natural extraído y habilitar la posibilidad de poder producir alimentos con la energía de sus propios residuos (lo cual agregaría un atractivo para el área de marketing de la empresa). Aunque positivo en la mayoría de los aspectos, se debe tener en cuenta que el riesgo para los trabajadores aumentaría, que el sistema requeriría de un riguroso y constante mantenimiento para su correcto funcionamiento y que la implementación supondría una elevada inversión inicial.

Cabe resaltar que el dimensionamiento del sistema biodigestor se ha basado en supuestos y valores teóricos, de llevarse a cabo deberán ser revisados minuciosamente.

Referencias

Air Liquide. (2023). *Hydrogen Sulphide, Gas Encyclopedia*. <https://encyclopedia.airliquide.com/hydrogen-sulfide#properties>. Recuperado el 17 de agosto de 2023 desde <https://encyclopedia.airliquide.com/>.

Barbot Y.N. (2014). *Biogas from marine macroalgal waste* [Tesis de Doctorado, Jacobs University Bremen]. ResearchGate. Recuperado el 18 de mayo 2022 desde https://www.researchgate.net/publication/312297484_Biogas_from_marine_macoalgal_waste

Cengel, Yunus A. y John M. Cimbala (1ª ed.). (2006). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*. Editorial McGraw-Hill.

Climatécnica (2023). *Caldera Eléctrica Flowing Advance (Advance SC30 Control-30 Kw - Calefacción-Potencia Variable-Acero Inoxidable)*. <https://www.climatecnica.com/caldera-el-ctrica-flowing-advance.72.1081.html#4288>. Recuperado el 8 de octubre de 2023 desde <https://www.climatecnica.com/>.

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit [GIZ] (2013). *Directrices para el uso seguro de la tecnología del biogás*. <https://www.giz.de/en/downloads/Guia%20%20Seguridad%20Biogas%20GIZ.PDF>. Recuperado el 26 de noviembre de 2023 desde <https://www.giz.de/en/html/index.html>.

DOTHAN Alabama. (12 de Julio de 2023). *FOG – Science* [PDF]. <https://www.dothan.org/DocumentCenter/View/3032/FOG---Science?bidId=>. Recuperado el 12 de Julio de 2023 desde <https://www.dothan.org/DocumentCenter>.

ENARGAS (s.f.). (26 de mayo de 2023). *Normas técnicas*. Recuperado el 26 de mayo de 2023 desde <https://www.enargas.gob.ar/secciones/normativa/normas-tecnicas.php>.

Food Loss and Waste Protocol. (2015). *Food Loss and Waste Protocol Standard (FLW)*. <https://flwprotocol.org/wp-content/uploads/2016/05/FLW-Standard-full-report-SPANISH.pdf>.

Garcia, L.F. (2016). *Selección y dimensionado de un sistema de generación de biogás mediante digestión anaerobia de purines codigeridos con glicerina* [Proyecto final de carrera, Universidad de Cádiz]. <https://rodin.uca.es/bitstream/handle/10498/18784/b37451868.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Recuperado el 5 de Agosto de 2023 desde <https://rodin.uca.es/handle/10498/18784>.

Goodfellow (2023). *AISI 316 Stainless Steel Alloy Tube 17mm ID 20mm OD*.
<https://www.goodfellow.com/p/fe24-tb-000500/aisi-316-stainless-steel-alloy-tube>.
Recuperado el 1 de octubre de 2023 desde <https://www.goodfellow.com/>.

Google (s.f.). [Fábrica Unilever Pilar]. Recuperado el 24 de abril de 2022.
<https://goo.gl/maps/443JfMFk3UzFeBGt6>.

IPCC. (2023a). *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Volume 2: Energy [Tabla 2.3 - DEFAULT EMISSION FACTORS FOR STATIONARY COMBUSTION IN MANUFACTURING INDUSTRIES AND CONSTRUCTION (kg of greenhouse gas per TJ on a Net Calorific Basis)]*. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/pdf/2_Volume2/V2_2_Ch2_Stationary_Combustion.pdf.
Recuperado el 2 de diciembre de 2023 desde https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/find_ef.php.

IPCC. (2023b). *AR6 Synthesis Report: Climate Change 2023 - The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity Supplementary Material [GWP - 100 de AR6 Tables of Greenhouse Gas Lifetimes, Radiative Efficiencies and Metrics (7.SM,6)]*.
https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter07_SM.pdf.
Recuperado el 2 de diciembre de 2023 desde <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>.

Laca Pérez, A. y Díaz Fernández, J. M. (2019). *Producción y características de lodos*.
<https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/50969/Laca18%20META%20Produccion%20y%20caracteristicas.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Recuperado el 2 de septiembre de 2023 desde <https://digibuo.uniovi.es/dspace/handle/10651/50969>.

Lei, Zhang. (2012). *The effect of sludge recirculation rate on a UASB-digester treating domestic sewage at 15 °C* [Artículo de investigación]. Water Science and Technology. <https://edepot.wur.nl/194822>. Recuperado el 16 de Julio de 2023 desde <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/66/12/2597/16290/The-effect-of-sludge-recirculation-rate-on-a-UASB?redirectedFrom=fulltext>.

Metcalf & Eddy, INC (3ª ed.). (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, Vertido y Reutilización*. Editorial McGraw-Hill.

Organización de las Naciones Unidas [ONU]. (24 de abril de 2022). *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO]. (2019a). *Guía Teórico-Práctica Sobre El Biogás Y Los Biodigestores*. Recuperado el 30 de abril de 2023 desde http://www.probiomasa.gob.ar/_pdf/GuiadeBiogasyBiodigestores-19-08-29.pdf

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO]. (2019b). *Guía técnico-regulatoria para la habilitación de plantas de biogás y homologación de artefactos y equipos para su uso*. Recuperado el 26 de mayo de 2023 desde <https://www.fao.org/publications/card/es/c/CA2952ES>.

Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO]. (2011). *Manual de Biogás*. Recuperado el 8 de Julio de 2023 desde <https://www.fao.org/family-farming/detail/es/c/342734/>.

PROBIOMASA (s.f.). (20 de mayo de 2023). *Legislación relacionada con la generación de energía utilizando biomasa*. Recuperado el 20 de mayo de 2023 desde <http://www.probiomasa.gob.ar/sitio/es/marco.php>.

Programa de Energías Renovables y Eficiencia Energética en Chile [4eChile] (2018). *Guía para el instalador de plantas de biogás de mediana y gran escala*. <https://4echile.cl/wp-content/uploads/2020/10/Gu%C3%ADa-para-el-instalador.pdf>. Recuperado el 8 de octubre de 2023 desde <https://4echile.cl/publicaciones/guia-para-el-instalador-de-plantas-de-biogas-de-mediana-y-gran-escala/>.

Purdue University. (2023). *Chemistry: Heat*. <https://chemed.chem.purdue.edu/genchem/topicreview/bp/ch5/heat.html>. Recuperado el 10 de septiembre de 2023 desde <https://chemed.chem.purdue.edu/>.

Sebigas Cotica. (18 de mayo de 2022). *Biodigestor CSTR – Reactor de Flujo y Agitación Continuos*. <http://sebigascotica.com.br/tecnologia/cstr?lang=es/>

Servicio Meteorológico Nacional [SMN]. (2021). *Estadísticas Climáticas Normales*. https://ssl.smn.gob.ar/dpd/observaciones/estadisticas_normales_9120.zip. Recuperado el 3 de septiembre de 2023 desde <https://www.smn.gob.ar/descarga-de-datos>.

Servicio Meteorológico Nacional [SMN]. (2023). *Registro de Temperatura (365 días)*. <https://ssl.smn.gob.ar/dpd/zipopendata.php?dato=regtemp>. Recuperado el 3 de septiembre de 2023 desde <https://www.smn.gob.ar/descarga-de-datos>.

Statista Research Department [Statista] (2023). *Projected annual inflation rate in the United States from 2010 to 2028*. <https://www.statista.com/statistics/244983/projected->

[inflation-rate-in-the-united-states/](#). Recuperado el 2 de diciembre de 2023 desde <https://www.statista.com/>.

The Engineering Mindset (2023). *Properties of Water at Atmospheric Pressure*. <https://theengineeringmindset.com/properties-of-water-atmospheric-pressure-saturated-liquid/>. Recuperado el 29 de octubre de 2023 desde <https://theengineeringmindset.com/>.

The Engineering ToolBox (2003a). *Heat Transfer Coefficients in Heat Exchanger Surface Combinations*. https://www.engineeringtoolbox.com/overall-heat-transfer-coefficients-d_284.html. Recuperado el 1 de octubre de 2023 desde <https://www.engineeringtoolbox.com/>.

The Engineering ToolBox (2003b). *Methane - Dynamic and Kinematic Viscosity vs. Temperature and Pressure*. https://www.engineeringtoolbox.com/methane-dynamic-kinematic-viscosity-temperature-pressure-d_2068.html. Recuperado el 29 de octubre de 2023 desde <https://www.engineeringtoolbox.com/>.

Thermal Combustion (2023). *Quemadores Industriales 40 GS 20*. <https://www.thermalcombustion.com/quemadores-industriales-gs20/>. Recuperado el 12 de noviembre de 2023 desde <https://www.thermalcombustion.com/>.

Thermexcel (2023). *Physical characteristics of water (at the atmospheric pressure)*. https://www.thermexcel.com/english/tables/eau_atm.htm. Recuperado el 29 de octubre de 2023 desde <https://www.thermexcel.com/english/tables/>.

Torres-Calderón, Soledad, Paucar-Palomino, Michel Jazmín, & Pampa-Quispe, Noé Benjamín. (2020). *Adsorción de sulfuro de hidrógeno del biogás mediante virutas de hierro pretratadas para reuso energético* [Trabajo de Investigación, Universidad Peruana Unión y Universidad Nacional de Ingeniería de Perú]. Recuperado en 12 de agosto de 2023, de http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382020000100018&lng=es&tlng=es.

Unilever. (12 de Julio de 2023f). *Unilever General Report: Hellmann's Mayo Real 10 ML* [PDF]. <https://sifu.unileversolutions.com/pdf/get/SK/sk?name=hellmanns-majolenka-porciovana-198-x-10-ml&cuEanCode=8711200449767>. Recuperado el 12 de Julio de 2023 desde la intranet de Unilever.

Unilever. (2022b). *The Unilever Compass* [PDF]. <https://www.unilever.com/files/8f9a3825-2101-411f-9a31-7e6f176393a4/compass-strategy.pdf>. Recuperado el 24 de abril de 2022 desde <https://www.unilever.com/planet-and-society/>.

Unilever. (2022c). *Tackling Food Waste*. <https://www.unilever.com/planet-and-society/waste-free-world/tackling-food-waste/>.

Unilever. (2022d). *Waste-Free World Strategy and goals*. <https://www.unilever.com/planet-and-society/waste-free-world/strategy-and-goals/>.

Unilever. (2022e). *Tackling manufacturing waste*. <https://www.unilever.com/planet-and-society/waste-free-world/tackling-manufacturing-waste/>.

Unilever. (24 de abril de 2022a). *Unilever Environmental Policy* [PDF]. <https://www.unilever.com/files/origin/760e39accac6ba69f60f3672b0b655a423004614.pdf/unilever-environmental-policy.pdf>. Recuperado el 24 de abril de 2022 desde <https://www.unilever.com/planet-and-society/sustainability-reporting-centre/our-policies/>.

United States Environmental Protection Agency [EPA]. (2016). *Adapting Boilers to Utilize Landfill Gas: An Environmentally and Economically Beneficial Opportunity*. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2016-07/documents/boilers.pdf>. Recuperado el 2 de septiembre de 2023 desde <https://www.epa.gov/>.

Universidad Nacional de Cuyo [UNCUYO] (2012). *Compilado de Tablas de la Cátedra de Mecánica de los Fluidos*. <https://ingenieria.uncuyo.edu.ar/catedras/tablas-mdf2012.pdf>. Recuperado el 13 de octubre desde <https://ingenieria.uncuyo.edu.ar/>.

Uribe, V. C. (2013). *Diseño y cálculo de un agitador de fluidos* [Seminario de Titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de Ingeniero de Ejecución en Mecánica en la Universidad del Bío Bío, Chile]. <http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/412/1/Castillo Uribe Vladimir.pdf>. Recuperado el 12 de noviembre de 2023 desde <http://repobib.ubiobio.cl/jspui/>.

Winkler, Michael A. (2000). *Tratamiento Biológico de Aguas de Desecho*. Grupo Noriega Editores.

Zorg. (2023). *Gasómetro de biogás de doble membrana, Cúpula en forma de 1/5 D*. https://zorg-biogas.com/es/catalogo-de-equipos/sostenedor-de-biogas/sostenedor-de-biogas-de-doble-membrana-1_5d.

Anexo 1

En este apartado se detallan las memorias de cálculo, relacionadas con el dimensionamiento del biodigestor, analizadas en detalle y describiendo su razonamiento.

Anexo 1.a: Cálculo teórico de generación de biogas

Asumiendo que las condiciones son las ideales (resultando en mínimas concentraciones de compuestos de azufres) y que los gases resultantes de la descomposición de la materia orgánica del efluente se comportan como gases ideales, se puede aplicar la siguiente fórmula para predecir las características del gas metano:

$$P V = n(CH_4) R T$$

Siendo:

P = La presión absoluta del gas (en ATM).

V = El volumen que ocupa el gas (en litros).

n = El número de moles que se haya en el gas (en mol).

R = La constante universal de los gases, 0,08206 l ATM / K mol.

T = La temperatura del gas (en K).

$$n(CH_4) = \frac{DQO_{removido} (g)}{K \left(\frac{g}{mol}\right)}$$

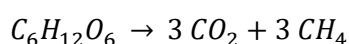
Siendo:

K = la constante de degradación de la DQO en metano.

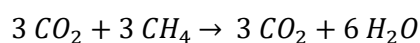
$DQO_{removido}$ = la DQO removida dependerá de la actividad bacteriana (la cual está relacionada principalmente con la disponibilidad de nutrientes, la temperatura, la ausencia de tóxicos, el pH).

La constante de degradación de la DQO (K) puede calcularse de manera aproximada con las ecuaciones químicas utilizando una molécula de glucosa como base:

- i. Ecuación de conversión de glucosa en CO_2 y CH_4 en condiciones anaerobias:



- ii. Ecuación de oxidación de metano:



De esta manera, se obtendrán:

$$\frac{3 \text{ mol } CH_4 / 1 \text{ mol Glucosa}}{6 \text{ mol } O_2 / 1 \text{ mol Glucosa}} = \frac{48 \text{ g } CH_4}{192 \text{ g } O_2} = 0,25$$

Lo que significa que se obtendrán 0,25 kg de metano por cada kg de materia oxidable (en las condiciones teóricas supuestas donde toda la materia oxidable este compuesta por glucosa). Si se multiplica este resultado por el peso molar del metano (16 g/mol), la K (teórica) será de 64 g DQO / mol CH₄.

De esta manera:

$$V(CH_4) = \frac{DQO_{\text{removido}} R T}{K P}$$

Siguiendo condiciones normales de presión (1 atm) y temperatura (0°C), se obtendrán 350 litros de metano por cada kilogramo de DQO removido:

$$V(CH_4) = \frac{DQO_{\text{removido}}}{64 \text{ g/mol}} 22,4 \frac{\text{l}}{\text{mol}} = DQO_{\text{removido}}(g) 0,35 \frac{\text{l}}{\text{g}}$$

Estimando entonces que el biogas producido por el reactor anaeróbico será 70% metano y 30% dióxido de carbono (Winkler, 2000), se podrá conocer el volumen total de biogas generado:

$$V(CO_2) = V_{\text{total}} + V(CH_4)$$

$$V_{\text{total}} = \frac{V(CH_4)}{0,7}$$

El volumen del biogás en condiciones normales de presión y temperatura, por cada kg de DQO removido será de 500 litros. Sin embargo, cabe resaltar que en la realidad la temperatura y presión serán mayores que las consideradas en las condiciones normales y que la reacción completa del efluente tratado a metano dependerá de diversas condiciones y no se tratará solo de la glucosa, por lo que el volumen obtenido será probablemente menor.

Anexo 1.b: Cálculo del caudal del biodigestor

El cálculo del caudal de dimensionamiento del biodigestor determinará el espacio que ocupará, la potencia de las bombas a instalar y las dimensiones de las cañerías; entre otros factores clave.

El caudal másico diario puede calcularse desde las cantidades anuales conocidas que ingresarían al biodigestor. Es decir, si ingresarán 4.335 toneladas al año, ingresarán 11,8 toneladas diarias.

En términos cualitativos, se debe procurar que la concentración de sólidos totales del efluente que ingresa al biodigestor no sea mayor que 12% (FAO, 2011). Los análisis de laboratorio arrojaron valores de 32,7% para el reactor con la composición de 27% mayonesa y 73% grasas, por lo que se debe diluir para lograr un óptimo funcionamiento del biodigestor.

La cantidad de agua necesaria se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$m_a * c_a = m_b * c_b$$

Donde la masa del sustrato y su contenido de sólidos totales será igual a la masa total del sistema y su carga de sólidos totales (parámetro que se mantendrá en 12%). Entonces:

$$11.800 \text{ kg} * 32,7\% = m_b * 12\%$$

$$3.858,6 \text{ kg} = m_b * 12\%$$

$$32.155 \text{ kg} = m_b$$

La masa de agua a agregar será el resultado de:

$$m_{agua} = m_b - m_a = 32.155 \text{ kg} - 11.800 \text{ kg} = 20.355 \text{ kg}$$

Considerando la densidad del agua como 997 kg/m³, se deberán agregar aproximadamente 20,4 m³ de agua diarios al efluente entrante para que su contenido de sólidos totales ronde los 12%.

La densidad del efluente entrante puede calcularse de la siguiente manera:

$$\rho_{efluente} = \rho_{mayonesa} \chi_{mayonesa} + \rho_{grasa} \chi_{grasa}$$

La densidad utilizada de la mayonesa proviene del reporte general de Unilever (Unilever, 2023f) y la densidad utilizada de la grasa proviene del reporte de Dothan (DOTHAN).

$$\rho_{efluente} = 925 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (27\%) + 864 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (73\%) = 880,47 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

El caudal entrante al sistema será entonces la suma del caudal de las grasas y purgas con el caudal del agua agregada diariamente:

$$Q_T = Q_1 + Q_2$$

$$Q_T = \left(\frac{11.800 \frac{\text{kg}}{\text{dia}}}{880,47 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}} \right) + 20,4 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} = 33,8 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}}$$

El valor aproximado del caudal entrante será de 34 m³ al día. Con el valor del caudal de entrada al biodigestor, se puede calcular el caudal de recirculación del sistema. El valor

recomendado para el caudal de recirculación para optimizar la producción de biogás se encuentra alrededor de 12,5% del caudal de entrada (Zhang 2012). Cuanto mayor es el factor de recirculación, mayor cantidad de efluente vuelve a ingresar al sistema antes de ser dispuesto.

$$Q_{Recirculación} = Q_{Entrada} 12,5\%$$

$$Q_{Recirculación} = 4,25 \frac{m^3}{dia}$$

Por último, si se desea utilizar el efluente tratado de la planta de tratamiento de efluentes como el agua necesaria para lograr la cantidad de sólidos totales disueltos deseado, se debe comprobar si la cantidad generada diariamente es capaz de suplir al sistema.

$$Q_T = Q_{agua} + Q_{recirculación} + Q_{efluente}$$

$$34 \frac{m^3}{dia} = 20,4 \frac{m^3}{dia} + 4,25 \frac{m^3}{dia} + Q_{efluente}$$

$$Q_{efluente} = 9,35 \frac{m^3}{dia}$$

Como la planta de tratamiento de efluente genera alrededor de 800 m3 de efluente tratado por día, no será un limitante y será suficiente para alimentar al biodigestor.

Anexo 1.c: Cálculo de las dimensiones del tanque de ecualización

Para el cálculo de las dimensiones del tanque de ecualización, se debe tener en cuenta el caudal entrante al biodigestor calculado en el Anexo 1.b y el tiempo de retención mínimo para asegurar una homogenización lo suficientemente estable de los parámetros. Se utiliza un tiempo de retención del tanque ecualizador de dos días.

$$V_{util} = Q_T * t_r$$

$$V_{util} = 34 \frac{m^3}{dia} * 2 dias = 68 m^3$$

Una vez obtenido el volumen, se debe definir la forma del tanque, esta suele ser cilíndrica. Se dispondrá sobre la tierra, de manera de evitar infiltraciones no visibles del efluente. Se calcula el volumen del tanque de forma cilíndrica utilizando la siguiente ecuación:

$$V = \pi h r^2$$

Se debe definir entonces una variable para dimensionar correctamente el tanque. En este caso, se decide definir una altura de 3 metros; por lo que el diámetro resultante será de 5,4 metros.

Anexo 1.d: Cálculo de las dimensiones del biodigestor

Para dimensionar el biodigestor, se debe tener en cuenta el volumen útil del biodigestor y el volumen de biogás que se espera se produzca regularmente. El volumen útil del biodigestor estará determinado por el caudal entrante, que ha sido determinado en el Anexo 1.b. El sistema de captación de biogás debe estar integrado con el biodigestor, lo que determinará o limitará sus dimensiones.

Como se definió anteriormente, se utilizarán las características promedio del potencial de generación de biometano del ensayo realizado sobre la muestra más representativa de la realidad en cuanto a la proporción de grasas y mayonesas a tratar. La Tabla 7 para dicha proporción de sustratos, arroja un promedio de 127,9 m³ de biometano por tonelada de residuo tratado, con alrededor de 9 días de tratamiento; es decir, 14,21 m³ de biometano por tonelada de residuos tratado por día. Se obtendrá entonces un promedio de:

$$Q_{biometano} = 14,21 \frac{m^3}{ton} 11,8 \frac{ton}{dia}$$

$$Q_{biometano} = 167,678 \frac{m^3}{dia}$$

Sin embargo, se debe recordar que el metano no será el único gas producido durante el tratamiento y degradación biológica de los microorganismos dentro del biodigestor. Para corregir esto, se aplica un incremento del 70%; ya que se estima que el biogas producido por el reactor anaeróbico será 70% metano y 30% dióxido de carbono (Winkler, 2000).

$$Q_{biometano} = Q_{biogas} 70\%$$

$$Q_{biogas} = 167,678 \frac{m^3}{dia} \frac{100}{70} = 239,54 \frac{m^3}{dia}$$

En este caso se utilizará una cubierta de tipo doble membrana para almacenar al biogás crudo, se recomienda un volumen de almacenamiento mínimo que retenga al biogás crudo entre 4 y 6 horas (García, 2016). Para el caso de estudio, se deciden 10 horas de almacenamiento de biogás. Este tipo de membrana es flexible y tiene una vida útil significativa por su resistencia a los elementos externos.

Teniendo en cuenta el tiempo de almacenamiento del biogás y un factor de seguridad del 15%, el volumen total de la campana será de:

$$V_{biogas} = 239,54 \frac{m^3}{dia} \frac{1 dia}{24 horas} 10 horas (1.15) = 114,78 m^3 \approx 115 m^3$$

Se utilizará la propuesta de la empresa Zorg para la compra e instalación de gasómetros de doble membrana con forma de cúpula 1/5 D para biodigestores. El diámetro del biodigestor deberá coincidir con el diámetro de la membrana a utilizar. De entre las opciones de gasómetros de doble membrana, se escoge la que tiene un diámetro de 12 m, ya que el volumen utilizable es aquel que más se acerca al volumen calculado de 115 m³.

Tabla de volúmenes y precios, EUR			
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

Ilustración 2123 – Propuesta económica y características del gasómetro de doble membrana con cúpula en forma de 1/5 D⁵³.

El tiempo de retención del biogás considerando las características del gasómetro de doble membrana seleccionado será de:

$$V_{biogas} = Q_{biogas} t$$

$$113 \text{ m}^3 = 239,54 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} \frac{\text{día}}{24 \text{ horas}} t$$

$$t = 11,3 \text{ horas} \approx 11 \text{ horas}$$

Por otro lado, para calcular el volumen útil del biodigestor, se debe tener en cuenta la carga del biodigestor. En este caso, al utilizarse un biodigestor mesofílico de mezcla completa

⁵³ Ofrecido por Zorg Biogas, agosto 2023 (https://zorg-biogas.com/es/catalogo-de-equipos/sostenedor-de-biogas/sostenedor-de-biogas-de-doble-membrana-1_5d).

con alta eficiencia, se espera que el valor de carga diario se encuentre en un rango aproximado de entre 2 a 5 kg de sólidos volátiles (SV) por metro cúbico (FAO, 2011).

Para estimar el volumen útil del biodigestor, se utilizarán una carga de 5 kg de sólidos volátiles por metro cúbico y el valor del porcentaje de sólidos volátiles del ensayo realizado en los laboratorios del INTI (hallados en la Tabla 2). Para la proporción utilizada de grasas y mayonesa el porcentaje masa en masa de sólidos volátiles es de 22,47%. De esta manera:

$$Carga\ Biodigestor \left(\frac{kg_{SV}}{m^3\ día} \right) = \frac{m_{SV} \left(\frac{kg_{SV}}{día} \right)}{Vu_{biodigestor} (m^3)}$$

$$5 \frac{kg_{SV}}{m^3\ día} = \frac{11,8 \left(\frac{ton_{sustrato}}{día} \right) 22,47\% \left(\frac{kg_{SV}}{kg_{sustrato}} \right) 1000 \frac{kg}{ton}}{Vu_{biodigestor} (m^3)}$$

$$Vu_{biodigestor} (m^3) = \frac{11,8 \left(\frac{ton_{sustrato}}{día} \right) 22,47\% \left(\frac{kg_{SV}}{kg_{sustrato}} \right) 1000 \frac{kg}{ton}}{5 \frac{kg_{SV}}{m^3\ día}}$$

$$Vu_{biodigestor} (m^3) = 530,3 m^3$$

Si al valor estimado le aplicamos un factor de seguridad del 10%, se obtendrá un volumen útil del biodigestor de 583,3 m³; es decir, de 585 m³.

Se define que la planta Pilar de Unilever tendrá un biodigestor anaerobio con forma cilíndrica, pero de base cónica (con pendiente hacia un punto de extracción de fangos digeridos), de funcionamiento tipo manto ascendente (o UASB). Esto implica que tendrá una fase única, será un tanque de mezcla completa y tratará efluentes de alta carga orgánica.

La altura de los biodigestores, al igual que los tanques de ecualización, suele rondar los 5 metros de columna de agua. Cualquier valor que se adopte por encima, podría requerir una infraestructura más sólida para poder resistir las presiones resultantes, lo que podría incurrir en mayores costos de construcción.

Como se ha definido al biodigestor como de forma cilíndrica de base cónica, se puede resumir el volumen total con la siguiente ecuación:

$$V = \pi h_{cilindro} r_{cilindro}^2 + \pi h_{cono} r_{cilindro}^2 \frac{1}{3}$$

Recordando que el diámetro del cilindro debe coincidir con el diámetro de la campana de gas que se situará sobre el mismo:

$$585 \text{ m}^3 = \pi h_{cilindro} \left(\frac{12 \text{ m}}{2}\right)^2 + \pi h_{cono} \left(\frac{12 \text{ m}}{2}\right)^2 \frac{1}{3}$$

$$585 \text{ m}^3 = \pi (6 \text{ m})^2 (h_{cilindro} + h_{cono} \frac{1}{3})$$

La altura del cono se define como un cuarto de la altura del cilindro, siendo así:

$$585 \text{ m}^3 = \pi (6 \text{ m})^2 (h_{cilindro} + h_{cilindro} \frac{1}{12})$$

$$585 \text{ m}^3 = \pi (6 \text{ m})^2 h_{cilindro} \frac{13}{12}$$

$$h_{cilindro} = 4,77 \text{ m}$$

$$h_{cono} = h_{cilindro} \frac{1}{4} = 1,19 \text{ m}$$

$$h_{total} = h_{cilindro} + h_{cono} = 5,96 \text{ m}$$

De esta manera, las dimensiones para el biodigestor de forma cilíndrica con base cónica son:

$$r_{cilindro} = 6 \text{ m}$$

$$d_{cilindro} = 12 \text{ m}$$

$$h_{cilindro} = 4,77 \text{ m}$$

$$h_{cono} = 1,19 \text{ m}$$

$$\alpha_{inclinacion cono} = 11,2^\circ$$

Al igual que en el Anexo 1.c, se define que el material de construcción será de hormigón armado, con un espesor de 30cm.

Si se calcula el tiempo de retención celular del biodigestor debe utilizarse la siguiente fórmula:

$$\frac{V_{biodigestor}}{Q_{total}} = \theta_c$$

$$\theta_c = \frac{585 \text{ m}^3}{34 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}} = 17,20 \text{ dias} \approx 17 \text{ dias}$$

El tiempo de retención celular recomendado de acuerdo con la temperatura de funcionamiento de nuestro caso (temperatura mesofílica, o entre 30°C y 35°C) se encuentra entre 14 y 10 días. Es decir, que los cálculos estimados para el biodigestor se encuentran por

encima de los valores recomendados. Debe notarse que, para un digestor de mezcla completa de alimentación continua, el tiempo de retención celular (θ_c) es igual al tiempo de retención hidráulica (θ).

Tiempos medios de retención celular recomendados para el diseño de digestores de mezcla completa ^a		
Temperatura de funcionamiento, °C	θ_c^M , días (mínimo)	θ_c , días (recomendado para el proyecto)
18	11	28
24	8	20
30	6	14
35	4	10
40	4	10

^a [22, 23].

Ilustración 2224 – Tiempos medios de retención celular recomendados para el diseño de digestores de mezcla completa⁵⁴.

Anexo 1.e: Cálculo de las dimensiones del tanque de almacenamiento de digestato

El volumen de digestato generado por el biodigestor anaeróbico se obtiene de la Tabla 4, los valores provienen del análisis de laboratorio realizado por el INTI. El valor que se desea emplear es aquel generado por la proporción de grasas y mayonesas al 73% y 27% respectivamente. Del análisis de dichas muestras se obtiene que, de un promedio de 740 ml de muestra, 180 ml de barros fueron sedimentados; es decir, alrededor de un 24% del volumen total enviado a tratar.

Tal como se describe en el Anexo 1.c, el caudal proveniente del ecualizador hacia el biodigestor está conformado por el caudal de efluente (conformado por los sustratos de grasa y mayonesa), el caudal recirculado y el caudal de agua necesario para asegurar transportabilidad en el sistema sin afectar a las bombas. De estos caudales, solamente los primeros dos son susceptibles de sedimentar significativamente en el biodigestor. De esta manera, se debe aplicar el factor de sedimentación al caudal de efluente y al caudal recirculado para poder estimar correctamente cuánto volumen sedimentable se espera diariamente:

⁵⁴ Metcalf & Eddy (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, Vertido y Reutilización* (p. 485). McGraw-Hill.

$$Q_{lodo} = (Q_{efluente} + Q_{recirculado}) 24\%$$

$$Q_{lodo} = \left(9,35 \frac{m^3}{dia} + 4,25 \frac{m^3}{dia} \right) 24\% = 3,264 \frac{m^3}{dia}$$

Si se define un tiempo de permanencia de alrededor de 30 días, el volumen útil del tanque de almacenamiento de digestato será de 97,92 m³ (o 100 m³).

Como el tanque tendrá forma cilíndrica, se debe definir entonces una variable para dimensionar correctamente el tanque, el diámetro o la altura. En este caso, se decide definir una altura de 3 metros; por lo que, el diámetro resultante será de:

$$V = \pi h r^2$$

$$100 \text{ m}^3 = \pi 3 \text{ m } r^2$$

$$r = \sqrt{\frac{100 \text{ m}^3}{\pi 3 \text{ m}}} = 3,26 \text{ m}$$

$$d = 2r = 6,51 \text{ m}$$

Anexo 1.f: Cálculos para la depuración de vapor de agua del biogás

Para lograr separar efectivamente el vapor de agua del biogás, se debe calcular la cantidad de vapor de agua generada diariamente:

$$H_2O_{Vapor} (biogás) = Q_{biogás} \rho_{biogás} \rho_{Absluta}$$

Siendo:

$Q_{biogás}$ = el caudal de biogás en condiciones normales de presión y temperatura.

$\rho_{biogás}$ = la densidad del biogás a 35°C.

$\rho_{Absluta}$ = la humedad absoluta del biogás a 35°C.

Se estima para la densidad del biogás, la densidad del aire a 35°C y 1 atmósfera, siendo esta 1,145 kg/m³ (Cengel y Cimbala, 2006). A su vez, se estima la humedad absoluta del biogás como la humedad absoluta del aire a 35°C, 1 atmósfera y 100% de humedad relativa, siendo esta 36,6 g agua por kg de aire seco. De esta manera:

$$H_2O_{Vapor} (biogás) = 239,54 \frac{m^3}{dia} 1,145 \frac{kg}{m^3} 36,6 \frac{g \text{ vapor}}{kg \text{ aire}} \frac{kg \text{ vapor}}{1000 g \text{ vapor}}$$

$$H_2O_{Vapor} (biogás) = 10,04 \frac{kg}{dia} \approx 10 \frac{kg}{dia}$$

Se estima entonces que, dentro del biogás generado diariamente, se encuentran alrededor de 10 kg de agua.

Anexo 1.g: Cálculos para la depuración de ácido sulfhídrico del biogás

Para poder comprender las cantidades de ácido sulfhídrico dentro del biogás generado se debe estimar su concentración dentro del mismo. La concentración de ácido sulfhídrico en el biogás puede variar de 0,1% a 2% (o bien de 1000 a 20000 ppm) en condiciones normales de presión y temperatura (Torres-Calderón et al, 2020). La variabilidad depende en gran medida de la materia prima utilizada para alimentar al biodigestor (factor significativo en el pH del efluente), de la temperatura de operación y de otros parámetros.

Debido a la naturaleza del proceso productivo y al perfil de temperaturas de la zona donde se pretende implementar el biodigestor, se seleccionará una concentración de 0,5%. Por lo que se debe pasar el biogás a las condiciones del proceso (1 atm, 35°C):

$$\frac{P_1 Q_1}{T_1} = \frac{P_2 Q_2}{T_2}$$

$$\frac{1 \text{ atm } 239,54 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}{273 \text{ K}} = \frac{1 \text{ atm } Q_2}{308 \text{ K}}$$

$$\frac{308 \text{ K } 239,54 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}{273 \text{ K}} = Q_{\text{biogas } (35^\circ\text{C})} = 270,25 \frac{\text{m}^3}{\text{día}} = 11,26 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

De esta manera:

$$V_{\text{H}_2\text{S}} = 11,26 \frac{\text{m}^3}{\text{h}} 0,5\% = 0,056 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$$

La densidad del ácido sulfhídrico a 1 atmósfera de presión y 25°C es de 1,4034 kg/m³ (Air Liquide, 2023). La densidad a la temperatura de operación será entonces:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1 M_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2 M_2}$$

Siendo la presión atmosférica en ambos casos:

$$\frac{1}{T_1 \rho_1} = \frac{1}{T_2 \rho_2}$$

$$\rho_2 = \frac{T_1 \rho_1}{T_2}$$

$$\rho_{35^\circ\text{C}} = \frac{298,15 \text{ K } \rho_{25^\circ\text{C}}}{308,15 \text{ K}} = 1,358 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Entonces:

$$H_2S \text{ (biogás)} = 1,358 \frac{kg}{m^3} 0,056 \frac{m^3}{h} 24 \frac{h}{dia} = 1,825 \frac{kg}{dia}$$

Se estima entonces que, dentro del biogás generado diariamente, se encuentran alrededor de 1,8 kg de ácido sulfhídrico.

Anexo 1.h: Calefacción del biodigestor

La forma más eficiente de transferir el calor, en este caso, es con un intercambiador de calor o serpentín. Este puede estar situado en el exterior del sistema o puede recircular el fango calentado. Para el caso de estudio, se asume que el biodigestor tendrá un intercambiador de calor externo con agua como fluido térmico.

El intercambiador de calor deberá suplir la energía necesaria para contrarrestar los efectos de la pérdida de calor a través de la superficie del tanque biodigestor y la energía necesaria para calentar al efluente hasta la temperatura de operación mesofílica.

Para calcular las pérdidas de calor, se sugiere utilizar la siguiente fórmula:

$$q = U A \Delta T$$

Siendo:

q = pérdida de calor, en W.

U = coeficiente global de transmisión de calor, en $W/m^2 \text{ } ^\circ C$.

A = área de la sección transversal por donde se produce la pérdida de calor, en m^2 .

ΔT = diferencia de temperatura entre el interior y el exterior del sistema, en $^\circ C$.

Elemento	W/m ² ·°C
Muros de hormigón en masa (por encima del terreno)	
Muro de 300 mm de espesor, sin aislamiento	4,71-5,10
Muro de 300 mm de espesor con cámara de aire más revestimiento de fábrica de ladrillo	1,83-2,38
Muro de 300 mm con aislamiento	0,62-0,79
Muros de hormigón en masa (por debajo del terreno)	
Rodeados de tierra seca	0,57-0,68
Rodeados de tierra húmeda	1,08-1,42
Soleras de hormigón en masa	
Solera de 300 mm de espesor en contacto con tierra húmeda	0,57-0,68
Solera de 300 mm de espesor en contacto con tierra seca	0,28-0,39
Cubiertas flotantes	
Con plataforma de tableros de madera de 35 mm, impermeabilización y sin aislamiento	1,82-1,99
Con tableros de madera, aislante de 25 mm instalados debajo del material de impermeabilización	0,90-1,02
Cubiertas fijas de hormigón	
de 100 mm de espesor con impermeabilización sin aislamiento	3,97-4,99
de 100 mm de espesor y cubiertas con tablero de madera aislante	1,19-1,59
de 25 mm de espesor	3,00-3,57
Cubiertas fijas de acero (6 mm de grosor)	3,97-5,39

^a Adaptado parcialmente de la bibliografía [42].

Ilustración 2325 – Valores típicos de los coeficientes globales de transferencia para el cálculo de las pérdidas de calor⁵⁵.

Las superficies que conforman al biodigestor por donde el calor es susceptible de escapar son las siguientes:

$$A_{cilindro} = 2 \pi r h_{cilindro} = 179,8 \text{ m}^2$$

$$A_{cono} = \pi r \sqrt{r^2 + h_{cono}^2} = 115,3 \text{ m}^2$$

$$A_{cubierta/Media esfera} = 2 \pi r^2 = 226,2 \text{ m}^2$$

Se toman los valores de los coeficientes de transmisión de calor de la Ilustración 25 para cada uno de los elementos que conformará al biodigestor. Para el hormigón expuesto del cilindro y del cono se utiliza 0,62 W/(m² °C), valor correspondiente a un muro de hormigón de 300 mm de espesor con aislamiento. Mientras que para la cubierta flotante se utiliza 1,9 W/(m² °C), valor correspondiente al promedio de los coeficientes para cubierta flotante con plataforma de madera de 35 mm impermeable pero sin aislamiento.

⁵⁵ Metcalf & Eddy (1995). *Ingeniería de Aguas Residuales: Tratamiento, Vertido y Reutilización* (p. 941). McGraw-Hill.

Para estimar la pérdida de calor del sistema se debe estimar la pérdida de calor de las superficies hacia el ambiente y la cantidad de calor a suministrar al efluente siendo digerido para mantener la temperatura de operación en 35 °C. Para estimar la pérdida de calor al ambiente se utiliza la ecuación de pérdida de calor:

$$q = A U \Delta T$$

$$q_{Cilindro} = 179,8 \text{ m}^2 0,62 \frac{W}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}} (35^\circ\text{C} - T_{Diaria})$$

$$q_{Cono} = 115,3 \text{ m}^2 0,62 \frac{W}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}} (35^\circ\text{C} - T_{Diaria})$$

$$q_{Cubierta} = 226,2 \text{ m}^2 1,9 \frac{W}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}} (35^\circ\text{C} - T_{Diaria})$$

$$q_{Total} = q_{Cilindro} + q_{Cono} + q_{Cubierta}$$

De la base de datos del Servicio Meteorológico Nacional se obtiene el registro diario de temperatura máxima y mínima de los últimos 12 meses, medido en la estación meteorológica más cercana a la fábrica (Observatorio Pilar). Se obtiene el siguiente gráfico:

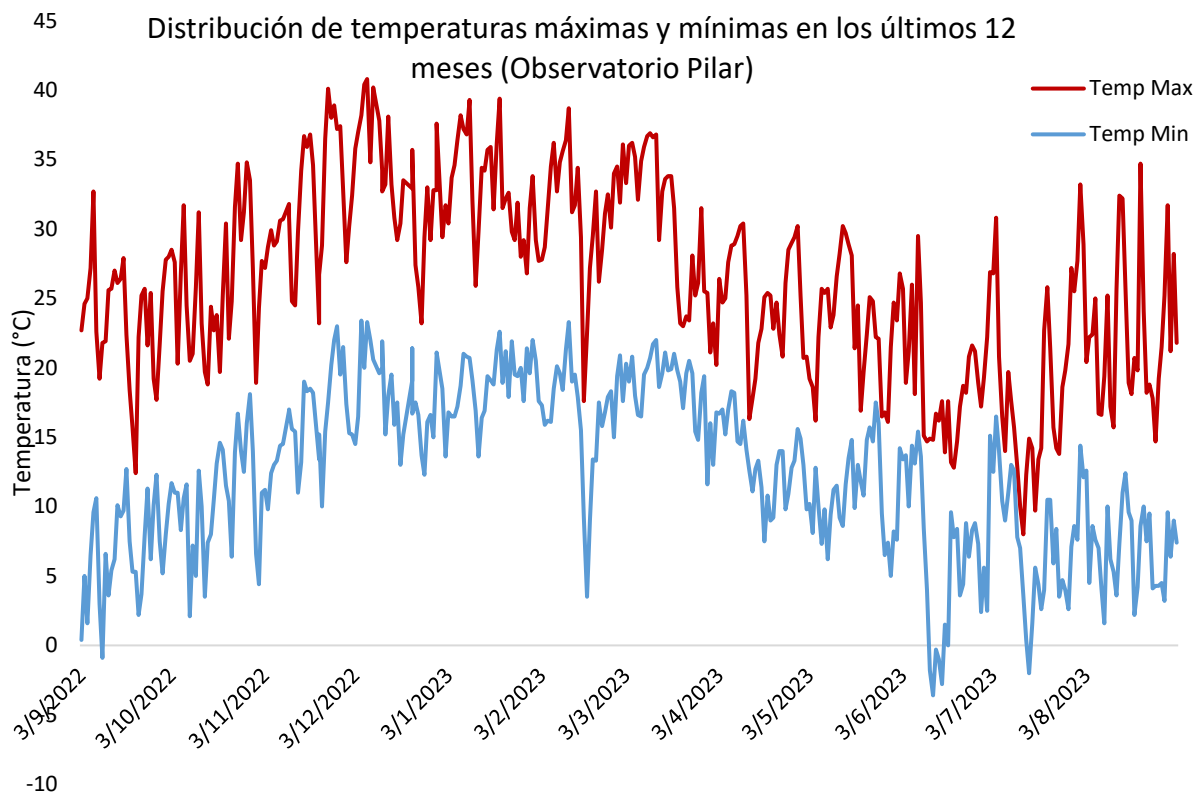


Gráfico 7 – Temperaturas máximas y mínimas en los últimos 12 meses registradas por la estación meteorológica del Observatorio Pilar⁵⁶.

La temperatura externa se define entonces como el promedio de la temperatura máxima y mínima registrada diariamente en los últimos 12 meses utilizando la base de datos del Servicio Meteorológico Nacional. Si se aplica la ecuación a la temperatura promedio de cada día se obtiene el siguiente gráfico para la pérdida de calor diaria (generada por la diferencia de temperatura ambiental):

⁵⁶ Gráfico de elaboración propia en base a los registros disponibles del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2023), para el Observatorio Pilar, extraídos el 9/9/2023.

Pérdida de Calor Diaria del Biodigestor en base a las Temperaturas promedio diarias registradas durante el año

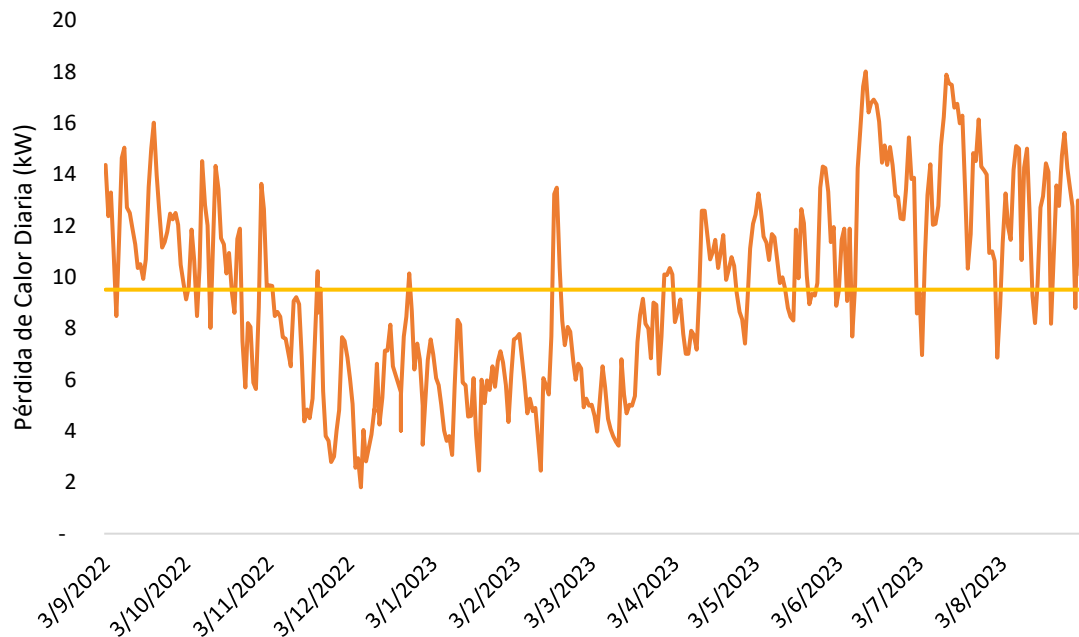


Gráfico 8 – Pérdida de calor diaria del biodigestor en base a las temperaturas promedio diarias registradas en el último año⁵⁷.

Se determina un promedio de 9,51 kW de pérdida.

Según Metcalf & Eddy (1995), es aceptable igualar el calor específico de los fangos al del agua para establecer la cantidad de calor necesario que deben recibir los fangos a la entrada del biodigestor. Para el caso de la corriente entrante al proceso, se asumirá una temperatura promedio constante de 23°C, valor proporcionado por los operarios de la planta de tratamiento de efluente de la fábrica. Se utiliza la ecuación de calentamiento del agua:

$$Q = C_e m \Delta T$$

$$Q = C_e Q_{\text{efluente}} \rho_{\text{agua}} \Delta T$$

Siendo la densidad del agua 997 kg/m³ y su capacidad calorífica a 1 atm 4,184 kJ/(kg K) (Purdue University, 2023):

$$Q = 4,148 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} 34 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} (35^\circ\text{C} - 23^\circ\text{C}) = 1.687.306,85 \frac{\text{kJ}}{\text{dia}}$$

⁵⁷ Gráfico de elaboración propia a partir de los datos meteorológicos extraídos del Servicio Meteorológico Nacional el 9/9/2023 y la ecuación de pérdida de calor.

$$Q = 1.687.306,85 \frac{\text{kJ}}{\text{dia}} \frac{1 \text{ dia}}{24 \text{ horas}} \frac{1 \text{ horas}}{60 \text{ min}} \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} \frac{1.000 \text{ W}}{1 \frac{\text{kJ}}{\text{seg}}} = 19.529 \text{ W} \approx \mathbf{19,53 \text{ kW}}$$

El calor total que se debe suministrar al sistema durante el año puede resumirse en el siguiente gráfico, que tomará al calor a suministrar al efluente como un gasto fijo e invariable a las condiciones externas:

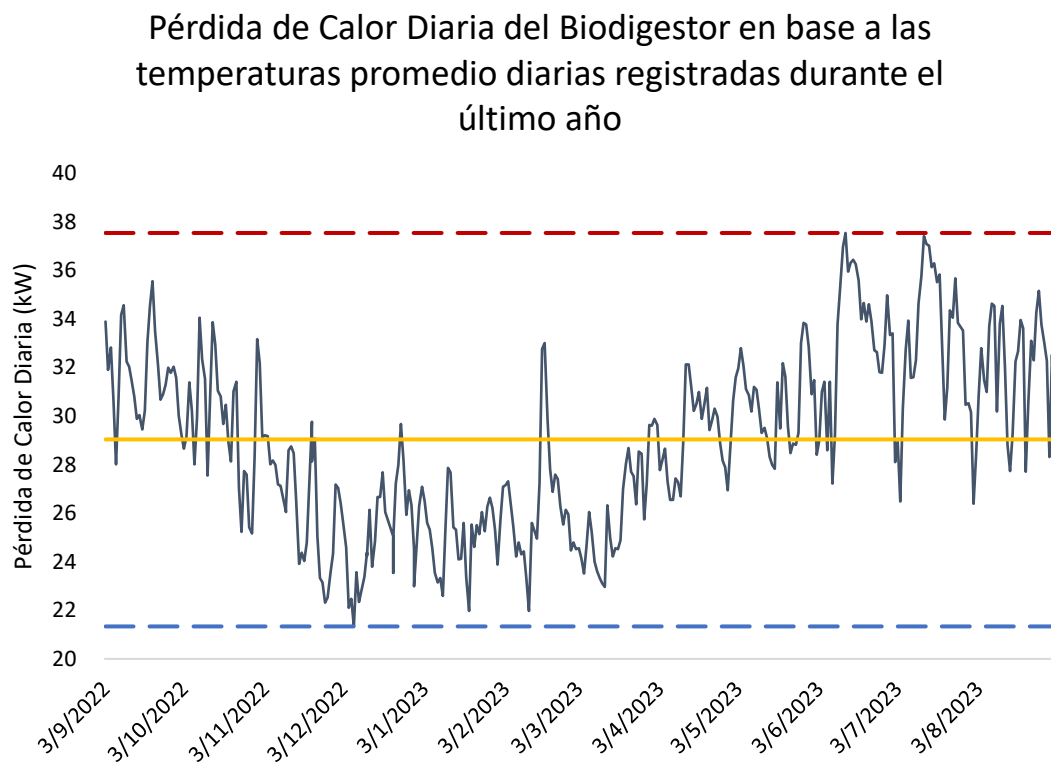


Gráfico 9 – Pérdida de calor diaria del biodigestor considerando: el consumo energético de mantener el efluente internamente a 35°C fijo y la pérdida de calor de las superficies del biodigestor en función de la temperatura diaria promedio del último año⁵⁸.

El Gráfico 9 arroja un valor máximo del calor a suministrar de 37,5 kW durante el invierno, un valor promedio del calor a suministrar de 29 kW durante varias instancias del año y un valor mínimo del calor a suministrar de 21,3 kW durante el verano. Se puede notar fácilmente que el factor que más energía requiere es el de calentar el efluente hasta los 35°C.

Anexo 1.i: Dimensionamiento del sistema de calefacción del biodigestor

Se dimensiona la calefacción del biodigestor a través del uso de un intercambiador de calor o serpentín. Este está conformado por cañerías que recorren el interior del biodigestor y

⁵⁸ Gráfico de elaboración propia utilizando los datos meteorológicos extraídos del Servicio Meteorológico Nacional el 9/9/2023 y las dimensiones y materiales de construcción del biodigestor.

cubren un área determinada para maximizar la superficie de contacto y el intercambio de calor entre el fluido térmico y el efluente.

Para el caso de estudio, se optó por utilizar cañerías de acero inoxidable y agua a 70°C como fluido térmico. Se determina también que el diámetro interno de la cañería será de 19,05 mm (o bien, de ¾"). La conductividad térmica del acero inoxidable se encuentra alrededor de 16,3 W/(m °C) (Goodfellow).

Para calcular la pérdida de calor de las cañerías que conformarán al intercambiador de calor, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\frac{q}{L} = 2 \pi k \frac{(T_i - T_o)}{\ln(\frac{d_o}{d_i})}$$

$$\frac{q}{L} = 2 \pi 16,3 \frac{W}{K m} \frac{(343 K - 296 K)}{\ln(\frac{22,05 mm}{19,05 mm})}$$

$$\frac{q}{L} = 32.914 \frac{W}{m} \approx 32,9 \frac{kW}{m}$$

Luego, para el cálculo del serpentín se utiliza la siguiente ecuación:

$$\Delta T_{ST} CP_{ST} M_{ST} = \Delta T_{serp} CP_{serp} M_{serp}$$

$$M_{serp} = \frac{\Delta T_{ST} CP_{ST} M_{ST}}{\Delta T_{serp} CP_{serp}}$$

El calor específico que se utilizará será el del agua a 23°C para el sustrato y 70°C para el fluido térmico en el intercambiador de calor; es decir, 4,18 kJ/(K kg) y 4,19 kJ/(K kg) respectivamente (Cengel y Cimbala, 2006).

El caudal másico de sustrato equivale al caudal del agua necesaria y del efluente a tratar. Para eso se asume que el efluente se comportará como agua en cuanto a su densidad y se estima un caudal másico por hora de alrededor de 1.235 kg/h. Partiendo del caudal de entrada al biodigestor de 29,75 m3/día.

De esta manera:

$$M_{serp} = \frac{(35^{\circ}C - 23^{\circ}C) 4,18 \frac{kJ}{K kg} 1.235 \frac{kg}{h}}{(70^{\circ}C - 60^{\circ}C) 4,19 \frac{kJ}{K kg}}$$

$$M_{serp} = 1.479 \frac{kg}{h} = 24,65 \frac{l}{min}$$

Se estima entonces que se necesitarán aproximadamente 25 litros por minuto de agua a 70°C para abastecer al sistema de calefacción.

Para dimensionar al serpentín se utilizará la siguiente ecuación:

$$Q = A_{serp} U_{serp} DTML$$

La diferencia de temperatura media logarítmica (o DTML por sus siglas), se calcula con la siguiente ecuación:

$$DTML = \frac{(T - T_S) - (T - T_E)}{\ln\left(\frac{(T - T_S)}{(T - T_E)}\right)}$$

Siendo:

T = La temperatura que se desea alcanzar dentro del tanque, 35°C.

T_E = La temperatura de entrada al serpentín, 70 °C.

T_S = La temperatura de salida del serpentín, 60 °C.

$$DTML = \frac{(35^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C}) - (35^\circ\text{C} - 70^\circ\text{C})}{\ln\left(\frac{(35^\circ\text{C} - 60^\circ\text{C})}{(35^\circ\text{C} - 70^\circ\text{C})}\right)}$$

$$DTML = -29,7^\circ\text{C}$$

La transferencia de calor del intercambiador de calor se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q = \Delta T_{ST} CP_{ST} M_{ST} = \Delta T_{serp} CP_{serp} M_{serp}$$

$$Q = (35^\circ\text{C} - 23^\circ\text{C}) 4,18 \frac{\text{kJ}}{\text{K kg}} 1.235 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$$

$$Q = 61.947,7 \frac{\text{kJ}}{\text{h}} = 17,2 \text{ kW}$$

A la transferencia de calor del serpentín se le debe añadir las pérdidas de calor del biodigestor, en el peor caso posible (durante los meses de invierno). A los 17,2 kW se le suman entonces los 18 kW de la pérdida de calor calculada en base a la temperatura más fría registrada en los últimos 12 meses (el pico del Gráfico 8), dando como resultado 35,2 kW.

Por último, el coeficiente global de transmisión de calor del serpentín (o U serpentín), en el caso de utilizar agua a 70 °C como fluido térmico a través de tuberías de acero inoxidable,

se encuentra entre 340 y 400 W/(m² °C) (The Engineering Toolbox, 2023a). Se utilizará el valor de 400 W/(m² °C).

Por lo tanto:

$$Q = A_{serp} U_{serp} DTML$$

$$35,2 \text{ kW} = A_{serp} 400 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}} 29,7^\circ\text{C}$$

$$A_{serp} = 2,96 \text{ m}^2$$

Se conocen las dimensiones de la tubería cilíndrica:

$$A_{serp} = L \pi D$$

$$2,96 \text{ m}^2 = L \pi 0,01905 \text{ m}$$

$$L = 49,50 \text{ m}$$

Se propone un diámetro de vueltas del serpentín de 5 metros, con una separación entre cada vuelta de 1 metro, la cantidad de vueltas y la altura del intercambiador de calor será de:

$$n_{vueltas} = \frac{L_{serp}}{\pi D_{vueltas}} = \frac{49,50 \text{ m}}{\pi 5 \text{ m}} = 3,151 \approx 3$$

$$h_{serp} = n_{vueltas} \text{ Separacion} = 3 * 1 \text{ m} = 3 \text{ m}$$

Anexo 1.j: Dimensionamiento de la caldera eléctrica a utilizar

Si se desea calentar el agua que se utilizará como fluido térmico en el intercambiador de calor o serpentín, se debe utilizar una caldera que pueda suministrar el calor necesario en el tiempo necesario para que el agua ingrese al serpentín a 70 °C.

En el caso de que se utilice un solo equipo con la potencia para calentar el caudal entrante de agua a utilizar por el serpentín, teniendo en cuenta que el serpentín utilizará alrededor de 25 litros de agua caliente por minuto y asumiendo que el agua se enfriará 5°C desde el momento que sale del serpentín hasta que ingresa nuevamente a la caldera, se utiliza la siguiente ecuación para encontrar la potencia mínima necesaria de la caldera:

$$Q_{caldera} = C e_{agua} M_{agua} \Delta T = Pot_{caldera}$$

$$4,148 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}} 25 \frac{\text{l}}{\text{min}} (70^\circ\text{C} - 55^\circ\text{C}) = Pot_{caldera}$$

$$1555,5 \frac{\text{kJ}}{60 \text{ seg}} = Pot_{caldera}$$

$$25,9 \text{ kW} = Pot_{caldera}$$

Se necesitará de una caldera de mínimo 26 kW para poder calentar 25 litros de agua desde 55°C hasta 70°C en un minuto.

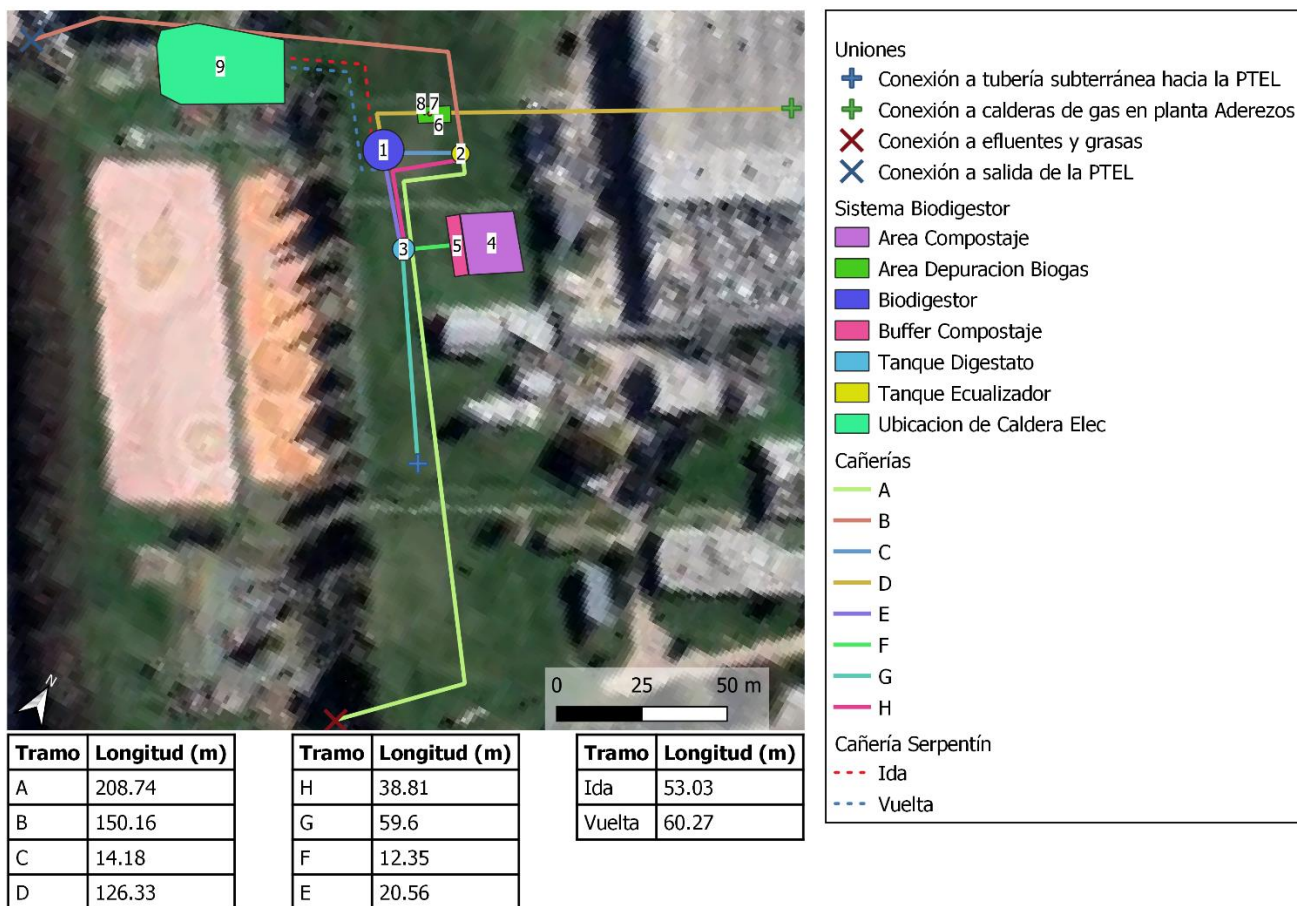
Anexo 2

En este apartado se detalla el plano obtenido posterior a la dimensión de los elementos que conforman el sistema del biodigestor y las características asociadas; como la longitud de las cañerías.



Mapa [21](#) - Fábrica Pilar de Unilever Argentina S.A. ilustrada sobre una imagen de Google Maps (Google, s.f.)⁵⁹.

⁵⁹ Recorte obtenido desde <https://goo.gl/maps/443JfMFk3UzFeBGt6>, mayo 2022.



Mapa 32 – Mapa de elaboración propia en base al dimensionamiento detallado en el Anexo 1 acerca del dimensionamiento del sistema biodigestor en la fábrica Pilar de Unilever Argentina S.A.

Anexo 3

En este apartado se detallan las memorias de cálculo, relacionadas con el dimensionamiento hidráulico del sistema biodigestor, analizadas en detalle y describiendo su razonamiento.

Anexo 3.a: Dimensionamiento del tramo A

Para determinar el diámetro de la cañería del tramo A, se utiliza la siguiente ecuación:

$$V = \frac{Q}{\pi \left(\frac{D^2}{4}\right)}$$

Siendo:

V = La velocidad del agua (m/s). Se recomienda una velocidad normal de operación de entre 0,6 m/s y 1 m/s (Metcalf & Eddy, 1995), se determina entonces en 0,75 m/s.

Q = El caudal del tramo (m³/s). Derivado de 9,35 m³/día.

D = El diámetro de la tubería (m).

$$D = \sqrt{\frac{4 Q}{\pi V}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 9,35 \frac{m^3}{día} \frac{día}{24 hrs} \frac{hrs}{60 min} \frac{min}{60 seg}}{\pi 0,75 \frac{m}{s}}}$$

$$D = 0,01355 m \approx 0,533 in$$

Se utilizará un diámetro estandarizado de media pulgada (½"), o bien, de 0,0127 m. Obteniendo así una velocidad de 0,854 m/s.

Anexo 3.b: Dimensionamiento del tramo B

Para determinar el diámetro de la cañería del tramo B, se utiliza la siguiente ecuación:

$$V = \frac{Q}{\pi \left(\frac{D^2}{4}\right)}$$

Siendo:

V = La velocidad del agua (m/s). Se recomienda una velocidad normal de operación de entre 0,6 m/s y 1 m/s (Metcalf & Eddy, 1995), se determina entonces en 0,75 m/s.

Q = El caudal del tramo (m³/s). Derivado de 20,4 m³/día.

D = El diámetro de la tubería (m).

$$D = \sqrt{\frac{4 Q}{\pi V}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 20,4 \frac{m^3}{dia} \frac{dia}{24 hrs} \frac{hrs}{60 min} \frac{min}{60 seg}}{\pi 0,75 \frac{m}{s}}}$$

$$D = 0,02 m \approx 0,787 in$$

Se utilizará un diámetro estandarizado de tres cuartos de pulgada ($\frac{3}{4}$ "), o bien, de 0,01905 m. Obteniendo así una velocidad de 0,828 m/s.

Anexo 3.c: Dimensionamiento de los tramos C, E y G

Estos tres tramos tendrán el mismo diámetro de cañería, y estará dado por la suma del caudal de los tramos entrantes (A, B y H). Se utiliza la siguiente ecuación:

$$V = \frac{Q}{\pi \left(\frac{D^2}{4}\right)}$$

Siendo:

V = La velocidad del agua (m/s). Se recomienda una velocidad normal de operación de entre 0,6 m/s y 1 m/s (Metcalf & Eddy, 1995), se determina entonces en 0,75 m/s.

Q = El caudal del tramo (m³/s). La suma del caudal de los tramos A, B y H da como resultado 34 m³/día.

D = El diámetro de la tubería (m).

$$D = \sqrt{\frac{4 Q}{\pi V}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 34 \frac{m^3}{dia} \frac{dia}{24 hrs} \frac{hrs}{60 min} \frac{min}{60 seg}}{\pi 0,75 \frac{m}{s}}}$$

$$D = 0,0258 m \approx 1,016 in$$

Se utilizará un diámetro estandarizado de una pulgada (1"), o bien, de 0,0254 m. Obteniendo así una velocidad de 0,777 m/s.

El tramo G se ha sobredimensionado para permitir liberar la totalidad del caudal entrante en caso de ser necesario.

Anexo 3.d: Dimensionamiento del tramo D

Para determinar la velocidad del biogás transportado en la cañería del tramo H, se utiliza la siguiente ecuación:

$$V = \frac{Q}{\pi \left(\frac{D^2}{4}\right)}$$

Siendo:

V = La velocidad del biogás (m/s). Se recomienda una velocidad normal de operación menor a 5 m/s (4eChile, 2018).

Q = El caudal del tramo (m³/s). Derivado de 239,54 m³/dia.

D = El diámetro de la tubería (m).

El diámetro de la tubería deberá ser compatible con los equipos seleccionados para depurar el biogás. En el caso de estudio, el diámetro nominal entrante de la trampa de condensado (modelo AQLCP01 de Aqualimpia) es de 80 mm, o bien, de 3". Además, el diámetro nominal utilizado en el equipo de depuración de ácido sulfhídrico (modelo AQL100ST de Aqualimpia) se encuentra entre 50 mm y 100 mm, o bien, entre 2" y 4".

Por lo que se deberá usar un diámetro de 3" o 76,2 mm. En ese caso, la velocidad del biogás será de 0,61 m/s, aceptable según el criterio anterior.

Anexo 3.e: Dimensionamiento del tramo F

Para determinar el diámetro de la cañería del tramo F, se utiliza la siguiente ecuación:

$$V = \frac{Q}{\pi \left(\frac{D^2}{4}\right)}$$

Siendo:

V = La velocidad del agua (m/s). Se recomienda una velocidad normal de operación de entre 0,6 m/s y 1 m/s (Metcalf & Eddy, 1995), se determina entonces en 0,75 m/s.

Q = El caudal del tramo (m³/s). Se debe tener en cuenta que la purga del digestato de 3,26 m³/dia se realizará durante 3-4 horas diarias.

D = El diámetro de la tubería (m).

$$D = \sqrt{\frac{4 Q}{\pi V}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 3,26 \frac{m^3}{3 \text{ hrs}} \frac{\text{hrs}}{60 \text{ min}} \frac{\text{min}}{60 \text{ seg}}}{\pi 0,75 \frac{m}{s}}}$$

$$D = 0,0226 \text{ m} \approx 0,891 \text{ in}$$

Se utilizará un diámetro estandarizado de una pulgada (1"), o bien, de 0,0254 m. Obteniendo así una velocidad de 0,60 m/s.

Anexo 3.f: Dimensionamiento del tramo H

Para determinar el diámetro de la cañería del tramo H, se utiliza la siguiente ecuación:

$$V = \frac{Q}{\pi \left(\frac{D^2}{4}\right)}$$

Siendo:

V = La velocidad del agua (m/s). Se recomienda una velocidad normal de operación de entre 0,6 m/s y 1 m/s (Metcalf & Eddy, 1995), se determina entonces en 0,75 m/s.

Q = El caudal del tramo (m³/s).

D = El diámetro de la tubería (m).

$$D = \sqrt{\frac{4 Q}{\pi V}}$$

$$D = \sqrt{\frac{4 * 4,25 \frac{m^3}{\text{dia}} \frac{\text{dia}}{24 \text{ hrs}} \frac{\text{hrs}}{60 \text{ min}} \frac{\text{min}}{60 \text{ seg}}}{\pi 0,75 \frac{m}{s}}}$$

$$D = 0,00914 \text{ m} \approx 0,360 \text{ in}$$

Se utilizará un diámetro estandarizado de tres octavos de pulgada ($\frac{3}{8}$ "), o bien, de 0,009525 m. Obteniendo así una velocidad de 0,69 m/s.

Anexo 3.g: Dimensionamiento del tramo I.1 y I.2

Para determinar el diámetro de la cañería de los tramos I.1 y I.2, se utiliza la siguiente ecuación:

$$V = \frac{Q}{\pi \left(\frac{D^2}{4}\right)}$$

Siendo:

V = La velocidad del agua (m/s).

Q = El caudal del tramo (m³/s). Derivado de 36 m³/día.

D = El diámetro de la tubería (m). En este caso, definida para encastrar en la caldera que calentará al intercambiador de calor, 0,01905 m.

$$V = \frac{36 \frac{m^3}{dia} \frac{dia}{24 hrs} \frac{hrs}{60 min} \frac{min}{60 seg}}{\pi \left(\frac{(0,01905 m)^2}{4}\right)} = 1,462 \frac{m}{s}$$

Anexo 3.h: Pérdidas de carga

Aunque no está dentro del alcance de este proyecto final la pérdida de carga dada por las conexiones de válvulas y codos, se estimará la pérdida de carga provocada por las tuberías. La pérdida de carga se puede estimar con la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_{carga} = \frac{\lambda L V^2}{2 g D}$$

Siendo:

λ = El factor de fricción de Darcy, también expresado como f .

L = La longitud de la cañería.

V = La velocidad del fluido dentro de la cañería.

g = El valor de la gravedad, que puede aproximarse a 9,8 m/seg².

D = El diámetro de la cañería.

El factor de Darcy puede calcularse utilizando la ecuación de Colebrook-White:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 * \log\left(\frac{k_r}{3,71} + \frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}}\right)$$

Siendo:

k_r = La rugosidad relativa, también expresada como rugosidad del material sobre diámetro de la tubería.

Re = El número de Reynolds. En tuberías completamente llenas, como es el caso de estudio, este puede calcularse como el diámetro de la tubería multiplicado por la velocidad del fluido y su densidad, sobre la viscosidad cinemática.

El factor de fricción de Darcy depende en gran medida del tipo de flujo dentro de la tubería. Se establecen entonces dos situaciones en base al comportamiento esperado del biogás y del efluente transportado que simplificarán la ecuación de Colebrook:

- El biogás está en estado gaseoso y es transportado en una tubería de PVC (considerada hidráulicamente lisa y con una fricción despreciable), por lo que su flujo se asume liso. Resultando en la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \log\left(\frac{2,51}{Re \sqrt{\lambda}}\right)$$

- El efluente en estado líquido será transportado por una cañería de acero inoxidable, por lo que su flujo se asume turbulento intermedio. Resultando en la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -1,8 \log\left(\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{k_r}{3,7}\right)^{1,11}\right)$$

A su vez, el número de Reynolds puede calcularse utilizando la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu}$$

La velocidad del fluido y el diámetro de la cañería fueron calculados en el Anexo 3.a-f para todos los tramos involucrados. Por lo que se debe identificar la densidad del fluido, la viscosidad dinámica del fluido, la rugosidad relativa del acero inoxidable y la longitud de cada tramo de cañería. Se asume que el efluente, una vez mezclado con el agua recirculada, se comportará físicamente como el agua para simplificar los cálculos. A su vez, se asume el comportamiento físico del biogás como metano puro.

Las longitudes estimadas de los caños se obtienen del mapa de elaboración propia del Anexo 2, se añaden metros para obtener longitudes redondas y realizar cálculos sobre estimativos. Las densidades, viscosidades dinámicas y la rugosidad se obtienen de la bibliografía de manera de obtener los valores necesarios para calcular la pérdida de carga:

T#	Diámetro (m)	Diámetro (in)	Longitud en el mapa (m)	Longitud Estimada (m)	Velocidad del fluido (m/s)	T (°C)	Densidad (T) (kg/m ³)	Viscosidad Dinámica (T) (kg/m seg)
A	0,0127	0,500	208,74	210	0,854	23	997,62	0,000933
B	0,0191	0,750	150,16	152	0,828	23	997,62	0,000933
H	0,0095	0,375	38,81	40	0,690	35	994,04	0,000719
C	0,0254	1,000	14,18	15	0,777	23	997,62	0,000933
E	0,0254	1,000	20,56	22	0,777	35	994,04	0,000719
F	0,0254	1,000	12,35	13	0,600	35	1005,00	0,000719
G	0,0254	1,000	59,60	60	0,777	35	994,04	0,000719
D	0,0762	3,000	126,33	127	0,610	35	1,145	0,000001
I.1	0,0191	0,750	53,03	55	1,462	70	977,78	0,000406
I.2	0,0191	0,750	60,27	62	1,462	55	985,71	0,000504

Tabla 18 – Características hidráulicas respectivas de cada tramo de cañería⁶⁰.

T#	Número de Reynolds	Material de la tubería	Rugosidad (in)	Rugosidad relativa	Factor de fricción de Darcy	Pérdida de carga (m)
A	11597	Acero Inoxidable	0,00175	0,0035	0,0346	21,31
B	16866	Acero Inoxidable	0,00175	0,0023	0,0309	8,62
H	9086	Acero Inoxidable	0,00175	0,0047	0,0376	3,84
C	21103	Acero Inoxidable	0,00175	0,0018	0,0288	0,52
E	27285	Acero Inoxidable	0,00175	0,0018	0,0277	0,74
F	21302	Acero Inoxidable	0,00175	0,0018	0,0287	0,27
G	27285	Acero Inoxidable	0,00175	0,0018	0,0277	2,01
D	25588	PVC	-	-	0,0244	0,77
I.1	67075	Acero Inoxidable	0,00175	0,0023	0,0264	8,33
I.2	54470	Acero Inoxidable	0,00175	0,0023	0,0269	9,53

Tabla 19 – Características calculadas en base a los valores de la tabla 8⁶¹.

Para los valores de rugosidad del acero se ha asumido que el acero comercial es el acero que más se asemeja a las tuberías que serán utilizadas para el proyecto. Como los diámetros son más pequeños de los que aparecen en el Ilustración 26, se procede a obtener la constante de rugosidad del acero comercial multiplicando distintos valores de rugosidad relativa por el diámetro propuesto por el gráfico, obteniendo así la constante de 0,00175 pulgadas.

⁶⁰ Tabla de elaboración propia, la información del tramo I.1 fue obtenida de UNCUIYO (2012), la información de los tramos E, F, G, D y I.2 fue obtenida de The Engineering Mindset (2023), la información de los tramos A, B y C fue obtenida de Thermexcel (2023) y la información del tramo H fue obtenida de The Engineering ToolBox (2023b).

⁶¹ Tabla de elaboración propia calculada con los datos obtenidos de la Tabla 18.

A-21a. Rugosidad relativa de los materiales de las tuberías y factor de fricción para flujo en régimen de turbulencia total

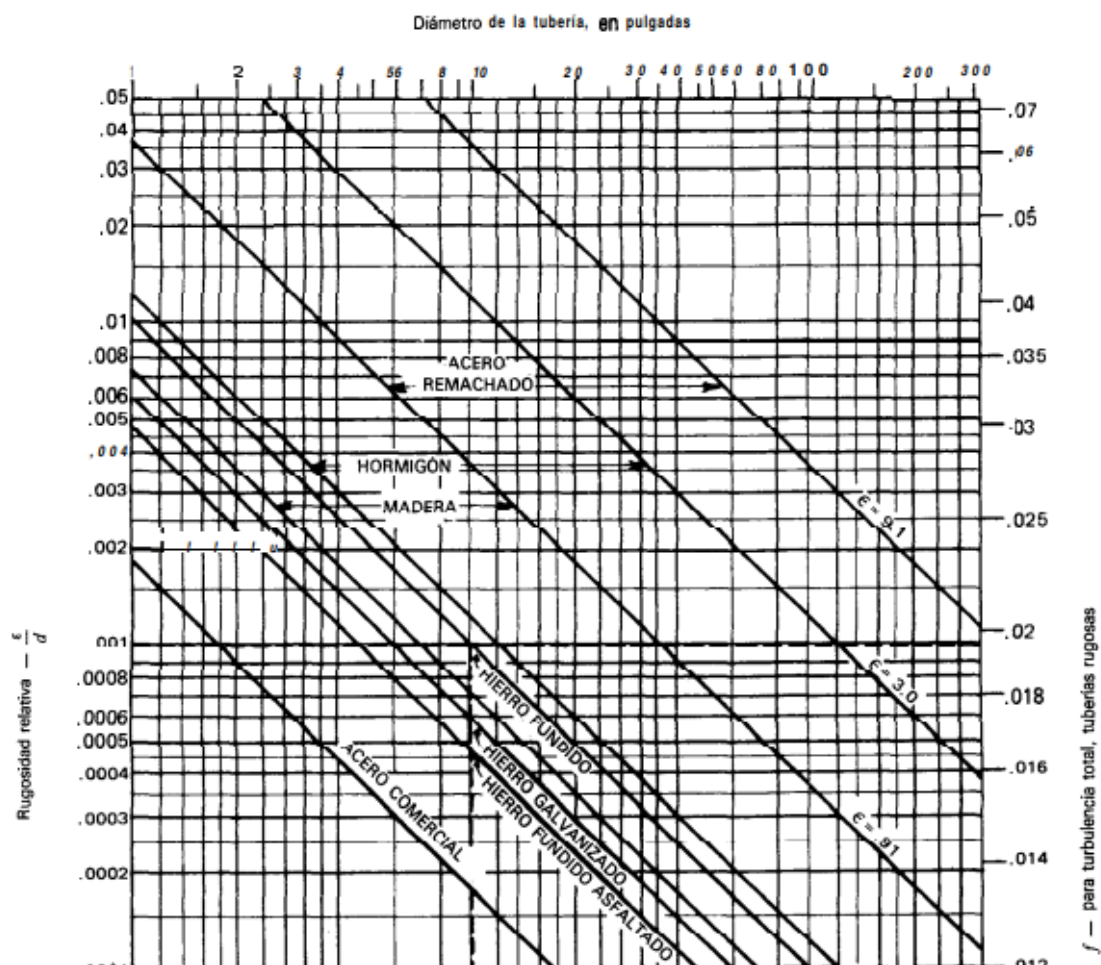


Ilustración 2426—Rugosidad relativa de los materiales de tuberías y factor de fricción para flujo en régimen de turbulencia total⁶².

Cabe aclarar que el factor de fricción de Darcy para el tramo D, que llevará el biogas obtenido de la digestión del efluente, debe calcularse mediante iteraciones. En este caso, se realizaron cinco iteraciones, utilizando como base el factor de fricción de Darcy promedio calculado en los demás tramos: 0,03. De manera que se obtuvo:

Iteración	Variable	Valor
1	f1 (inicial)	0,03000
	f1 (final)	0,02371
2	f2 (inicial)	0,02371
	f2 (final)	0,02448
3	f3 (inicial)	0,02448
	f3 (final)	0,02437
4	f4 (inicial)	0,02437
	f4 (final)	0,02439
5	f5 (inicial)	0,02439
	f5 (final)	0,02438
Valor Final de f		0,02440

Tabla 20 – Iteraciones realizadas para obtener el valor del factor de fricción de Darcy para el tramo de cañería D⁶³.

⁶³ Tabla de elaboración propia en base a las iteraciones realizadas para calcular el factor de fricción de Darcy para el tramo de la cañería D.

Anexo 4

En este apartado se detallan las memorias de cálculo, relacionadas con el consumo energético del sistema biodigestor, analizadas en detalle y describiendo su razonamiento.

Anexo 4.a: Bombas hidráulicas

Se deben instalar bombas para compensar las pérdidas de carga del sistema biodigestor y mantener el fluido circulando a un caudal constante. Se calculan las potencias necesarias para las siguientes bombas en el sistema:

1. Bomba de alimentación del tanque ecualizador - Efluente (tramo A)

Para dimensionar la potencia necesaria para la bomba se debe calcular primero la altura manométrica con la ecuación de Bernoulli para un fluido incompresible:

$$\frac{P_1}{g \times p} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + Hb = \frac{P_2}{g \times p} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + hf$$

Siendo:

P_1 = La presión del fluido en el punto de aspiración de la bomba. Se toma la superficie libre del tanque ecualizador, es decir, 1 atm.

P_2 = La presión del fluido en el punto de descarga de la bomba. Se realiza la descarga por la parte superior, es decir, 1 atm.

p = La densidad del sustrato.

v_1 = La velocidad del fluido en el ingreso del tanque. La velocidad será en la superficie libre del tanque, por lo que será 0 m/s.

v_2 = La velocidad de descarga en el punto de descarga de la bomba.

g = El valor de la aceleración de la gravedad, 9,8 m/s².

Z_1 = La altura a la que se encuentra el punto de succión de la bomba. Se asume que el punto de succión de la bomba se encontrará a 0,5 metros.

Z_2 = La altura a la que se encuentra el punto de descarga de la bomba. Se asume que el punto de descarga de la bomba se encontrará a 3 metros por encima del punto de succión, por lo que la altura total será de 3,5 metros.

Hb = La altura manométrica.

hf = Las pérdidas de carga que se producen en el tramo.

Si se despeja la altura manométrica, quedará entonces:

$$Hb = \frac{(P_2 - P_1)}{g \cdot \rho} + \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2g} + (Z_2 - Z_1) + hf$$

$$Hb_A = \frac{(0,854 \frac{m}{s})^2}{19,6 \frac{m}{s^2}} + (3 m) + 21,3 m = 0,037 m + 3 m + 21,3 m$$

$$Hb_A = 24,34 m$$

La potencia necesaria para dicha bomba se calculará entonces de la siguiente manera:

$$Pot = w \cdot g \cdot Hb$$

Siendo:

Pot = La potencia de la bomba (en W).

Hb = La altura manométrica (en m).

w = El caudal másico impulsado (en kg/s).

g = El valor de la aceleración de la gravedad, 9,8 m/s².

$$Pot_A = 997,62 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,35 \frac{m^3}{dia} \cdot \frac{dia}{24 hrs} \cdot \frac{hrs}{60 min} \cdot \frac{min}{60 s} \cdot 9,8 \frac{m}{s^2} \cdot 24,34 m$$

$$Pot_A = 25,752 \frac{kg}{s} \cdot \frac{m}{s^2} = 25,752 \frac{J}{s} = 25,752 W$$

2. Bomba de alimentación del tanque ecualizador – Agua recirculada (tramo B)

Para dimensionar la potencia necesaria para la bomba se debe calcular primero la altura manométrica con la ecuación de Bernoulli para un fluido incompresible:

$$\frac{P_1}{g \cdot \rho} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + Hb = \frac{P_2}{g \cdot \rho} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + hf$$

Siendo:

P_1 = La presión del fluido en el punto de aspiración de la bomba. Se toma la superficie libre del tanque ecualizador, es decir, 1 atm.

P_2 = La presión del fluido en el punto de descarga de la bomba. Se realiza la descarga por la parte superior, es decir, 1 atm.

ρ = La densidad del sustrato.

v_1 = La velocidad del fluido en el ingreso del tanque. La velocidad será en la superficie libre del tanque, por lo que será 0 m/s.

v_2 = La velocidad de descarga en el punto de descarga de la bomba.

g = El valor de la aceleración de la gravedad, 9,8 m/s².

Z_1 = La altura a la que se encuentra el punto de succión de la bomba. Se asume que el punto de succión de la bomba se encontrará a 0,5 metros.

Z_2 = La altura a la que se encuentra el punto de descarga de la bomba. Se asume que el punto de descarga de la bomba se encontrará a 3 metros por encima del punto de succión, por lo que la altura total será de 3,5 metros.

Hb = La altura manométrica.

hf = Las pérdidas de carga que se producen en el tramo.

Si se despeja la altura manométrica, quedará entonces:

$$Hb = \frac{(P_2 - P_1)}{g \rho} + \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2g} + (Z_2 - Z_1) + hf$$

$$Hb_B = \frac{(0,828 \frac{m}{s})^2}{19,6 \frac{m}{s^2}} + (3 m) + 8,62 m = 0,035 m + 3 m + 8,62 m$$

$$Hb_B = 11,66 m$$

La potencia necesaria para dicha bomba se calculará entonces de la siguiente manera:

$$Pot = w g Hb$$

Siendo:

Pot = La potencia de la bomba (en W).

Hb = La altura manométrica (en m).

w = El caudal másico impulsado (en kg/s).

g = El valor de la aceleración de la gravedad, 9,8 m/s².

$$Pot_B = 997,62 \frac{kg}{m^3} 20,4 \frac{m^3}{dia} \frac{dia}{24 hrs} \frac{hrs}{60 min} \frac{min}{60 s} 9,8 \frac{m}{s^2} 11,66 m$$

$$Pot_B = 26,916 \frac{kg}{s} \frac{m}{s^2} = 26,916 \frac{J}{s} = 26,196 W$$

3. Bomba de alimentación del tanque ecualizador – Digerido recirculado (tramo H)

Para dimensionar la potencia necesaria para la bomba se debe calcular primero la altura manométrica con la ecuación de Bernoulli para un fluido incompresible:

$$\frac{P_1}{g \times p} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + Hb = \frac{P_2}{g \times p} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + hf$$

Siendo:

P_1 = La presión del fluido en el punto de aspiración de la bomba. Se toma la superficie libre del tanque de digestato, es decir, 1 atm.

P_2 = La presión del fluido en el punto de descarga de la bomba. Se realiza la descarga por la parte superior del tanque ecualizador, es decir, 1 atm.

p = La densidad del sustrato.

v_1 = La velocidad del fluido en el ingreso del tanque. La velocidad será en la superficie libre del tanque, por lo que será 0 m/s.

v_2 = La velocidad de descarga en el punto de descarga de la bomba.

g = El valor de la aceleración de la gravedad, 9,8 m/s².

Z_1 = La altura a la que se encuentra el punto de succión de la bomba. Se asume que el punto de succión de la bomba se encontrará a 3 metros.

Z_2 = La altura a la que se encuentra el punto de descarga de la bomba. Se asume que el punto de descarga de la bomba se encontrará a 3 metros.

Hb = La altura manométrica.

hf = Las pérdidas de carga que se producen en el tramo.

Si se despeja la altura manométrica, quedará entonces:

$$Hb = \frac{(P_2 - P_1)}{g \times p} + \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2g} + (Z_2 - Z_1) + hf$$

$$Hb_H = \frac{(0,690 \frac{m}{s})^2}{19,6 \frac{m}{s^2}} + 3,84 m = 0,024 m + 3,84 m$$

$$Hb_H = 3,86 m$$

La potencia necesaria para dicha bomba se calculará entonces de la siguiente manera:

$$Pot = w g Hb$$

Siendo:

Pot = La potencia de la bomba (en hp).

Hb = La altura manométrica (en m).

w = El caudal másico impulsado (en kg/s).

g = El valor de la aceleración de la gravedad, 9,8 m/s².

$$Pot_H = 994,04 \frac{kg}{m^3} 4,25 \frac{m^3}{dia} \frac{dia}{24 hrs} \frac{hrs}{60 min} \frac{min}{60 s} 9,8 \frac{m}{s^2} 3,86 m$$

$$Pot_H = 1,85 \frac{kg}{s} \frac{m}{s^2} = 1,85 \frac{J}{s} = 1,85 W$$

4. Bomba de alimentación del biodigestor anaeróbico (tramo C)

Para dimensionar la potencia necesaria para la bomba se debe calcular primero la altura manométrica con la ecuación de Bernoulli para un fluido incompresible:

$$\frac{P_1}{g \times p} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + Hb = \frac{P_2}{g \times p} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + hf$$

Siendo:

P_1 = La presión del fluido en el punto de aspiración de la bomba. Se extrae el agua desde la mitad del tanque ecualizador (a 1,5 metros), por lo que la presión de la columna de efluente, si se asume un comportamiento similar al del agua será de 115,981 kPa.

P_2 = La presión del fluido en el punto de descarga de la bomba. El punto de descarga se encuentra a una altura de $\frac{3}{4}$ de la altura del tanque del biodigestor (a 1,5 metros), por lo que la presión de la columna del efluente, si se asume un comportamiento similar al del agua será de 115,981 kPa.

p = La densidad del sustrato. Se asume un comportamiento del efluente similar al del agua.

v_1 = La velocidad del fluido en el ingreso del tanque. La velocidad se asume 0 m/s.

v_2 = La velocidad de descarga en el punto de descarga de la bomba.

g = El valor de la aceleración de la gravedad, 9,8 m/s².

Z_1 = La altura a la que se encuentra el punto de succión de la bomba. El punto de succión de la bomba se encontrará a 1,5 metros.

Z_2 = La altura a la que se encuentra el punto de descarga de la bomba. El punto de descarga de la bomba se encontrará a 1,5 metros.

Hb = La altura manométrica.

hf = Las pérdidas de carga que se producen en el tramo.

Si se despeja la altura manométrica, quedará entonces:

$$Hb = \frac{(P_2 - P_1)}{g \rho} + \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2g} + (Z_2 - Z_1) + hf$$

$$Hb_c = \frac{(115,981 \text{ kPa} - 115,981 \text{ kPa})}{9.770,6 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2 \text{m}^2}} + \frac{(0,777 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{19,6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 0,52 \text{ m} = 0 \text{ m} + 0,031 \text{ m} + 0,52 \text{ m}$$

$$Hb_c = 0,55 \text{ m}$$

La potencia necesaria para dicha bomba se calculará entonces de la siguiente manera:

$$Pot = w g Hb$$

Siendo:

Pot = La potencia de la bomba (en hp).

Hb = La altura manométrica (en m).

w = El caudal másico impulsado (en kg/s).

g = El valor de la aceleración de la gravedad, 9,8 m/s².

$$Pot_c = 997,62 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} 34 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} \frac{\text{dia}}{24 \text{ hrs}} \frac{\text{hrs}}{60 \text{ min}} \frac{\text{min}}{60 \text{ s}} 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} 0,55 \text{ m}$$

$$Pot_c = 2,12 \frac{\text{kg m}}{\text{s s}^2} = 2,12 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 2,12 \text{ W}$$

5. Bomba de alimentación del tanque digestato (tramo E)

Para dimensionar la potencia necesaria para la bomba se debe calcular primero la altura manométrica con la ecuación de Bernoulli para un fluido incompresible:

$$\frac{P_1}{g \rho} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + Hb = \frac{P_2}{g \rho} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + hf$$

Siendo:

P_1 = La presión del fluido en el punto de aspiración de la bomba. Se extrae el agua desde el fondo del tanque del biodigestor (a 5,96 metros), por lo que la presión de la columna de efluente, si se asume un comportamiento similar al del agua será de 159,558 kPa.

P_2 = La presión del fluido en el punto de descarga de la bomba. Se realiza la descarga por la parte superior del tanque digestato, es decir, 101,325 kPa (o 1 atm).

p = La densidad del sustrato.

v_1 = La velocidad del fluido en el ingreso del tanque. La velocidad será en la superficie libre del tanque, por lo que será 0 m/s.

v_2 = La velocidad de descarga en el punto de descarga de la bomba.

g = El valor de la aceleración de la gravedad, 9,8 m/s².

Z_1 = La altura a la que se encuentra el punto de succión de la bomba. El punto de succión de la bomba se encontrará a 0,5 metros.

Z_2 = La altura a la que se encuentra el punto de descarga de la bomba. El punto de descarga de la bomba se encontrará a 3 metros.

Hb = La altura manométrica.

hf = Las pérdidas de carga que se producen en el tramo.

Si se despeja la altura manométrica, quedará entonces:

$$Hb = \frac{(P_2 - P_1)}{g \cdot p} + \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2g} + (Z_2 - Z_1) + hf$$

$$Hb_E = \frac{(101,325 \text{ kPa} - 159,558 \text{ kPa})}{9.770,6 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2 \text{m}^3}} + \frac{\left(0,777 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{19,6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 2,5 \text{ m} + 3,84 \text{ m}$$

$$Hb_E = -5,96 \text{ m} + 0,031 \text{ m} + 2,5 \text{ m} + 0,74 \text{ m}$$

$$Hb_E = -2,69 \text{ m}$$

Dado que la altura manométrica es negativa, no hará falta colocar una bomba. De ser necesario, podrán colocarse elementos que aumenten la resistencia del fluido para disminuir la presión a valores aceptables.

6. Bomba de alimentación del área de compostaje (tramo F)

Para dimensionar la potencia necesaria para la bomba se debe calcular primero la altura manométrica con la ecuación de Bernoulli para un fluido incompresible:

$$\frac{P_1}{g \times p} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + Hb = \frac{P_2}{g \times p} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + hf$$

Siendo:

P_1 = La presión del fluido en el punto de aspiración de la bomba. Se extrae el agua desde el fondo del tanque del biodigestor (a 3 metros), por lo que la presión de la columna de efluente, si se asume un comportamiento similar al del agua será de 130,637 kPa.

P_2 = La presión del fluido en el punto de descarga de la bomba. Se realiza la descarga por la parte superior del tanque ecualizador, es decir, 101,325 kPa (o 1 atm).

p = La densidad del sustrato.

v_1 = La velocidad del fluido en el ingreso del tanque. La velocidad será en la superficie libre del tanque, por lo que será 0 m/s.

v_2 = La velocidad de descarga en el punto de descarga de la bomba.

g = El valor de la aceleración de la gravedad, 9,8 m/s².

Z_1 = La altura a la que se encuentra el punto de succión de la bomba. El punto de succión de la bomba se encontrará a 0,5 metros.

Z_2 = La altura a la que se encuentra el punto de descarga de la bomba. El punto de descarga de la bomba se encontrará a 0,5 metros.

Hb = La altura manométrica.

hf = Las pérdidas de carga que se producen en el tramo.

Si se despeja la altura manométrica, quedará entonces:

$$Hb = \frac{(P_2 - P_1)}{g \times p} + \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2g} + (Z_2 - Z_1) + hf$$

$$Hb_F = \frac{(101,325 \text{ kPa} - 130,637 \text{ kPa})}{9.770,6 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2 \text{m}^2}} + \frac{\left(0,6 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{19,6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 0,27 \text{ m}$$

$$Hb_F = -3 \text{ m} + 0,02 \text{ m} + 0,27 \text{ m}$$

$$Hb_F = -2,71 \text{ m}$$

Dado que la altura manométrica es negativa, no hará falta colocar una bomba. De ser necesario, podrán colocarse elementos que aumenten la resistencia del fluido para disminuir la

presión a valores aceptables. En este caso se abrirá una válvula cuando se necesite descargar el barro resultante.

7. Bomba de alimentación a la planta de tratamiento de efluentes (tramo G)

Para dimensionar la potencia necesaria para la bomba se debe calcular primero la altura manométrica con la ecuación de Bernoulli para un fluido incompresible:

$$\frac{P_1}{g \times p} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + Hb = \frac{P_2}{g \times p} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + hf$$

Siendo:

P_1 = La presión del fluido en el punto de aspiración de la bomba. Se toma la superficie libre del tanque de digestato, es decir, 1 atm.

P_2 = La presión del fluido en el punto de descarga de la bomba. Se realiza la descarga en la planta de tratamiento de efluentes, que es abierta, es decir, 1 atm.

p = La densidad del sustrato.

v_1 = La velocidad del fluido en el ingreso del tanque. La velocidad será en la superficie libre del tanque, por lo que será 0 m/s.

v_2 = La velocidad de descarga en el punto de descarga de la bomba.

g = El valor de la aceleración de la gravedad, 9,8 m/s².

Z_1 = La altura a la que se encuentra el punto de succión de la bomba. Se asume que el punto de succión de la bomba se encontrará a 3 metros.

Z_2 = La altura a la que se encuentra el punto de descarga de la bomba. Se asume que el punto de descarga de la bomba se encontrará a 0,5 metros.

Hb = La altura manométrica.

hf = Las pérdidas de carga que se producen en el tramo.

Si se despeja la altura manométrica, quedará entonces:

$$Hb = \frac{(P_2 - P_1)}{g \times p} + \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2g} + (Z_2 - Z_1) + hf$$

$$Hb_G = \frac{(0,777 \frac{m}{s})^2}{19,6 \frac{m}{s^2}} + (0,5 \text{ m} - 3 \text{ m}) + 2,01 \text{ m} = 0,031 \text{ m} - 2,5 \text{ m} + 2,01 \text{ m}$$

$$Hb_G = -0,47 \text{ m}$$

Dado que la altura manométrica es negativa, no hará falta colocar una bomba. De ser necesario, podrán colocarse elementos que aumenten la resistencia del fluido para disminuir la presión a valores aceptables.

8. Bomba de alimentación del biogás generado (tramo D)

El biogás generado no cumple con las condiciones para comportarse como un fluido incompresible, la velocidad de desplazamiento es baja y no se esperan cambios de presión bruscos (se asumen cambios de presión despreciables para los filtros que se utilizarán en pasos posteriores). Para dimensionar la potencia necesaria para la unidad de bombeo se debe calcular primero la altura manométrica con la ecuación de Bernoulli para un fluido incompresible:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + H_b = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + h_f$$

Siendo:

P_1 = La presión del fluido en el punto de aspiración de la unidad de bombeo, o presión dentro de la campana de biogás.

P_2 = La presión del fluido en el punto de descarga de la unidad de bombeo. De acuerdo con las especificaciones de quemadores para calderas industriales (Thermal Combustion, 2023), la presión de entrada al quemador se encuentra entre los 16 mbar y 100 mbar; para este caso se utilizará 100 mbar, o bien 10 kPa.

ρ = La densidad del biogás.

v_1 = La velocidad del fluido dentro de la campana de biogás, por lo que será 0 m/s.

v_2 = La velocidad de descarga en el punto de descarga de la unidad de bombeo (0,61 m/s).

g = El valor de la aceleración de la gravedad, 9,8 m/s².

Z_1 = La altura a la que se encuentra el punto de succión de la unidad de bombeo. El punto de succión de la bomba se encontrará en la parte inferior de la campana (a 5,96 metros).

Z_2 = La altura a la que se encuentra el punto de descarga de la unidad de bombeo. Se asume que el punto de descarga se encontrará a 1,5 metros.

H_b = La altura manométrica.

h_f = Las pérdidas de carga que se producen en el tramo.

La presión absoluta dentro de la campana puede estimarse utilizando la ecuación de gases ideales:

$$PV = nRT$$

$$P_1 = \frac{nRT}{V} = \frac{RT\rho}{M_{molar}}$$

$$P_1 = \frac{308,15 \text{ K } 0,082 \frac{\text{L atm}}{\text{mol K}} 1,145 \frac{\text{g}}{\text{L}}}{(0,7 M_{CH_4} + 0,3 M_{CO_2})}$$

$$P_1 = \frac{28,932 \frac{\text{g atm}}{\text{mol}}}{(0,7 \cdot 16 \frac{\text{g}}{\text{mol}} + 0,3 \cdot 44 \frac{\text{g}}{\text{mol}})} = \frac{28,932 \frac{\text{g atm}}{\text{mol}}}{24,4 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}$$

$$P_1 = 1,186 \text{ atm} = 188,46 \text{ kPa}$$

Si se despeja la altura manométrica, quedará entonces:

$$Hb = \frac{(P_2 - P_1)}{\rho g} + \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2g} + (Z_2 - Z_1) + hf$$

$$Hb_D = \frac{(10 \text{ kPa} - 188,46 \text{ kPa})}{9.770,6 \frac{\text{kg}}{\text{s}^2 \text{m}^2}} + \frac{(0,61 \frac{\text{m}}{\text{s}})^2}{19,6 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}} + 0,77 \text{ m} = -18,27 \text{ m} + 0,02 \text{ m} + 0,77 \text{ m}$$

$$Hb_D = -17,48 \text{ m}$$

Dado que la altura manométrica es negativa, no hará falta colocar una bomba. De ser necesario, podrán colocarse elementos que aumenten la resistencia del fluido para disminuir la presión a valores aceptables. Teniendo en cuenta que se ha despreciado las diferencias de presión que provocarán los filtros de la unidad depuradora, el biogás podrá transportarse sin necesidad de colocar una unidad de bombeo.

9. Bomba del circuito del serpentín – Sentido entrante al biodigestor (tramo I.1)

Para dimensionar la potencia necesaria para la bomba se debe calcular primero la altura manométrica con la ecuación de Bernoulli para un fluido incompresible:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + Hb = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + hf$$

Siendo:

P_1 = La presión del fluido en el punto de aspiración de la bomba. Se asume que la presión será constante en el punto de aspiración y descarga de la bomba, debido a que es un circuito cerrado con flujo de un fluido incompresible.

P_2 = La presión del fluido en el punto de descarga de la bomba. Se asume que la presión será constante en el punto de aspiración y descarga de la bomba, debido a que es un circuito cerrado con flujo de un fluido incompresible.

p = La densidad del sustrato.

v_1 = La velocidad del fluido en la salida de la caldera. La velocidad será la misma que al ingreso de la caldera, es decir, 1,462 m/s.

v_2 = La velocidad de descarga en el punto de descarga de la bomba, 1,462 m/s.

g = El valor de la aceleración de la gravedad, 9,8 m/s².

Z_1 = La altura a la que se encuentra el punto de succión de la bomba. Se asume que el punto de succión de la bomba se encontrará a la altura donde se posicione la caldera, es decir, 2 metros.

Z_2 = La altura a la que se encuentra el punto de descarga de la bomba. El punto de descarga de la bomba se encontrará a 4,19 metros (3 metros sobre la base cónica del biodigestor).

Hb = La altura manométrica.

hf = Las pérdidas de carga que se producen en el tramo.

Si se despeja la altura manométrica, quedará entonces:

$$Hb = \frac{(P_2 - P_1)}{g \cdot p} + \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2g} + (Z_2 - Z_1) + hf$$

$$Hb_{l.1} = (4,19m - 2m) + 8,33m = 2,19m + 8,33m$$

$$Hb_{l.1} = 10,52m$$

La potencia necesaria para dicha bomba se calculará entonces de la siguiente manera:

$$Pot = w \cdot g \cdot Hb$$

Siendo:

Pot = La potencia de la bomba (en hp).

Hb = La altura manométrica (en m).

w = El caudal másico impulsado (en kg/s).

g = El valor de la aceleración de la gravedad, 9,8 m/s².

$$Pot_{I,1} = 997,78 \frac{kg}{m^3} 36 \frac{m^3}{dia} \frac{dia}{24 hrs} \frac{hrs}{60 min} \frac{min}{60 s} 9,8 \frac{m}{s^2} 10,52 m$$

$$Pot_{I,1} = 42,861 \frac{kg}{s} \frac{m}{s^2} = 42,861 \frac{J}{s} = 42,861 W$$

10. Bomba del circuito del serpentín – Sentido saliente del biodigestor (tramo I.2)

Para dimensionar la potencia necesaria para la bomba se debe calcular primero la altura manométrica con la ecuación de Bernoulli para un fluido incompresible:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + Hb = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + hf$$

Siendo:

P_1 = La presión del fluido en el punto de aspiración de la bomba. Se asume que la presión será constante en el punto de aspiración y descarga de la bomba, debido a que es un circuito cerrado con flujo de un fluido incompresible.

P_2 = La presión del fluido en el punto de descarga de la bomba. Se asume que la presión será constante en el punto de aspiración y descarga de la bomba, debido a que es un circuito cerrado con flujo de un fluido incompresible.

ρ = La densidad del sustrato.

v_1 = La velocidad del fluido en la salida del tanque, 1,462 m/s.

v_2 = La velocidad de descarga en el punto de descarga de la bomba, a la entrada de la caldera, 1,462 m/s.

g = El valor de la aceleración de la gravedad, 9,8 m/s².

Z_1 = La altura a la que se encuentra el punto de succión de la bomba. El punto de succión de la bomba se encontrará a 1,19 metros (altura de la base cónica del biodigestor).

Z_2 = La altura a la que se encuentra el punto de descarga de la bomba. Se asume que el punto de descarga de la bomba se encontrará a la altura donde se posicione la caldera, es decir, 2 metros.

Hb = La altura manométrica.

hf = Las pérdidas de carga que se producen en el tramo.

Si se despeja la altura manométrica, quedará entonces:

$$Hb = \frac{(P_2 - P_1)}{g \cdot p} + \frac{(v_2^2 - v_1^2)}{2g} + (Z_2 - Z_1) + hf$$

$$Hb_{1,2} = (2 \text{ m} - 1,19 \text{ m}) + 9,53 \text{ m} = 0,81 \text{ m} + 9,53 \text{ m}$$

$$Hb_{1,2} = 10,34 \text{ m}$$

La potencia necesaria para dicha bomba se calculará entonces de la siguiente manera:

$$Pot = w \cdot g \cdot Hb$$

Siendo:

Pot = La potencia de la bomba (en hp).

Hb = La altura manométrica (en m).

w = El caudal másico impulsado (en kg/s).

g = El valor de la aceleración de la gravedad, 9,8 m/s².

$$Pot_{1,2} = 985,71 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 36 \frac{\text{m}^3}{\text{dia}} \cdot \frac{\text{dia}}{24 \text{ hrs}} \cdot \frac{\text{hrs}}{60 \text{ min}} \cdot \frac{\text{min}}{60 \text{ s}} \cdot 9,8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 10,34 \text{ m}$$

$$Pot_{1,2} = 41,618 \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s} \cdot \text{s}^2} = 41,618 \frac{\text{J}}{\text{s}} = 41,618 \text{ W}$$

Anexo 4.b: Sistema de mezclado o agitación

Se utilizarán mezcladores de hélice para el mezclado o agitación de los tanques y así asegurar su homogenización. Según Metcalf & Eddy (1995), según el comportamiento del fluido dentro del tanque, se utilizarán distintas ecuaciones para determinar la potencia necesaria para el funcionamiento de dicha hélice. Se tendrá un sistema de agitación por cada tanque que haya en el sistema.

1. Potencia del agitador del tanque de ecualización

Primero, se determina el tipo de flujo para poder utilizar la ecuación correspondiente.

Con la ecuación de Reynolds se obtiene entonces:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

Siendo:

ρ = La densidad del fluido (en kg/m³).

V = La velocidad del fluido (en m/s).

D = El diámetro de la cañería desde donde se la transporta (en m).

μ = La viscosidad dinámica del fluido (en kg /m s).

Si se toman los valores del mayor caudal entrante (tramo B), se obtiene:

$$Re = \frac{997,62 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,828 \frac{m}{s} \cdot 0,0191 m}{0,000933 \frac{kg}{m \cdot s}} = 16.866$$

Todo flujo con número de Reynolds mayor a 4.000 se considera turbulento, por lo que se usa la siguiente ecuación para determinar la potencia del agitador:

$$Pot = k \rho n^3 D^5$$

Siendo:

Pot = La potencia del agitador (en W).

ρ = La densidad del fluido agitado (en kg/m³). En este caso, se asume 997,62 kg/m³.

n = El número de revoluciones por segundo del agitador (en 1/s).

k = La constante de agitación, se asume un valor de 0,32 (Metcalf&Eddy, 1995).

D = El diámetro impulsor.

El diámetro impulsor se obtiene de la semejanza geométrica de impulsor tipo hélice (Uribe, 2013):

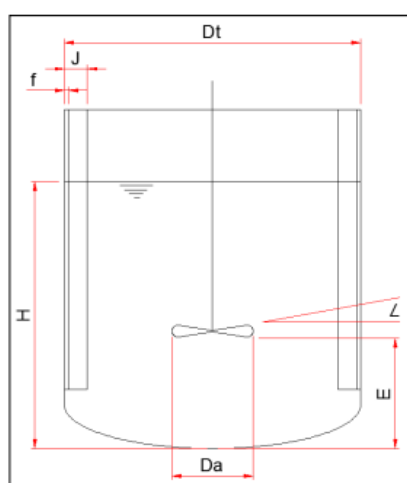


Fig. 6.2 Semejanzas geométricas impulsor tipo hélice.

Tabla 6.2 Semejanzas geométricas impulsor tipo hélice.

$H / Dt=1$	$Da / Dt=0.33$	$E / Dt=0.33$
$\leq 25^\circ$	$J / Dt=0.1$	$f / J=0.02$

Ilustración 2527 – Semejanzas geométricas de un impulsor mecánico de tipo hélice⁶⁴.

⁶⁴ Ilustración obtenida de Diseño y cálculo de un agitador de fluidos, Sección 6.3.1 Sistema de Agitación tipo Hélice [PDF], Uribe V.C. 2013 (http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/412/1/Castillo_Urbe_Vladimir.pdf).

$$\frac{Da}{Dt} = \frac{1}{3}$$

$$Da = \frac{Dt}{3} = \frac{5,4}{3} m = 1,8 m$$

Para poder despejar el número de revoluciones por segundo del agitador, se debe utilizar la siguiente ecuación para despejar la potencia del agitador de hélice que se pretende utilizar:

$$Pot = \mu Vol G^2$$

Siendo:

Pot = La potencia del agitador (en W).

μ = La viscosidad dinámica del fluido (en kg /m s).

Vol = El volumen del tanque (en m³).

G = El gradiente del agitador (en 1/s). $10 (1/s) < G < 70 (1/s)$, se toma $G = 70 (1/s)$.

$$Pot = 0,000933 \frac{kg}{m s} 68,7 m^3 \left(70 \frac{1}{s}\right)^2$$

$$Pot = 314,08 \frac{kg m^2}{s^3} = 314,08 W$$

Reemplazando el valor obtenido en la ecuación anterior, se obtiene:

$$Pot = k \rho n^3 D^5$$

$$314,08 \frac{kg m^2}{s^3} = 0,32 * 997,62 \frac{kg}{m^3} n^3 (1,8 m)^5$$

$$0,052 \frac{1}{s^3} = n^3$$

$$n = 0,373 \frac{1}{s}$$

2. Potencia del agitador del biodigestor

Primero, se determina el tipo de flujo para poder utilizar la ecuación correspondiente.

Con la ecuación de Reynolds se obtiene entonces:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu}$$

Siendo:

ρ = La densidad del fluido (en kg/m³).

V = La velocidad del fluido (en m/s).

D = El diámetro de la cañería desde donde se la transporta (en m).

μ = La viscosidad dinámica del fluido (en kg /m s).

Si se toman los valores del mayor caudal entrante (tramo C), se obtiene:

$$Re = \frac{997,62 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,777 \frac{m}{s} \cdot 0,0254 m}{0,000933 \frac{kg}{m s}} = 21.103$$

Todo flujo con número de Reynolds mayor a 4.000 se considera turbulento, por lo que se usa la siguiente ecuación para determinar la potencia del agitador:

$$Pot = k \rho n^3 D^5$$

Siendo:

Pot = La potencia del agitador (en W).

ρ = La densidad del fluido agitado (en kg/m³). En este caso, se asume 997,62 kg/m³.

n = El número de revoluciones por segundo del agitador (en 1/s).

k = La constante de agitación, se asume un valor de 0,32 (Metcalf&Eddy, 1995).

D = El diámetro impulsor.

El diámetro impulsor se obtiene de la semejanza geométrica de impulsor tipo hélice (Uribe, 2013):

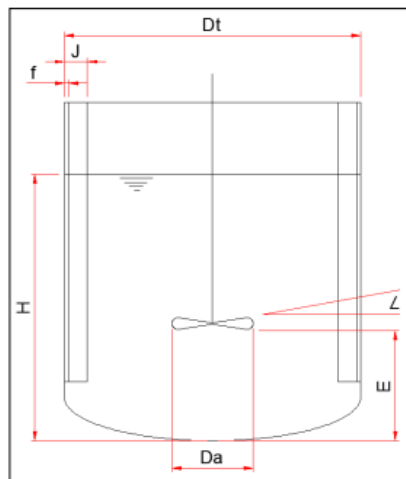


Tabla 6.2 Semejanzas geométricas impulsor tipo hélice.

$H / Dt=1$	$Da / Dt=0.33$	$E / Dt=0.33$
$\leq 25^\circ$	$J / Dt=0.1$	$f/ J=0.02$

Fig. 6.2 Semejanzas geométricas impulsor tipo hélice.

Semejanzas geométricas de un impulsor mecánico de tipo hélice⁶⁵.

$$\frac{Da}{Dt} = \frac{1}{3}$$

$$Da = \frac{Dt}{3} = \frac{12}{3} m = 4 m$$

Para poder despejar el número de revoluciones por segundo del agitador, se debe utilizar la siguiente ecuación para despejar la potencia del agitador de hélice que se pretende utilizar:

$$Pot = \mu Vol G^2$$

Siendo:

Pot = La potencia del agitador (en W).

μ = La viscosidad dinámica del fluido (en kg /m s).

Vol = El volumen del tanque (en m³).

G = El gradiente del agitador (en 1/s). $10 (1/s) < G < 70 (1/s)$, se toma $G = 70 (1/s)$.

$$Pot = 0,000933 \frac{kg}{m s} 585 m^3 \left(70 \frac{1}{s}\right)^2$$

$$Pot = 2.674,45 \frac{kg m^2}{s^3} = 2.674,45 W$$

⁶⁵ Ilustración obtenida de Diseño y cálculo de un agitador de fluidos, Sección 6.3.1 Sistema de Agitación tipo Hélice [PDF], Uribe V.C. 2013 (http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/412/1/Castillo_Urbe_Vladimir.pdf).

Reemplazando el valor obtenido en la ecuación anterior, se obtiene:

$$Pot = k \rho n^3 D^5$$

$$2.674,45 \frac{kg \cdot m^2}{s^3} = 0,32 * 997,62 \frac{kg}{m^3} n^3 (4 \text{ m})^5$$

$$0,082 \frac{1}{s^3} = n^3$$

$$n = 0,202 \frac{1}{s}$$

3. Potencia del agitador del tanque de digestato

Primero, se determina el tipo de flujo para poder utilizar la ecuación correspondiente.

Con la ecuación de Reynolds se obtiene entonces:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu}$$

Siendo:

ρ = La densidad del fluido (en kg/m³).

V = La velocidad del fluido (en m/s).

D = El diámetro de la cañería desde donde se la transporta (en m).

μ = La viscosidad dinámica del fluido (en kg /m s).

Si se toman los valores del mayor caudal entrante (tramo E), se obtiene:

$$Re = \frac{994,04 \frac{kg}{m^3} \cdot 0,777 \frac{m}{s} \cdot 0,0254 \text{ m}}{0,000719 \frac{kg}{m \cdot s}} = 27.285$$

Todo flujo con número de Reynolds mayor a 4.000 se considera turbulento, por lo que se usa la siguiente ecuación para determinar la potencia del agitador:

$$Pot = k \rho n^3 D^5$$

Siendo:

Pot = La potencia del agitador (en W).

ρ = La densidad del fluido agitado (en kg/m³). En este caso, se asume 994,04 kg/m³.

n = El número de revoluciones por segundo del agitador (en 1/s).

k = La constante de agitación, se asume un valor de 0,32 (Metcalf&Eddy, 1995).

D = El diámetro impulsor.

El diámetro impulsor se obtiene de la semejanza geométrica de impulsor tipo hélice (Uribe, 2013):

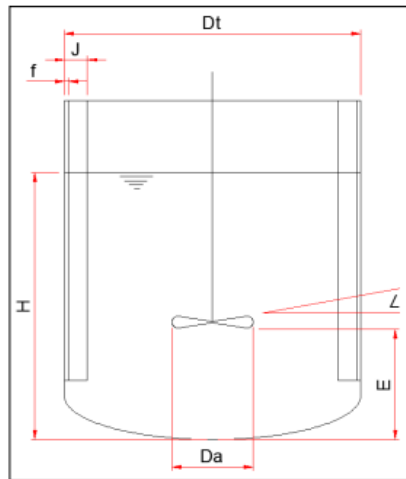


Tabla 6.2 Semejanzas geométricas impulsor tipo hélice.

$H / Dt=1$	$Da / Dt=0.33$	$E / Dt=0.33$
$\leq 25^\circ$	$J / Dt=0.1$	$f / J=0.02$

Fig. 6.2 Semejanzas geométricas impulsor tipo hélice.

Ilustración 2629 – Semejanzas geométricas de un impulsor mecánico de tipo hélice⁶⁶.

$$\frac{Da}{Dt} = \frac{1}{3}$$

$$Da = \frac{Dt}{3} = \frac{6,5}{3} \text{ m} = 2,17 \text{ m}$$

Para poder despejar el número de revoluciones por segundo del agitador, se debe utilizar la siguiente ecuación para despejar la potencia del agitador de hélice que se pretende utilizar:

$$Pot = \mu Vol G^2$$

Siendo:

Pot = La potencia del agitador (en W).

μ = La viscosidad dinámica del fluido (en kg /m s).

Vol = El volumen del tanque (en m³).

G = El gradiente del agitador (en 1/s). $10 \text{ (1/s)} < G < 70 \text{ (1/s)}$, se toma $G = 70 \text{ (1/s)}$.

⁶⁶ Ilustración obtenida de Diseño y cálculo de un agitador de fluidos, Sección 6.3.1 Sistema de Agitación tipo Hélice [PDF], Uribe V.C. 2013 (http://repobib.ubiobio.cl/jspui/bitstream/123456789/412/1/Castillo_Urbe_Vladimir.pdf).

$$Pot = 0,000719 \frac{kg}{m \cdot s} 99,6 m^3 \left(70 \frac{1}{s}\right)^2$$

$$Pot = 350,9 \frac{kg \cdot m^2}{s^3} = 350,9 W$$

Reemplazando el valor obtenido en la ecuación anterior, se obtiene:

$$Pot = k \rho n^3 D^5$$

$$350,9 \frac{kg \cdot m^2}{s^3} = 0,32 * 994,04 \frac{kg}{m^3} n^3 (2,17 m)^5$$

$$0,023 \frac{1}{s^3} = n^3$$

$$n = 0,284 \frac{1}{s}$$