



UNIVERSIDAD
NACIONAL DE
SAN MARTÍN

***Estudio de Prefactibilidad de un sistema de Biodigestión para el
tratamiento de los residuos animales de un criadero intensivo porcino en
la localidad de Buenos Aires***

Proyecto Final Integrador (PFI) de la carrera de Ingeniería Ambiental

Cátedra de PFI

Ing. Ruth Rodriguez

Ing. Federico Bailat

Dirección de carrera

Dra. Ing. Susana Larrondo

Coordinación de carrera

Mg. Ing. Diana Mielnicki

Agradecimientos

A mi mamá, papá, hermanos, novia y amigos que me apoyaron durante toda la carrera.

A Grupo IFESS por su colaboración

Contenido

Resumen Ejecutivo	9
1. Introducción	10
1.1 Presentación de la Empresa.....	11
1.2 Objetivos	13
2. Diagnóstico	14
2.1 Los residuos en explotaciones porcinas intensivas.....	14
2.2 Impacto Ambiental de los purines	15
2.2.1 Contaminación en suelos.....	16
2.2.2 Contaminación del agua.....	16
2.2.3 Contaminación del aire.....	17
2.3 Situación Actual de la granja “Híbridos Argentinos S.A”:	19
2.3.1 Residuos porcinos en la granja “Híbridos Argentinos S.A”	19
3. Estudios Preliminares	21
3.3.1 Normativa Ambiental de los efluentes porcinos	21
3.3.2 Normativa regulatoria del proceso de biodigestión	23
3.3.4 Normativa regulatoria del uso y disposición del digerido	24
3.3.5 Normativa regulatoria de la producción de fertilizantes orgánicos	26
3.3.6 Conclusiones del Marco Normativo	26
4. Análisis de alternativas y memoria descriptiva	28
4.1 Caracterización y cuantificación de los residuos porcinos	28
4.1.1 Composición de los residuos porcinos	28
4.1.2 Cuantificación de los Purines de Cerdo.....	29
4.2 Análisis de alternativas	30
4.2.1 Sistema de lagunas de tratamiento	30

4.2.2 Sistema de Biodigestión anaeróbica con cogeneración de energía.....	33
4.2.3 Selección de la Alternativa	36
4.3 Fundamentos de la Biodigestión anaerobia	36
4.2.1 Etapas de la digestión anaeróbica	37
4.2.2 Cinética de las reacciones biológicas.....	40
4.2.3 Factores determinantes en el proceso metanogénico	44
4.2.4 Parámetros operacionales o de funcionamiento.....	48
4.3 Sustratos para la digestión anaerobia.....	53
4.3 Co-digestión anaerobia.....	55
4.4 Productos de la digestión anaeróbica y sus usos	57
4.4.1 Biogás.....	57
4.4.2 Cogeneración de Energía a partir del biogás	59
4.4.2 Digestato.....	60
4.5 Sistemas de Digestión Anaeróbica	62
4.5.1 Régimen de operación del digestor.....	62
4.5.2 Temperatura de operación.	63
4.5.3. Según el número de etapas	63
4.5.4 Porcentaje de sólidos totales.....	64
4.6 Memoria Descriptiva	64
4.6.2 Selección y caracterización del Co-sustrato	64
4.6.3 Caracterización del sustrato mezcla.....	66
4.6.4 Selección del sistema de Digestión Anaeróbica.	67
4.6.5 Descripción de la planta de Biogás	69
4.6.6 Unidades y componentes de la planta de biogás	72
4.6.7 Equipos de Conducción	93
4.6.8 Distribución de los equipos en planta	100

5. Memoria de Cálculo	103
5.1 Cuantificación de los Purines de Cerdo	103
5.2 Determinación de la proporción de los sustratos	104
5.3 Digestión Anaeróbica.....	106
5.3.1 Metodología Aplicada.....	106
5.3.2 Producción de Biogás y parámetros de operación	109
5.3.3 Resultados: parámetros de operación y producción de biogás.....	111
5.3.4 Producción y composición del digestato.....	114
5.3.5 Resultados: Producción y composición del digestato	115
5.4 Tanque de alimentación – Homogenización de Sustratos	116
5.4.1 Dimensionado del tanque de alimentación	116
5.4.2 Selección del agitador	117
5.4.3 Selección del agitador comercial.....	117
5.5 Digestor Anaerobio de Mezcla Completa.....	118
5.5.1 Dimensionamiento del Digestor Anaeróbico	119
5.5.2 Selección del Aislamiento Térmico.....	120
5.5.3 Selección de la descarga del digestor	121
5.5.4 Selección del equipo de agitación	121
5.6 Intercambiador de Calor	122
5.6.1 Dimensionado del intercambiador de calor.....	122
5.6.2 Selección de un intercambiador comercial	139
5.7 Almacenamiento de Biogás o Gasómetro.....	139
5.7.1 Dimensionado del gasómetro.....	141
5.7.2 Selección del Gasómetro	142
5.8 Columna de adsorción de H ₂ S	142
5.8.1 Consumo de óxido férrico	143

5.8.2 Dimensionamiento de la columna de adsorción	144
5.9 Trampa de humedad	145
5.9.1 Selección de la trampa de humedad	146
5.10 Unidad de cogeneración	146
5.10.1 Cálculos del generador	147
5.10.2 Selección del grupo de cogeneración.....	149
5.11 Tanque de estabilización del digestato	150
5.11.1 Dimensionamiento del tanque de estabilización	150
5.11.2 Selección del equipo de agitación	151
5.12 Diseño Hidráulico de la planta	152
5.12.1 Línea 1: Alimentación al digestor	152
5.12.2 Línea 2: Descarga del digestato	154
5.12.3 Línea 3: Agua refrigeración	155
5.12.4 Línea 4: Biogás	159
5.13 Pérdidas de carga	160
5.13.1 Pérdidas de carga en la línea 1	163
5.13.2 Pérdidas en la Línea 2: Descarga del digestato	166
5.13.3 Pérdidas en la Línea 3: Agua de refrigeración.....	167
5.13.4 Pérdidas en la Línea 4: Línea de biogás	169
5.14 Cálculo y selección de equipos de conducción	175
5.14.1 Diseño de las bombas hidráulicas	176
5.14.2 Selección de las bombas comerciales.....	180
5.14.3 Diseño y cálculo del soplador	182
5.14.4 Selección del soplador comercial	183
5.14.5 Selección de antorcha.....	185
6. Cómputo y Presupuesto.....	186

6.1 Inversión inicial	186
6.2 Costos de operación.....	189
6.3 Costos de reparación y mantenimiento.....	191
6.4 Costos de amortización	191
6.5 Ingresos.....	192
6.5.1 Ingreso por energía y potencia eléctrica.....	193
6.6 Análisis de la rentabilidad	194
6.6.1 Flujo de Caja.....	194
7. Evaluación de Impacto Ambiental	196
7.1 Resumen Ejecutivo.....	196
7.2 Introducción.....	198
7.3 Descripción del proyecto	198
7.3.1. Nombre del proyecto.....	199
7.3.2. Acceso al sitio del proyecto.....	199
7.3.3 Proyecto.....	200
7.4 Caracterización Ambiental del área de influencia	202
7.4.1 Área de Influencia del proyecto	202
7.4.2 Línea de base física	203
7.4.3 Línea de base del medio biológico	211
7.4.4 Línea de base socioeconómica	214
7.5 Identificación y evaluación de impactos ambientales	219
7.5.1 Metodología Empleada	219
7.5.2 Matriz de evaluación de impactos ambientales	220
7.5.3 Descripción de impactos ambientales	224
7.6 Análisis de riesgos.....	226
7.6.1 Identificación de peligros.....	226

7.6.2 Matriz de Riesgos	229
7.6.3 Resultados - Matriz de Riesgos.....	231
7.7 Plan de Gestión Ambiental y Social	231
7.7.1 Plan de Mitigación Ambiental	232
7.7.2 Plan de Contingencias Ambientales	233
7.7.3 Plan de Monitoreo Ambiental	235
7.8 Marco Legal.....	236
7.8.1 Normativa Ambiental Nacional	236
7.8.2 Normativa Ambiental Provincial de Buenos Aires.....	238
7.9 Conclusiones.....	238
8. Conclusiones	239
9. Planos	240
10. Bibliografía y Anexos.....	242

Resumen Ejecutivo

En las producciones porcinas intensivas se generan diversos residuos y su tratamiento reviste cada día mayor importancia debido a la dimensión del problema que representa. Los residuos generados, fundamentalmente excretas, resultan responsables de impactos sobre el aire, el suelo y el agua porque se concentran en áreas reducidas y son una fuente de nutrientes, metales pesados, antibióticos y otras drogas veterinarias y patógenos.

No obstante, el manejo adecuado de residuos rurales puede contribuir significativamente a la producción y conversión de residuos animales y vegetales en distintas formas de energía. Durante la digestión anaeróbica de la biomasa, mediante una serie de reacciones bioquímicas, se genera el biogás, el cual, puede ser capturado y usado como combustible y/o electricidad.

En este proyecto se analiza la factibilidad técnica, económica y ambiental en la implementación de un sistema de biodigestión de los residuos generados por un criadero porcino intensivo de ciclo completo ubicada en el partido de Zárate, Buenos Aires. La misma no cuenta con sistema de tratamiento alguno, incumpliendo con la normativa vigente.

A partir de un relevamiento de la producción de la granja, se realizó una cuantificación y caracterización de los residuos a utilizar, se analizó y se seleccionó el co-sustrato a utilizar, se realizó el diseño, dimensionamiento y selección del sistema de tratamiento que permita obtener un efluente que cumpla con la normativa vigente, y que permita la obtención de biogás como subproducto con la finalidad de obtener energía eléctrica y térmica mediante su cogeneración, generando ingresos por la comercialización de la misma.

Se presentan los planos de obra, el cómputo y presupuesto integral, la evaluación de impacto ambiental, el plan de gestión ambiental del proyecto y un análisis económico del mismo.

El proyecto resulta viable desde el punto de vista técnico, económico y socioambiental. Permite el tratamiento de los residuos cumpliendo la normativa vigente, permite la generación y comercialización de la energía eléctrica generada, y la obtención de biodigestato como subproducto, el cual potencialmente podría ser comercializado como fertilizante de ser registrado ante la autoridad correspondiente.

1. Introducción

En las producciones porcinas se generan diversos residuos y su tratamiento reviste cada día mayor importancia debido a la dimensión del problema que representa. En la actualidad existe una mayor conciencia frente a la protección del medio ambiente por parte de la sociedad, esto lleva a que el manejo de estos residuos esté tomando relevancia en todo el mundo.

Los residuos generados, fundamentalmente excretas, resultan responsables de impactos sobre el aire, el suelo y el agua porque se concentran en áreas reducidas y son una fuente de nutrientes, metales pesados, antibióticos y otras drogas veterinarias y patógenos. Sumado a la degradación de los recursos agua y suelo, estos desechos cobran importancia por la proliferación de plagas sinantrópicas (moscas, roedores, entre otras) y la generación de olores indeseables producidos cuando no poseen una correcta disposición.

Es así como además de constituir un foco potencial de infección, los sitios donde son descargados los residuos sólidos porcinos representan una fuente importante de contaminación atmosférica. Actualmente se observa un aumento de los volúmenes generados dado por una mayor intensificación de los sistemas productivos, generando problemas de polución ambiental, de almacenamiento, distribución y manejo, aumentando los costos operacionales.

Hasta la década del 90 en la Argentina las explotaciones eran casi en su totalidad a campo, con lo cual los desechos porcinos eran absorbidos o utilizados como abono orgánico sin representar un problema para las explotaciones. Pero la producción porcina nacional ha vivido en los últimos años un proceso de transformación comenzando a tener un vuelco cualitativo donde se observan modificaciones en la forma de producir carne. Esto significa que las producciones de pequeña escala comienzan a incorporar mayor tecnología y a aumentar el número de madres productivas, alentando esto el paso de sistemas al aire libre a sistemas mixtos o confinados. Si bien los sistemas de producción de pequeña y mediana escala productiva (10 a 200 madres) son los que prevalecen en el país, se ha producido un importante aumento en el número de productores que a partir de estratos de 100 madres han confinado parte o totalmente sus animales.

En la actualidad se estima que los sistemas confinados representan el 40 % del total de madres del país y el 60 % de la producción de cerdos faenados anualmente. Estos valores marcan claramente la importancia del impacto que en el ambiente puede provocar la producción intensiva de carne de cerdo por la acumulación de desechos sólidos sin tratar y por la contaminación de diferentes cuerpos de agua donde son descargadas sus aguas residuales. La contaminación implica no solo un deterioro del ambiente sino también una fuga de energía y nutrientes, lo cual significa un

desaprovechamiento de los recursos. En este sentido, la contaminación aparece como resultado de un proceso ineficiente o incompleto que no utiliza de manera apropiada los recursos que posee o que genera.

No obstante, el manejo adecuado de residuos rurales puede contribuir significativamente a la producción y conversión de residuos animales y vegetales en distintas formas de energía. Durante la digestión anaeróbica de la biomasa, mediante una serie de reacciones bioquímicas, se genera el biogás, el cual, puede ser capturado y usado como combustible y/o electricidad. De esta forma, la digestión anaeróbica, como método de tratamiento de residuos, permite disminuir la cantidad de materia orgánica contaminante, estabilizándola, formando bioabono y al mismo tiempo producir energía eléctrica.

La obtención de energía a partir de desechos residuales en la actividad agroindustrial ha tomado lugar como una tecnología prometedora para el mediano y macro productor, puesto que apunta directamente a un proyecto de negocio energéticamente autosustentable. La biomasa es una de las fuentes de energía renovable más confiables, es constante y se puede almacenar, lo que facilita la generación térmica y eléctrica.

1.1 Presentación de la Empresa

La empresa “Campo Austral”, es hoy una de las firmas elaboradoras más importantes de alimentos a base de cerdo en la Argentina. Produce una gran variedad de productos alimenticios con materias primas seleccionadas procedentes de animales de sus propias granjas, que son alimentados bajo estrictas normas sanitarias. Sus instalaciones comprenden 7 granjas de genética porcina (2 en Buenos Aires, 3 en Córdoba, 1 en La Rioja y 1 en La Pampa), 1 frigorífico llamado EXPORK S.A, en San Andrés de Giles (Buenos Aires) y una planta elaboradora de jamones, fiambres y productos congelados en Pilar (Buenos Aires).

La Industria Frigorífica EXPORK S.A. es una las más grandes de la Argentina, la cual faena y desposta 32.000 cerdos por mes, equivalente a 3.000 toneladas de carne fresca para consumo interno y exportación.



Figura 1.1: Ubicación del frigorífico EXPORK S.A, Campo Austral. Fuente: Google Earth Pro

Uno de los principales criaderos de cerdo de la empresa es la granja “Híbridos Argentinos S.A”, ubicada en el partido de Zárate (Ruta 193 - Km 11.5.). La misma constituye un criadero porcino de ciclo completo de tipo intensivo, la cual cuenta con una superficie de 48 hectáreas y abastece a la planta frigorífica Expork, en San Andrés de Giles, con un promedio de 500 cerdos de 112kg por semana.



Figura 0.2: Ubicación de la granja “Híbridos Argentinos S.A”, Partido de Zárate.

Actualmente, la gestión de los residuos porcinos en la granja no posee tratamiento alguno y son colectados en una fosa profunda presente en el predio dónde son almacenados en forma temporal para su disposición como fertilizantes en el predio y campos vecinos mediante camiones cisterna de riego.

1.2 Objetivos

Los objetivos de este proyecto se pueden dividir en un objetivo general y en objetivos específicos.

Objetivo General:

- Seleccionar y dimensionar los elementos principales de un sistema de biodigestión que sea capaz de utilizar los residuos porcinos de la granja "Híbridos Argentinos S.A" para la generación de energía eléctrica.

Objetivos Específicos:

- Efectuar el cálculo y diseño de los componentes principales de la instalación y de los productos y subproductos obtenidos.
- Evaluar la factibilidad económica del proyecto.

2. Diagnóstico

2.1 Los residuos en explotaciones porcinas intensivas.

El residuo es el material que se produce a consecuencia no deseada de cualquier actividad humana y del cual el productor o poseedor se ha desprendido o tiene la intención u obligación de hacerlo. Los residuos de las explotaciones ganaderas son muy heterogéneos, están formados por:

- Residuos líquidos: deyecciones líquidas, agua de bebida y agua de lavado de las instalaciones.
- Residuos Sólidos: deyecciones sólidas, los residuos de camas calientes (material que ha terminado su fase útil de cama vegetal) y restos de alimentos (generados por los comederos o desechados por su mal estado), fitosanitarios, antibióticos, etc.

En cerdos, la orina representa aproximadamente el 45 % y las heces el 55 % del contenido volumétrico total de excretas, la humedad es cercana al 90% y el contenido de materia seca es próximo al 10%. La densidad de la excreta fresca es ligeramente mayor a 1, siendo así un fluido de peso comparable al agua. La excreta porcina contiene sólidos que flotan y sólidos que sedimentan, además de sólidos en suspensión. Los residuos, dependiendo del sistema de producción que se lleve a cabo, se pueden presentar como estiércoles o purines:

Estiércol: Material compuesto por las deyecciones de los animales sólidas y líquidas y las camas del ganado. Se define como una mezcla de cama y de deyecciones animales que han sufrido fermentaciones más o menos avanzadas en la cochiguera o en el estercolero.

Purines o Efluentes: Son una mezcla compuesta por deyecciones sólidas y líquidas de los animales junto con restos de ellos, remanentes de agua de los bebederos, agua de lavado de la explotación y agua de lluvia. También estará compuesto por el material de cama en caso de ser utilizado.

Disponen de una gran cantidad de agua en su composición.

En los sistemas de producción confinados, los animales son mantenidos en corrales sobre pisos enrejillados, los cuales son lavados diariamente, y los residuos generados corresponden a una suspensión acuosa denominada efluente o purín, que contiene las excretas animales líquidas y sólidas, el agua de lavado de pisos y consumo animal.

Estos sistemas requieren la existencia de grandes áreas destinadas al almacenamiento y tratamiento de estos residuos con costosos sistemas de elevación y separación de los mismos, lo que conlleva grandes inversiones por parte de los productores, que en la mayoría de las veces no logran reducir el potencial contaminante de estos residuos.

En los sistemas de producción intensivos, la descarga de residuos es puntual y como tal, demanda necesariamente de un manejo que involucra un posterior proceso para la estabilización de los purines generados.

2.2 Impacto Ambiental de los purines

El purín, también llamado efluente, es un material no estéril, generalmente básico y bastante salino. Posee cantidades importantes de hidratos de carbono, lípidos, aminoácidos, proteínas, urea y compuestos azufrados, así como contenidos elevados de nitrógeno (N), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg) y sodio (Na). También contiene micronutrientes como hierro (Fe), cinc (Zn), cobre (Cu) y manganeso (Mn).

Por otra parte, los residuos ganaderos son portadores de poblaciones microbianas que inciden negativamente en la salud humana y animal, constituyendo un riesgo que debe ser conocido. Se trata de bacterias, virus y hongos. El potencial contaminante de los residuos ganaderos, se caracterizan principalmente por los siguientes parámetros:

- Alto contenido en materia orgánica
- Alto contenido en macronutrientes (N, P, K) y otros micronutrientes
- Generación de compuestos fácilmente volatilizables (amonio) y gases como amoniaco, metano, y óxido nitroso
- Presencia de metales pesados (particularmente cobre) y pesticidas.

Cuando el medio recibe el aporte de cualquier cuerpo extraño se produce un cambio en su equilibrio, que vuelve a restablecerse en un tiempo mayor o menor siempre y cuando el aporte no haya sido lo suficientemente intenso como para que el desequilibrio provocado sea irreversible o bien se origina un nuevo equilibrio que puede ser positivo. Estas alteraciones son originadas por los distintos componentes de los residuos. El problema de la contaminación aparece en el momento en que no se dispone de suficiente terreno para reutilizar los purines de las diferentes producciones pecuarias.

Las emisiones de residuos, por lo general, van directamente al suelo, aguas superficiales y profundas; al aire llegan en forma de gases, olores y polvo. No obstante, los problemas medioambientales que puedan derivarse del tratamiento y la utilización de efluentes de una explotación porcina, están más ligados al volumen generado y a su gestión posterior, que a características intrínsecas de los mismos.

2.2.1 Contaminación en suelos.

Los procesos de contaminación del suelo vinculados con la producción intensiva vienen de la aplicación excesiva de excretas como fertilizante orgánico en los cultivos. La contaminación resulta uno de los aspectos más problemáticos de la degradación de un suelo ya que altera su capacidad para realizar algunas de sus funciones vitales como la nutrición de las plantas.

Los aportes de materia orgánica conducen a crear un equilibrio en el contenido del suelo en materia orgánica (humus). Cuando se aportan residuos orgánicos es alterado el equilibrio existente dando lugar a uno nuevo y es precisamente este cambio el que puede alterar la calidad del suelo receptor. Indudablemente en suelos pobres en humus estable el incremento será positivo, pero en suelos con un humus elevado dará lugar a problemas tanto en cuanto a fertilidad como de contaminación.

Los principales contaminantes son el nitrógeno (N) y el fósforo (P) y los metales pesados. La acumulación de cualquiera de ellos puede afectar la calidad del suelo.

Además, el vuelco excesivo de purines (vuelcos puntuales y repetidos en una misma área), puede llevar a la formación de costras superficiales, reduciéndose la permeabilidad del suelo al agua y al aire, favoreciéndose su erosión; como así también se puede originar una acumulación excesiva de sales, con efectos negativos en la estructura y de metales pesados, que pueden ser tóxicos para los microorganismos del suelo. A continuación, describiremos la importancia de distintos elementos en la contaminación del suelo por aporte de efluentes.

2.2.2 Contaminación del agua.

El concepto de contaminación del agua involucra a aquellos procesos que deterioran de forma apreciable la calidad física, química y microbiológica. Algunos de los contaminantes que alteran la calidad del agua son el N y el P, metales pesados, y se agregan microorganismos patógenos, hormonas y drogas de uso veterinario. Tanto las drogas como las hormonas son las más difíciles de eliminar en los procesos convencionales de tratamiento de efluentes. Los contaminantes presentes en las excretas pueden ingresar a los cuerpos de agua por diferentes vías:

2.2.2.1 Aguas superficiales

Llegan a aguas superficiales (lagos, lagunas y humedales o ríos) por escurrimiento desde terrenos fertilizados con estiércol, por desborde de lagunas de efluentes por lluvias torrenciales, y por deposición atmosférica.

En aguas superficiales, el principal efecto es la eutrofización, caso particular de polución, que se produce ante un aumento de disponibilidad de nutrientes, especialmente aquellos que constituyen

factores limitantes para el desarrollo de organismos fotosintéticos como algas y macrófitas. Una masa de agua pasa de un estado oligotrófico (de baja productividad) a otro eutrófico (de elevada productividad), favorecido principalmente por dichos nutrientes (fósforo y nitrógeno), y por acción de la temperatura del medio. El N y el P se encuentran en proporciones considerables en los residuos ganaderos, son precisamente ambos los que provocan los daños aludidos, puesto que la materia orgánica, salvo vertido directo, no produce problemas de contaminación.

2.2.2.2 Aguas subterráneas

Los contaminantes llegan desde el suelo a las aguas subterráneas por infiltración y lixiviación. En los acuíferos no confinados (acuífero freático), los contaminantes provenientes de lagunas de efluentes mal construidos llegan de forma rápida al agua subterránea. En las aguas subterráneas, la afección no se produce tanto por la alta carga contaminante de naturaleza orgánica (ya que gran parte se elimina por el efecto de filtrado y efecto auto-depurador del suelo que lo asimila) como por la alta concentración de elementos solubles, que pueden llegar a elevar su concentración hasta límites inaceptables para los diferentes usos posteriores que se quiera dar a las aguas. La capacidad filtrante del suelo depende de varios parámetros: porosidad, capacidad de absorción, formación de compuestos solubles o insolubles, etc.

2.2.3 Contaminación del aire.

Los efectos que los residuos ganaderos generan sobre la atmósfera están ligados a los componentes volátiles que emanan en los procesos de transformación de los componentes orgánicos de que están formados. Como es lógico la incidencia más intensa se producirá en la calidad atmosférica de los recintos donde se producen, acumulan o se aportan tales residuos. El deterioro de la calidad del aire producido en granjas porcinas afecta a los trabajadores de la granja, a las poblaciones vecinas y a los propios cerdos. El origen de estos gases reside en la acción de determinados microorganismos anaerobios sobre: las proteínas, los hidratos de carbono y las grasas, dando lugar a compuestos volátiles y a gases con un grado determinado de nocividad: Irritante (NH_3 y H_2S) y asfixiantes (CH_4 y CO_2).

La acumulación de las excretas, de alimento y de animales en espacios reducidos también libera otra serie de gases y vapores que despiden olores, en su mayoría desagradables. Se han identificado alrededor de 200 compuestos, muchos de ellos sulfurosos y nitrogenados provenientes del metabolismo de las proteínas, 32 compuestos fenólicos, ácidos orgánicos volátiles, alcoholes, cetonas y aldehídos. Las partículas que contaminan el aire pueden clasificarse según su tamaño en PM ("particulate matter") 10 micrones y PM 2,5 micrones.

- Las PM 10 micrones están formadas principalmente por polvillo. Si ellas procedieran de estiércol seco, podrían irritar las vías respiratorias y transportar hongos, bacterias y virus.
- Las PM 2,5 micrones son sales que pueden provenir de la reacción del amoníaco con otros gases. Son irritantes de mucosas, y según su tamaño pueden permanecer suspendidas en la atmósfera, desde uno o dos días (las PM 10 micrones), y hasta varios días o semanas cuando las partículas son más pequeñas.

Los gases mayormente producidos son:

- Dióxido de carbono (CO₂): proviene principalmente de la respiración de los animales.
- Monóxido de carbono (CO): puede originarse de fallos en la combustión cuando se tienen sistemas de calefacción.
- Metano (CH₄): proviene de la fermentación entérica y fecal, y surge de la degradación de los carbohidratos del alimento y la descomposición anaeróbica de las heces y la orina. Los porcinos emiten 1 kg/cabeza/año.
- Sulfuro de hidrógeno (H₂S): surge de la acción de determinadas bacterias sobre las deposiciones de los animales.
- Amoníaco (NH₃): proviene del nitrógeno excretado en la orina y en las heces. Del contenido total de N de los efluentes de cerdo, el 50% se encuentra en forma de NH₄⁺.

El pH neutro de las excretas puede incrementar la disociación de NH₄⁺, con la pérdida de un ión H, produciéndose emisiones amoniacaes a la atmosfera, por volatilización, si el purín no es tratado. La volatilización del (NH₃) se ve influenciada por diversos factores como son la concentración de urea en orina, el tamaño de la superficie de emisión (áreas donde se concentra el estiércol), la temperatura ambiental, la aireación del lugar, entre otras.

La proporción de N en la dieta afecta la producción de amoníaco, a su vez una proporción elevada de almidón aumenta la posibilidad de que no se digiera y que aparezca en materia fecal, fermente en el ambiente y produzca olores intensos. En los sistemas cerrados (porcinos), la concentración de amoníaco en el aire es importante debido a la concentración de excrementos. A partir de 20 ppm ya produce irritación en los ojos, garganta y mucosas.

Efectos sobre los animales se reflejan en la disminución de la productividad, pues se afecta el crecimiento lo mismo que el sistema inmunológico, disminuyendo la resistencia a las enfermedades. En el aire, el amoníaco también puede reaccionar con otros gases (sulfídrico, nítrico), los que al depositarse por precipitaciones contribuyen a la acidificación de los suelos.

2.3 Situación Actual de la granja “Híbridos Argentinos S.A”:

La granja “Híbridos Argentinos S.A” ubicado en el partido de Zárate, Buenos Aires, es un criadero porcino de ciclo completo, donde se realiza todo el ciclo de producción, nacimiento de lechones, su crecimiento y terminación, hasta el peso de venta como cerdos terminados, generalmente entre 100-110 kg de peso vivo. En la actualidad, la empresa cuenta con 32 empleados, 32 corrales y 48 hectáreas de hacienda propia para desarrollar sus actividades.

La granja “híbridos argentinos S.A” compra los principales alimentos nutricionales (maíz y soja) y los suplementos dietarios a los mismos socios de la empresa Campo Austral, permitiéndoles obtener un precio competitivo en relación con el precio de mercado.

2.3.1 Residuos porcinos en la granja “Híbridos Argentinos S.A”

En los galpones de la instalación, los animales se encuentran apoyados sobre pisos enrejillados (full slats) de plástico reforzado. Debajo de ellos hay fosas donde caen los desechos (orina, estiércol, restos de alimento y agua de los bebederos). Las fosas poseen unos 10 a 15 cm de agua limpia al comienzo del ciclo y se van mezclando con los desechos que caen, a medida que éstos se van generando.



Figura 2.1: Sistema de pisos enrejillados en los galpones de “Híbridos Argentinos S.A”. Fuente: Elaboración Propia.

El efluente es conducido por gravedad hacia una cámara de almacenamiento, dónde los efluentes son extraídos, transportados y aplicados en suelos a través de camiones cisterna que efectúan el riego en los campos. Sin embargo, no existen controles ni estudios sobre la calidad y cantidad del efluente producido ni aplicado al suelo.



Imagen 2.1: Estiercolera abonador de purines Fliegl VFW 22000 utilizado en la granja Híbridos Argentinos S.A.

Fuente: Fliegl

3. Estudios Preliminares

En esta sección, se disponen todos los estudios preliminares referidos a la granja “Híbridos Argentinos S.A”, la cual, cómo se mencionó con anterioridad, forma parte del partido de Zárate, provincia de Buenos Aires, localizándose en la Ruta 193 - Km 11.5.

No se presentan en esta sección, la caracterización del clima de la región (precipitaciones, temperaturas, humedad, presión atmosférica y vientos) ni la geología, geomorfología y edafología de la misma, dado que los mismos se encuentran en la Evaluación de Impacto Ambiental en la sección 7 del presente documento. Sin embargo, resulta redundante mencionar que varios parámetros climáticos son tenidos en cuenta en la memoria de cálculo de la sección 5.

3.3.1 Normativa Ambiental de los efluentes porcinos

Analizando el marco regulatorio de las actividades de producción intensiva de animales, se observa que no se establecen obligaciones respecto al tipo de tratamiento o tecnología a implementar para el procesamiento de los residuos y efluentes porcinos. Sin embargo, todas las provincias tienen regulaciones sobre el vertido de efluentes líquidos a cursos de agua superficiales, sistemas cloacales o al suelo. En el caso de la provincia de Buenos Aires, la resolución de AGOSBA N° 336/2003, relativa a las normas para el vertido de efluentes líquidos, establece los parámetros y los valores permisibles para los diferentes destinos del efluente dispuesto. En este caso, la autoridad de aplicación del mismo la constituye la autoridad del agua. En la siguiente tabla se pueden observar los parámetros de calidad de las descargas admisibles en la provincia de Buenos Aires para los diferentes cuerpos receptores.

Límite permisible de descarga				
Grupo	Parámetro	Código Técnica analítica	Unidad	Absorción por el suelo (h)
1	Temperatura	2550 B	°C	<45
	pH	4500 H+B	upH	6,5-10
	Sólidos Sedimentables 10 Min (2)	Cono Imhoff	ml/l	ausente
	Sólidos Sediment. 2 horas (2)	Cono Imhoff	ml/l	<5
	Sulfuros	4500 S)D	mg/l	<6
	S.S.E.E. (1)	5520 B*1(mg/l	<7
	Cianuros	4500 CN C y E	mg/l	Ausente
	Hidrocarburos Totales	EPA 418.1 o ASTM3921-85	mg/l	Ausente
	Cloro Libre	4500 CL G *DPD(mg/l	Ausente
Coliformes Fecales (f)	9223 A	NMP/100ml	<2000	
2	DBO	5210 B	mg/l	<200
	DQO	5220 D	mg/l	<500
	S.A.A.M	5540 C	mg/l	<2
	Sustancias Fenólicas	5530 C	mg/l	<0,1
	Sulfatos	4500 SO4 E	mg/l	<1000
	Carbono orgánico total	5310 B	mg/l	NE
	Hierro (soluble)	3500 Fe D	mg/l	<0,1
Manganeso	3500 Mn D	mg/l	<0,1	
3	Cinc	3111 B y C	mg/l	<1
	Níquel	3112 B y C	mg/l	<1
	Cromo Total	3113 B y C	mg/l	Ausente
	Cromo Hexavalente	3114 B y C	mg/l	Ausente
	Cadmio	3115 B y C	mg/l	Ausente
	Mercurio	3500 Hg Bb	mg/l	Ausente
	Cobre	3500 Cu D	mg/l	Ausente
	Aluminio	3500 Al D o 3111 B y C	mg/l	<1
	Arsénico	3500 As C	mg/l	<0,1
	Bario	3111 B y C	mg/l	<1
	Boro	4500 B B	mg/l	<2
	Cobalto	3111 B y C	mg/l	<3
	Selenio	3114 C	mg/l	Ausente
	Plomo	3111 B y C	mg/l	Ausente
	Plaguicidas organoclorados (g)	6630 B	mg/l	Ausente
Plaguicidas organofosforados (g)	6630 B	mg/l	ausente	
4	Nitrógeno total (d)	4500 N org B (NTK)	mg/l	<105
	Nitrógeno Amoniacal (d)	4500 NH3+F	mg/l	<75
	Nitrógeno Orgánico (d)	4500 N org B	mg/l	<30
	Fósforo total	4500 PC	mg/l	<10

Tabla 3.6: Parámetros de calidad de las descargas límites admisible-Grupo 1, Provincia de Buenos Aires, AGOSBA 336/03. Fuente: AGOSBA 336/03

3.3.2 Normativa regulatoria del proceso de biodigestión

Los proyectos de generación de energía eléctrica por digestión anaeróbica se encuentran legislados por una serie de leyes, decretos y resoluciones que se aplican a diferentes aspectos del mismo. Para poder realizar una explicación clara, se analizó la normativa reguladora de los siguientes aspectos del proyecto de biodigestión de purines porcinos:

- Normativa reguladora de la producción, uso y transporte del biogás como producto principal de la biodigestión anaeróbica.
- Normativa reguladora de la comercialización de la energía eléctrica generada por cogeneración del biogás.
- Normativa reguladora del uso y disposición del biodigerido de la biodigestión anaeróbica.
- Normativa reguladora de la comercialización del biodigerido de la biodigestión anaeróbica como fertilizante orgánico.

A continuación, se procede a mencionar la legislación principal considerada en el mismo y se abordará detalladamente las afectaciones y consideraciones que implican sobre los diferentes aspectos del proyecto.

3.3.2.1 Normativa reguladora de la producción y uso del biogás

La tecnología propuesta implica la generación, transporte y utilización de energía. En Argentina la regulación de los combustibles es en general federal, sin perjuicio de que ciertos aspectos están sujetos a normas provinciales y municipales. La autoridad de aplicación es la Secretaría de Energía, del Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios.

La Ley de Biocombustibles establece que “la producción, mezcla y comercialización de Biocombustibles estará sujeta a autorización previa de la Autoridad de Aplicación, con independencia del tipo de producto objeto de consideración” (Ley n°26.093/2006 - Art. 8). Además, instituye que “el biocombustible gaseoso denominado biogás se utilizará en sistemas, líneas de transporte y distribución de acuerdo a lo que establezca la Autoridad de Aplicación” (Ley n°26.093/2006 - Art. 11).

Sin embargo, hasta la fecha, la Secretaría de Energía no ha reglamentado la actividad como si lo ha hecho con otros biocombustibles (como el biodiesel, por ejemplo). En este sentido, la normativa no establece restricciones en lo que hace a la implementación de la tecnología y uso/comercialización del biogás. En cualquier caso, hasta el momento solo requeriría la inscripción del establecimiento ante la Secretaría de Energía como productor, trámite que para los antecedentes de otros biocombustibles no presenta demasiadas complicaciones.

3.3.3.2 Normativa regulatoria de la generación de energía eléctrica mediante la biodigestión.

Las actividades de generación, transporte, distribución y comercialización de energía eléctrica en general son objeto de regulación federal en la medida que las mismas se vinculan con el Mercado Eléctrico Mayorista (MEM), a través de la interconexión en algún punto del Sistema Argentino de Distribución (SADI). El marco regulatorio de esta actividad está establecido por la Ley n°24.065 y sus normas complementarias y regulatorias.

El Anexo 12 de “Los Procedimientos para la Programación de la Operación, el Despacho de Cargas y el Cálculo de Precios” aprobados por la Resolución 61/92 establece los requisitos que deberán cumplir los auto-generadores y co-generadores para convertirse en agentes del MEM.

Entre los requisitos, deben contar con una potencia instalada no inferior a 1 MW, con una disponibilidad media anual no inferior al 50%. Estos, y otros requisitos, vuelven inviable la interconexión de un generador como los que podrían instalarse en un criadero.

Sin embargo, la electricidad podría comercializarse a establecimientos e industrias vecinas, sin necesidad de efectuar una conexión al SADI. Este tipo de generación está sujeta a otro marco regulatorio, de carácter provincial. En la provincia de Buenos Aires está regulada por la Ley n°11.769, sus modificaciones y el decreto n°2.479/94. Estas normas no establecen trabas significativas a la comercialización de energía eléctrica entre particulares.

3.3.4 Normativa regulatoria del uso y disposición del digerido

El digerido o biodigestato es el material obtenido a partir del proceso de digestión anaeróbica de materias primas, utilizadas como único sustrato o en co-digestión. El uso y disposición del mismo sobre el suelo se encuentra regulado por la resolución 19/2019 de la Secretaría de Gobierno de Ambiente y Desarrollo, cuyos objetivos se encuentran detallados en sus artículos 1 y 2 del mismo:

- Artículo 1°: “La presente tiene por objeto fijar los criterios generales y establecer los requisitos mínimos que debe cumplir el digerido proveniente de plantas de digestión anaeróbica, a efectos de asegurar que su aplicación agrícola sea sustentable”.
- Artículo 2°: “La presente busca promover la valorización agronómica del digerido debido a su contenido de nutrientes y otras propiedades intrínsecas que lo hacen potencialmente benéfico para suelos y cultivos, protegiendo la salud de las personas, animales y el ambiente.”

A su vez, el artículo 9 del mismo establece que “para poder ser utilizados en agricultura, los digeridos deben cumplir con los parámetros de calidad establecidos en la Tabla N° 1 del Anexo V”.

Estos parámetros de calidad son los que serán tenidos en cuenta a la hora de evaluar el uso del digerido producido en el proyecto como acondicionador de suelo.

PARAMETRO	INDICADOR	VALOR LIMITE	METODOLOGÍA
Patógenos	Coliformes fecales	< 1000 NMP/g MF	TMECC 07.01-B
	<i>Escherichia coli</i>	Ausencia (*)	TMECC 07.01-C; APHA-AWWA-WPCF. Met. 9260
	Helmintos	1 huevo viable/litro de digerido	TMECC 07.04-A
	<i>Salmonella</i>	< 3 NMP/4g MF	TMECC 07.02-A; APHA-AWWA-WPCF. Met. 9260
Materia orgánica y nutrientes	pH (upH)	6,5-8,5	TMECC 07.02-A; APHA-AWWA-WPCF. Met. 4500 B
	CE (dS/m)	declarar	APHA-AWWA-WPCF. Met 2510 B.
	Materia orgánica (MO)	> 40%	APHA-AWWA-WPCF. Met 2540 E.
	N-Total	declarar	APHA-AWWA-WPCF. Met 4500 Norg B
	N-NH ₄ ⁺	declarar	APHA-AWWA-WPCF. Met 4500-NH3 B y E; F
	P - total	declarar	TMECC 04.12; EPA-M3015; TMECC 04.03; APHA-AWWA-WPCF. Met 3111; 3120
	K ⁺ - total	declarar	TMECC 04.12; EPA-M3015; TMECC 04.04; APHA-AWWA-WPCF. Met 3111; 3120
	Na ⁺ soluble	declarar	TMECC 04.05; TMECC 04.15; APHA-AWWA-WPCF. Met 3111; 3120
	Cl ⁻ soluble	declarar	APHA-AWWA-WPCF. Met. 4500-Cl- B
Estabilidad (Se deben presentar al menos dos)	Ácidos Orgánicos Totales (AOT)	≤ a 1500 mg/L	EPA, M204A; APHA-AWWA-WPCF. Met. 5210
	Ácidos Grasos Volátiles (AGV)	<0,43 g DQO/g MO	Jenkins et al., 1991; Walker et al., 2010. OFW004-005 - WRAP; APHA-AWWA-WPCF. Met. 5210
	AT ₅ (consumo acumulado de oxígeno en 5 días)	< 10 mg O ₂ /g MS	ASTM, 1996
	Biogás Residual	<0,25 L/g MO	Walker et al., 2010. OFW004-005 - WRAP
	Índice Respirométrico Dinámico (IRD)	< 1 mg O ₂ /g MO/h	Adani, F. et al, 2004.
	Índice Respirométrico Estático (IRE)	≤ 0,5 mg O ₂ /g MO. h	TMECC 05.08
Impurezas (>2mm)	Vidrio, metal, plástico	≤ 0,5% MS	TMECC 02.02-C
Elementos potencialmente tóxicos (mg/kg MS)	Arsénico	15	TMECC 04.06
	Cadmio	1,5	
	zinc	300	
	Cobre	150	
	Cromo Total	100	
	Mercurio	0,7	
	Níquel	30	
	Plomo	100	

Figura 3.4: Parámetros de calidad del digerido. Fuente: resolución 19/2019

3.3.5 Normativa regulatoria de la producción de fertilizantes orgánicos

La producción y comercialización de fertilizantes se encuentran reguladas por la ley n° 20.466 y su Decreto Reglamentario 4.830/73. Estas leyes establecen la obligatoriedad del registro de los fertilizantes y enmiendas, y fijan el marco regulatorio a nivel nacional y las normas para la fiscalización de la comercialización. Las principales definiciones de las normas incluyen:

- Autoridad de aplicación (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca)
- Definición y alcance del concepto fertilizante.
- Requisito de inscripción de los productores y comerciantes.
- Requisito de la certificación de aptitud para su empleo.
- Requisitos de etiquetado y comunicación para la comercialización.
- Características que deben reunir el producto y los controles de calidad
- Sanciones y atribuciones de la autoridad de aplicación

Respecto a la posibilidad de comercializar los efluentes procesados a través de la digestión anaeróbica, las normas señalan que los fertilizantes orgánicos como ser estiércol, compost, etc., y enmiendas orgánicas no sometidas a manipulación industrial quedan exentos del cumplimiento de los requisitos del presente decreto y su venta bajo análisis son optativa. “No se podrá hacer referencia a su composición química o bioquímica o elementos nutrientes sin haberlos sometido a análisis previos” (Decreto 4.830/73).

Por otro lado, no existen aún leyes que regulen el uso de los fertilizantes, aunque abundan los proyectos de ley que buscan establecer valores mínimos, que garanticen la reposición de nutrientes al suelo, y máximos, que eviten la contaminación del suelo y fuentes de agua.

3.3.6 Conclusiones del Marco Normativo

Como principales conclusiones de esta sección, se pueden mencionar los siguientes puntos:

El vertido de los efluentes según el tratamiento actual se encuentra regulado por la resolución de AGOSBA N° 336/2003, debiendo el efluente cumplir con los parámetros de calidad de las descargas límites admisibles estipulados en el mismo y siendo la autoridad del agua la autoridad de aplicación.

La producción de energía a partir del biogás obtenido por la biodigestión de purines porcinos se encuentra regulado por la ley de Biocombustibles (ley n°26.093/2006), la cual designa a la Secretaría de Energía, del Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios como la autoridad de aplicación sobre la producción, mezcla y comercialización de Biocombustibles.

Dada la capacidad de la planta de Biogás, la cual no alcanza la potencia requerida para ser registrado como generador de energía eléctrica distribuida ni cogenerador para convertirse en agente del Mercado Eléctrico Mayorista, la comercialización de la energía eléctrica generada será comercializada entre particulares, siendo la Ley n°11.769, sus modificaciones y el decreto n°2.479/94 la normativa reguladora de la actividad.

El uso y la disposición del digerido obtenido como subproducto de la biodigestión de purines porcinos sobre el suelo se encuentra regulado por la resolución 19/2019 de la Secretaría de Gobierno de Ambiente y Desarrollo y estipula una serie de parámetros de calidad que el mismo debe cumplir para su disposición final.

Por último, la comercialización del biodigerido como fertilizante se encuentra regulado por la Ley n° 20.466 y su Decreto Reglamentario 4.830/73 designando como autoridad de aplicación al Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca.

4. Análisis de alternativas y memoria descriptiva

4.1 Caracterización y cuantificación de los residuos porcinos

4.1.1 Composición de los residuos porcinos

Dado que no se cuentan con estudios preliminares de la composición de los purines de cerdo de la empresa "Híbridos Argentinos S.A", se adoptó una composición promedio obtenida de bibliografía para granjas porcinas de ciclo completo alimentadas a base de maíz y soja, al igual que el sistema bajo estudio. La misma se puede observar en la tabla a continuación:

Composición de los purines de Cerdo		
Parámetro	Unidad	Media
Densidad	kg L ⁻¹	1
Sólidos totales (ST)	g ST kg ⁻¹	50,4
Sólidos volátiles (SV)	g SV kg ⁻¹	35,4
Demanda Química de oxígeno (DQO)	g O ₂ kg ⁻¹	69,7
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	g NTK kg ⁻¹	5,3
Nitrógeno amoniacal total (NH₄-N)	g NH ₄ ⁺ - N kg ⁻¹	4,4
Nitrógeno orgánico (N_{org})	g N _{org} kg ⁻¹	0,9
Fósforo (P)	g P kg ⁻¹	1,38
Potasio (K)	g K kg ⁻¹	4,83
Cobre (Cu)	mg Cu kg ⁻¹	40
Zinc (Zn)	mg Zn kg ⁻¹	66
C/N	g C g ⁻¹ N	16,4
ph	-	7,5
Alcalinidad Total	g CaCO₃ kg⁻¹	13,42

Tabla 4.1. Composición de purines de cerdo. Fuente: GIRO

Los purines de cerdo se caracterizan por poseer un contenido elevado en agua y un contenido bajo en materia orgánica. Sin embargo, cuentan con una elevada concentración de macro y micro nutriente (N, Cu, Zn, P y K), así como una buena capacidad buffer (debido a su alta alcalinidad) fundamental para evitar problemas de acidificación.

El potencial bioquímico de generación de metano fue tomado como el valor promedio de los obtenidos por las fuentes bibliográficas mencionadas en la tabla X y una composición de metano en el biogás del 62,8%. Los valores se observan a continuación:

Tasa específica de generación de Biogás y Metano		
Parámetro	Unidad	Valor
Tasa específica de generación de Metano	Nm3 CH4/tn SV	0,297
Tasa específica de generación de Biogás	Nm3 Biogás /tn SV	0,473

Tabla 4.2. Tasa específica de generación de Biogás y Metano. Fuente: elaboración propia

4.1.2 Cuantificación de los Purines de Cerdo

La metodología empleada en la cuantificación de los purines de cerdo se basó en la utilización de coeficientes de generación de purín de acuerdo a la orientación productiva, estado fisiológico y peso del cerdo, especificados en el manual de “Buenas Prácticas de Manejo y Utilización de Efluentes Porcinos” del Ministerio de Agroindustria, Presidencia de la Nación. Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

Cuantificación de los Purines de Cerdo									
Componente	Unidades	Recría	Engorde			Cachorras reposición	Padrillos	Cerdas Gestación	Cerdas Maternidad + 19 Lechones por año
			23-57kg	57-80kg	80-114kg				
Tasa de generación de purín	kg/día	1,68	2,73	3,64	4,27	3,73	3,73	3,73	11,82
Cantidad	-	4.836	3.455	3.455	3.455	53	40	600	147
Purín generado	kg/día	8.125	9.430	12.574	14.750	197	149	2.236	1.740

Tabla 4.3: Cuantificación de los purines de cerdo, "Híbridos Argentinos, S.A". Fuente: elaboración propia

4.1.3 Caracterización y comparación con la normativa

Se procedió a comparar la caracterización y cuantificación del efluente porcino con los valores establecidos en la resolución de AGOSBA N° 336/2003, la cual establece las normas para el vertido de efluentes líquidos en diferentes cuerpos receptores en la Provincia de Buenos Aires. En este caso, se realiza la comparación con los límites establecido para el vertido del efluente en el suelo, ya que es el cuerpo receptor para se realiza el vertido actual en la granja.

Comparación del Efluente con resolución de AGOSBA N° 336/2003					
Parámetro	Código Técnica analítica	Unidad	Efluente actual	Límite para la Absorción por el suelo (h)	Cumple
pH	4500 H+B	upH	7,5	6,5-10	Sí
DQO	5220 D	mg/l	69700	<500	NO
Cinc	3111 B y C	mg/l	66	<1	NO
Cobre	3500 Cu D	mg/l	40	Ausente	NO
Nitrógeno total (d)	4500 N org B (NTK)	mg/l	5300	<105	NO
Nitrógeno Amoniacal (d)	4500 NH3+F	mg/l	4400	<75	NO
Nitrógeno Orgánico (d)	4500 N org B	mg/l	900	<30	NO
Fósforo total	4500 PC	mg/l	1380	<10	NO

Tabla 4.4. Comparación del efluente con la resolución de AGOSBA N° 336/2003. Fuente: elaboración propia.

Mediante el sistema de tratamiento actual, la empresa híbridos argentinos S.A no cumple con la normativa vigente de acuerdo a la resolución de AGOSBA N° 336/2003.

4.2 Análisis de alternativas

Una vez diagnosticado el problema y revisada la normativa a la cual deben ajustarse los parámetros de vuelco legislados, se analizan y comparan dos alternativas que permitan brindar una solución al tratamiento de los efluentes porcinos. Las alternativas consideradas para este proyecto son:

- Sistema de lagunas de tratamiento
- Sistema de Biodigestión anaeróbica con co-generación de energía

El objetivo de esta sección es presentar las diferentes técnicas, analizando las ventajas y desventajas de cada una para decidir su uso y establecer cuál es el sistema a seleccionar para el caso en cuestión.

4.2.1 Sistema de lagunas de tratamiento

Las lagunas de estabilización son una técnica sencilla para el tratamiento de efluentes agrícolas. Consisten en retener el efluente en estanques durante un período de tiempo suficiente como para provocar la degradación de la materia orgánica por medio de la actividad microbiológica.

Funcionan en forma natural, sin la intervención de mecanismos ideados por el ser humano, sin embargo se podrían incluir sistemas para aumentar la temperatura del agua, equipos mecánicos de aireación, u otros. Sus ventajas se definen por la simplicidad extrema de su funcionamiento. Pero,

las desventajas se reflejan en los largos períodos de retención y la consecuente necesidad de un mayor uso de superficie.

Su construcción es muy simple, involucrando principalmente las actividades de movimiento de tierra y sellado. Los costos de operación son muy bajos, comparándolos con los costos de otros sistemas de tratamiento. Este bajo costo hace que muchas veces se considere que el funcionamiento de estos sistemas de tratamiento sean de menor calidad que otros, siendo por lo general tan eficiente como los sistemas convencionales.

Las lagunas de tratamiento pueden ser clasificadas por el tipo de degradación biológica (aeróbica, anaeróbica o facultativa), por la frecuencia de descarga y por la disposición espacial.

Lagunas anaeróbicas. Las lagunas anaeróbicas son estanques profundos de 2,4m a 8m que en su interior se desarrollan procesos biológicos conducentes a reducir la demanda de oxígeno (DBO) y los nutrientes que vienen en el efluente. Éstas pueden aceptar altas cantidades de carga orgánica (hasta $20.000\text{mg}\cdot\text{l}^{-1}$) y pueden funcionar sin la fotosíntesis de las algas. La penetración de la luz no es importante y se pueden construir más profundas, siendo 4 a 5m, las profundidades más comunes. El efluente de una laguna anaeróbica, cuya eficiencia puede alcanzar un 70% de remoción de DBO, puede mostrar aún altos contenidos de DBO para su disposición en cuerpos de agua superficiales. Por otra parte, los sólidos no degradados se acumulan en el fondo, dando lugar a la formación de una capa de lodos. A medida que aumenta el tiempo de almacenamiento de los lodos en las lagunas, su contenido en materia orgánica disminuye debido a la degradación anaerobia a la que están sometidos.

Ventajas:

- Las lagunas anaeróbicas requieren superficies relativamente pequeñas y por eso son más económicas de implementar para un volumen de tratamiento determinado.
- Las lagunas anaeróbicas pueden descomponer más materia orgánica que las lagunas aeróbicas por unidad de tiempo.

Desventajas:

- Las lagunas anaeróbicas son sensibles a los cambios repentinos de temperatura y tasas de carga orgánica y, como resultado, producen algunos olores. Sin embargo, los problemas serios de olor raramente se presentan si la laguna está diseñada y operada apropiadamente.
- Las lagunas anaeróbicas funcionan mejor durante el verano y en áreas sin inviernos fríos ya que las temperaturas altas mejoran el proceso de degradación.

Lagunas facultativas. Este tipo de lagunas se diseñan para que tengan dos zonas definidas. Una se mantiene aeróbica, mientras que otra es anaeróbica. En el estrato superior de la laguna facultativa existe una simbiosis entre algas y bacterias, en presencia de oxígeno; en los estratos inferiores se produce una biodegradación anaerobia de los sólidos sedimentables. Estas lagunas por lo general son aeróbicas durante el día, así como durante algunas horas de la noche. El aporte de oxígeno se genera, al igual que en lagunas aeróbicas, a partir de las algas y de la difusión. El objetivo esperado en las lagunas facultativas es obtener un líquido de la mayor calidad posible, en el que se haya alcanzado una elevada degradación de la materia orgánica, y una reducción en el contenido en nutrientes y bacterias coliformes. Sin embargo, por las mismas razones que en las lagunas aeróbicas, este tipo de tratamiento puede resultar no viable para el manejo de purines.

Laguna de maduración: son lagunas fotosintéticas donde el oxígeno necesitado por las bacterias de la laguna para oxidar la DBO5, es provisto por micro-algas que usualmente crecen en las lagunas (y dan ese color verde característico) y el dióxido de carbono que necesita el alga, se lo dan las bacterias de la laguna. Es un mutualismo entre ambas especies. Su objetivo es el de reducir los patógenos, principalmente virus y bacterias a un nivel adecuado a la normativa y/o reúso.

Para este proyecto la alternativa consiste de un sistema de lagunas de estabilización, conformado por una serie de lagunas anaeróbicas, lagunas facultativas y lagunas de maduración (aeróbicas) para permitir obtener niveles admisibles del efluente para cumplir con la normativa vigente.



Figura 4.1. Esquema de un sistema de tratamiento por lagunas de estabilización. Fuente: UNSAM

Las ventajas y desventajas del sistema de lagunas se pueden observar en el siguiente cuadro:

Ventajas y desventajas de un sistema de lagunas	
Ventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • La estabilización de la materia orgánica alcanzada es muy elevada. • La eliminación de microorganismos patógenos es muy superior a la alcanzada mediante otros métodos de tratamiento. • Presentan una gran flexibilidad en el tratamiento de puntas de carga y caudal • Desde el punto de vista económico, es mucho más barato que los métodos convencionales, con bajos costos de instalación y mantenimiento. • El consumo energético es nulo. 	<ul style="list-style-type: none"> • La presencia de materia en suspensión en el efluente, debido a las altas concentraciones de fitoplancton. • Ocupación de terreno, que es superior a la de otros métodos de tratamiento. • Las pérdidas considerables de agua por evaporación en verano.

Tabla 4.5. Ventajas y desventajas de un sistema de lagunas. Fuente: elaboración propia.

4.2.2 Sistema de Biodigestión anaeróbica con cogeneración de energía.

La alternativa 2, consiste en un sistema de biodigestión anaeróbica con cogeneración de energía a partir de los efluentes porcinos y la utilización de maíz como co-sustrato.

La digestión anaerobia es un proceso que puede ser utilizado como un método para recuperar energía y nutrientes contenidos en la fracción biodegradable de la materia orgánica. La biomasa utilizada para la producción de biogás se conoce con el nombre de sustrato orgánico. El proceso está mediado por la acción de un grupo de bacterias específicas, que en ausencia de oxígeno, transforman la materia orgánica en una mezcla de gases, fundamentalmente metano y CO₂, conocida como biogás y en un residuo denominado digestato, que es una mezcla de productos minerales (N, P, K, Ca, etc.) y compuestos de difícil degradación.

El proceso de digestión anaerobia para la generación de biogás se realiza normalmente en estanques herméticamente cerrados, denominados reactores, y presenta beneficios económicos y ambientales como consecuencia de la descomposición de los sustratos orgánicos, y la consecuente producción de energía. La digestión anaerobia puede aplicarse, entre otros, a residuos ganaderos y agrícolas, así como a los residuos de las industrias de transformación de productos agropecuarios.

Entre los residuos se pueden citar purines, estiércol, residuos agrícolas o excedentes de cosechas, etc. Estos residuos se pueden tratar de forma independiente o conjunta, mediante lo que se denomina co-digestión.

La siguiente figura entrega un esquema general de los componentes de una planta de biogás para generación de energía eléctrica y térmica, identificando las etapas principales del

procesamiento de la biomasa: manejo de sustratos, producción de biogás y utilización del biogás. Estas etapas son discutidas en detalle en los puntos siguientes.

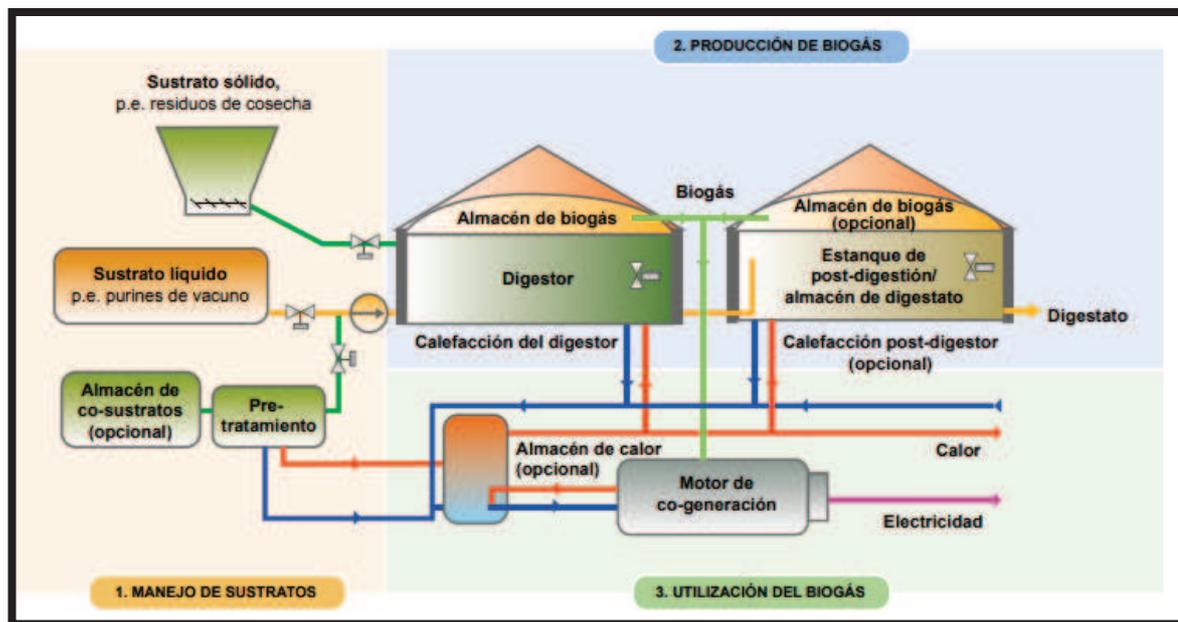


Figura 4.2: Esquema general de una planta de Biogás. Fuente: GUÍA DE PLANIFICACIÓN PARA PROYECTOS DE BIOGÁS EN CHILE, 2012.

La promoción e implantación de sistemas de producción de biogás colectivos (grupos de agricultores o campesinos), y de co-digestión (tratamiento conjunto de residuos orgánicos de diferentes orígenes, usualmente agropecuarios e industriales) permite, además, la implantación de sistemas de gestión integral de residuos orgánicos por zonas geográficas, con beneficios sociales, económicos y ambientales.

Beneficios ambientales: La producción y uso de biogás a partir de residuos de estiércoles y purines tratados anaerobiamente conlleva a un doble efecto climático: evitar la emisión descontrolada de metano proveniente de la producción animal y evitar el aumento de concentración de CO₂ en la atmósfera producido por el uso de combustibles fósiles.

Del mismo modo, al realizar un almacenamiento hermético de los estiércoles y purines, se reduce la emisión de óxido nítrico, se mejora la absorción de nitrógeno realizada por los cultivos al aplicar el digestato como abono y se reduce también la emisión de amoníaco a la atmósfera. La digestión anaerobia es también capaz de descomponer los contaminantes orgánicos presentes en los estiércoles y purines, los cuales provienen del uso de pesticidas en la agricultura.

Así como los contaminantes orgánicos, variados patógenos se degradan durante el proceso anaerobio. No sólo la anaerobiosis sino también la temperatura del proceso, la acidificación del medio y el contenido de exoenzimas activas favorecen la degradación de estos patógenos. Hongos, como por ejemplo *plasmodiophora brassicae*, como también larvas y gusanos se degradan en pocos días a temperatura mesofílica (35°C) o en pocas horas a temperatura termofílica (55°C). Bacterias como *salmonella* o *Escherichia coli*, se degradan en pocos días a temperatura mesofílica. Los compuestos orgánicos que producen malos olores durante su descomposición se degradan y eliminan del ciclo de nutrientes durante el proceso de digestión anaerobia con la consecuente disminución de malos olores en el almacenamiento y en la aplicación del digestato como fertilizante orgánico.

Beneficios de la fertilización orgánica con digestato: En la agricultura los principales nutrientes fertilizantes son el nitrógeno, fósforo y potasio, y la cantidad que se requiere de cada uno de ellos dependerá del tipo de suelo, de las condiciones climatológicas y del cultivo. El digestato contiene cantidades importantes de los nutrientes mencionados.

El humus del digestato, además de proporcionar alimento a los vegetales, beneficia el suelo aumentando su capacidad de retención de agua y mejorando su calidad para el cultivo. También disminuye el fenómeno de erosión.

La ventaja más importante de la fertilización orgánica es su participación en el ciclo natural de los nutrientes. Una característica de este tipo de fertilización es su amplio espectro de nutrientes que aporta al medio, siendo muy similar al requerimiento de las plantas.

Beneficios económicos: El biogás producido tiene un valor comercial como combustible, el cual se puede utilizar para la generación de energía eléctrica y/o térmica o su venta directa como gas valorado respecto de su contenido energético para sustituir combustibles fósiles. Mediante equipos de cogeneración, se puede utilizar el biogás para generar tanto electricidad como calor, mediante la recuperación de parte de la energía térmica contenida en los gases de combustión y en el fluido de refrigeración del motor de cogeneración.

Beneficios sociales: Los proyectos de biogás, al ser sistemas descentralizados de producción de energía eléctrica y calórica, acarrearán beneficios sociales tanto para los productores, como para la zona donde se encuentren los proyectos.

Aumento de la sustentabilidad de los sistemas productivos: La utilización de la tecnología de digestión anaerobia realizada a los estiércoles, purines y a los residuos orgánicos, en general, es una herramienta que aporta la posibilidad de aumentar en forma considerable el grado de

sustentabilidad de los sistemas agrícolas, así como de las demás actividades económicas en las cuales se pueden aprovechar la biomasa residual para la producción de biogás.

4.2.3 Selección de la Alternativa

Si bien ambos sistemas permiten ofrecer una alternativa para el tratamiento de los residuos porcinos, este proyecto se focalizó en el estudio de la alternativa de un sistema de biodigestión con cogeneración de energía eléctrica. Esto se debe al enfoque mismo que se le dio al proyecto, el cual no sólo pretende obtener beneficios socio-ambientales y cumplir con la normativa vigente referida a los niveles de vuelco del efluente, sino también obtener beneficios económicos para la empresa mediante la generación y comercialización de la energía renovable y la valorización del biodigestato.

El sistema de biodigestión permite no sólo el tratamiento del efluente a los niveles requeridos por la normativa vigente, sino también la creación de un proyecto de inversión que permita obtener ganancias mediante la comercialización de energía eléctrica, térmica y potencialmente de fertilizantes orgánicos. Teniendo en cuenta este aspecto del proyecto, no se analizó en detalle el tratamiento del efluente mediante un sistema de lagunas.

El sistema de tratamiento de efluentes porcinos propuesto en este proyecto se basa en la utilización de los mismos como co-sustrato junto al silaje de maíz en un sistema de biodigestión con el objeto de generar energía eléctrica. Este capítulo se ordenó de la siguiente manera:

En primer lugar, se describen, como marco teórico del proyecto, los fundamentos de la biodigestión anaeróbica, los parámetros que afectan el proceso, los posibles sustratos a ser utilizados, los productos obtenidos y sus posibles usos.

En segundo lugar, se expone la memoria descriptiva del proyecto seleccionado, describiendo las características de los sistemas y componentes utilizados en el mismo, sus principales propiedades y el dimensionamiento adoptado.

4.3 Fundamentos de la Biodigestión anaerobia

La digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo y degradativo en el cual parte de los materiales orgánicos de un sustrato son convertidos en biogás, mezcla de dióxido de carbono y metano con trazas de otros elementos, por un consorcio de bacterias que son sensibles o completamente inhibidas por el oxígeno o sus precursores (e.g. H₂, O₂). Utilizando el proceso de digestión anaeróbica es posible convertir gran cantidad de residuos, residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles. En la digestión anaerobia más del 90% de la energía disponible por

oxidación directa se transforma en metano, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano frente al 50% consumido en un sistema aeróbico.

4.2.1 Etapas de la digestión anaeróbica

La digestión anaeróbica es un proceso muy complejo tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar como por la cantidad de microorganismos involucrados en ellas. De hecho, muchas de estas reacciones ocurren de forma simultánea.

Los estudios bioquímicos y microbiológicos realizados hasta ahora, dividen el proceso de descomposición anaeróbica de la materia orgánica en cuatro fases o etapas:

- Hidrólisis
- Etapa fermentativa o acidogénica
- Etapa acetogénica
- Etapa metanogénica

La primera fase es la hidrólisis de partículas y moléculas complejas (proteínas, carbohidratos y lípidos) que son hidrolizadas por enzimas extracelulares producidas por los microorganismos acidogénicos o fermentativos. Como resultado se producen compuestos solubles más sencillos (aminoácidos, azúcares y ácidos grasos de cadena larga) que serán metabolizados por las bacterias acidogénicas dando lugar, principalmente, a ácidos grasos de cadena corta, alcoholes, hidrógeno, dióxido de carbono y otros productos intermedios. Los ácidos grasos de cadena corta son transformados en ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono, mediante la acción de los microorganismos acetogénicos. Por último, los microorganismos metanogénicos producen metano a partir de ácido acético, H₂ y CO₂.

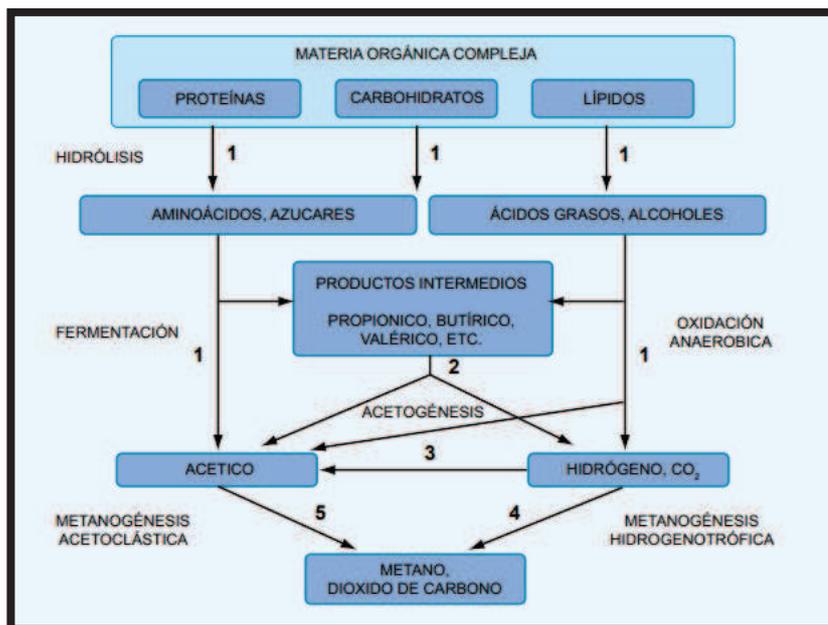


Figura 4.2: Esquema de reacciones de la digestión anaeróbica de materiales poliméricos Fuente: (Pavlostathis y Giraldo-Gómez, 1991). Los números indican la población bacteriana responsable del proceso: 1: bacterias fermentativas; 2: bacterias acetogénicas que producen hidrógeno; 3: Bacteria homoacetogénicas; 4: bacterias metanogénicas hidrogenotróficas; 5: bacterias metanogénicas acetoclásticas.

En la Figura 6 se muestra esquemáticamente las distintas fases del proceso de digestión anaeróbica, los microorganismos que intervienen en cada una de ellas y los productos intermedios generados.

Hidrólisis

La materia orgánica polimérica no puede ser utilizada directamente por los microorganismos a menos que se hidrolicen en compuestos solubles, que puedan atravesar la pared celular. La hidrólisis es el primer paso necesario para la degradación anaeróbica de sustratos orgánicos complejos. Por tanto, es el proceso de hidrólisis el que proporciona sustratos orgánicos para la digestión anaeróbica. La hidrólisis de estas moléculas complejas es llevada a cabo por la acción de enzimas extracelulares producidas por microorganismos hidrolíticos.

La etapa hidrolítica puede ser el proceso limitante de la velocidad global del proceso sobre todo cuando se tratan residuos con alto contenido de sólidos. Además, la hidrólisis depende de la temperatura del proceso, del tiempo de retención hidráulico, de la composición bioquímica del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos, proteínas y grasas), del tamaño de partículas, del nivel de pH, de la concentración de NH_4^+ y de la concentración de los productos de la hidrólisis.

Etapas fermentativa o acidogénica

Durante esta etapa tiene lugar la fermentación de las moléculas orgánicas solubles en compuestos que puedan ser utilizados directamente por las bacterias metanogénicas (acético, fórmico, H₂) y compuestos orgánicos más reducidos (propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol principalmente) que tienen que ser oxidados por bacterias acetogénicas en la siguiente etapa del proceso. La importancia de la presencia de este grupo de bacterias no sólo radica en el hecho que produce el alimento para los grupos de bacterias que actúan posteriormente, sino que además eliminan cualquier traza del oxígeno disuelto del sistema. Este grupo de microorganismos, se compone de bacterias facultativas y anaeróbicas obligadas, colectivamente denominadas bacterias formadoras de ácidos.

Etapas acetogénica

Mientras que algunos productos de la fermentación pueden ser metabolizados directamente por los organismos metanogénicos (H₂ y acético), otros (etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos) deben ser transformados en productos más sencillos, como acetato (CH₃COO-) e hidrógeno (H₂), a través de las bacterias acetogénicas. Representantes de los microorganismos acetogénicos son *Syntrophomonas wolfei* y *Syntrophobacter wolini*. Un tipo especial de microorganismos acetogénicos, son los llamados homoacetogénicos. Este tipo de bacterias son capaces de crecer heterotróficamente en presencia de azúcares o compuestos monocarbonados (como mezcla H₂/CO₂) produciendo como único producto acetato. Al contrario que las bacterias acetogénicas, éstas no producen hidrógeno como resultado de su metabolismo, sino que lo consumen como sustrato. Según se ha estudiado, el resultado neto del metabolismo homoacetogénico permite mantener bajas presiones parciales del hidrógeno y, por tanto, permite la actividad de las bacterias acidogénicas y acetogénicas. Los principales microorganismos homoacetogénicos que han sido aislados son *Acetobacterium woodii* o *Clostridium aceticum*

A esta altura del proceso, la mayoría de las bacterias anaeróbicas han extraído todo el alimento de la biomasa y, como resultado de su metabolismo, eliminan sus propios productos de desecho de sus células. Estos productos, ácidos volátiles sencillos, son los que van a utilizar como sustrato las bacterias metanogénicas en la etapa siguiente.

Etapas metanogénica

En esta etapa, un amplio grupo de bacterias anaeróbicas estrictas, actúa sobre los productos resultantes de las etapas anteriores. Los microorganismos metanogénicos pueden ser considerados como los más importantes dentro del consorcio de microorganismos anaerobios, ya que son los

responsables de la formación de metano y de la eliminación del medio de los productos de los grupos anteriores, siendo, además, los que dan nombre al proceso general de biometanización. Los microorganismos metanogénicos completan el proceso de digestión anaeróbica mediante la formación de metano a partir de sustratos monocarbonados o con dos átomos de carbono unidos por un enlace covalente: acetato, H₂ /CO₂ formato, metanol y algunas metilaminas.

Los organismos metanogénicos se clasifican dentro del dominio Archaea y tienen características comunes que los diferencian del resto de procariontes. Se pueden establecer dos grandes grupos de microorganismos, en función del sustrato principal que metabolizan: hidrogenotróficos, que consumen H₂ /CO₂ y fórmico y acetoclásticos, que consumen acetato, metanol y algunas aminas. Se ha demostrado que un 70% del metano producido en los reactores anaeróbicos se forma a partir de la descarboxilación de ácido acético, a pesar de que, mientras todos los organismos metanogénicos son capaces de utilizar el H₂ como aceptor de electrones, sólo dos géneros pueden utilizar acetato. Los dos géneros que tienen especies acetotróficas son Methanosarcina y Methanotherix. El metano restante proviene de los sustratos ácido carbónico, ácido fórmico y metanol. El más importante es el carbónico, el cual es reducido por el hidrógeno, también producido en la etapa anterior.

4.2.2 Cinética de las reacciones biológicas

El proceso de digestión anaeróbica puede ser considerado como un conjunto de reacciones en serie y paralelo. Las reacciones bioquímicas pueden visualizarse desde el punto de vista de la utilización del sustrato (reacciones en paralelo) así como desde generación de los productos finales metano y dióxido de carbono (procesos en serie). A continuación, se definen algunos conceptos importantes, se ha tomado como referencia la descripción teórica de Campos, 2001.

4.2.2.1 Tasa de utilización del sustrato

El crecimiento celular engloba la conversión metabólica de un sustrato en sus productos, lo que hace que se libere energía en forma de ATP (ruta catabólica) y que será utilizada para la síntesis celular (ruta anabólica).

Catabolismo: Sustrato → Productos + Energía

Anabolismo: Sustrato + Energía + Nutrientes → Masa celular

Resultado Global: Sustrato + Nutrientes → Masa celular + Productos

La cantidad de masa celular, o biomasa formada, es proporcional a la cantidad de sustrato y de producto. Se puede definir un coeficiente para cada tipo de bacterias, llamado **coeficiente de producción, Y**, que puede ser determinado experimentalmente:

$$\text{Producción de Biomasa: } Y_{X,S} = \frac{\Delta X}{\Delta S}$$

$$\text{Producción de Producto: } Y_{P,S} = \frac{\Delta P}{\Delta S}$$

dónde:

- S: Sustrato
- X: Biomasa,
- P: Producto

Mediante el coeficiente de producción se puede asociar el crecimiento de la población de microorganismos al consumo de sustrato:

$$\frac{dX}{dt} = Y_{X,S} \frac{dS}{dt} - bX$$

Donde bX es un término que refleja la lisis bacteriana, habiéndose asociado, también, con el concepto de energía de mantenimiento, denominado coeficiente de respiración.

4.2.2.2 Tasa de Crecimiento

En condiciones ideales, el crecimiento bacteriano sigue un crecimiento exponencial en el tiempo. Puesto que el crecimiento de la población bacteriana ocurre por división celular, la tasa de crecimiento bacteriano es proporcional al tamaño de la población.

La ecuación de Monod para reacciones autocatalíticas con cinética de primer orden representa la variación de biomasa con respecto al tiempo:

$$\frac{dX}{dt} = \mu X$$

dónde:

- μ : tasa específica de crecimiento

Considerando la respiración endógena, la tasa de crecimiento se expresará mediante la siguiente expresión:

$$\frac{dX}{dt} = \mu X - bX$$

Integrando la ecuación anterior, considerando μ y b constantes, se obtiene la función de la concentración de la población bacteriana en el tiempo:

$$X = X_{(t=0)} e^{(\mu-b)t}$$

En los procesos reales existen limitaciones en el crecimiento, dadas, por ejemplo, por la limitación del sustrato disponible o por la presencia de tóxicos. Se utiliza la siguiente expresión para la tasa de crecimiento específica:

$$\mu = \mu_{\max} \frac{S}{K_S + S}$$

dónde:

μ : Tasa de crecimiento específica

μ_{\max} : Tasa máxima de crecimiento específica

S : Concentración de sustrato

K_S : Constante de Saturación.

De esta forma si la cantidad de sustrato es muy grande, la tasa específica se aproxima al valor máximo y si la concentración del sustrato tiende a cero, se aproxima a cero.

Existen otras funciones para simular la cinética de crecimiento, tal y como se muestra en la siguiente tabla:

Cinéticas de Crecimiento		
Tipo de Cinética	$-\frac{dS}{dt}$	μ
Primer orden	$K \cdot S$	$\frac{K \cdot S}{S_0 - S}$
Grau et al. (1975)	$\frac{\mu}{Y} \frac{S}{S_0} X$	$\mu \frac{S}{S_0}$
Monod (1950)	$\frac{\mu}{Y} \frac{S}{K_S + S} X$	$\mu \frac{S}{K_S + S}$
Contois (1959)	$\frac{\mu_{\max}}{Y} \frac{S}{BX + S} X$	$\mu_{\max} \frac{S}{BX + S}$
Chen y Hashimoto (1978)	$\mu \frac{S}{KX + YS} X$	$\mu \frac{S}{KS_0 + (1 - K)S}$

Tabla 4.1. Cinéticas de crecimiento en una digestión anaeróbica. Fuente: Elaboración propia

4.2.2.3 Tasa específica de utilización del sustrato

A partir de las ecuaciones anteriores se puede definir la tasa específica de utilización de sustrato (U), es decir, la variación de sustrato en el tiempo por unidad de biomasa:

$$\frac{dX}{dt} = \mu X - bX = Y_{X,S} \frac{dS}{dt} - bX \rightarrow \mu X = Y_{X,S} \frac{dS}{dt} \rightarrow U = \frac{1}{X} \frac{dS}{dt} = \frac{\mu}{Y}$$

4.2.2.4 Cinéticas de Inhibición

La presencia de inhibidores se refleja en una menor tasa de crecimiento de los microorganismos. No todos los microorganismos se ven afectados de la misma forma por los mismos compuestos inhibidores.

Se dice que hay tres tipos básicos de inhibición, en función de la reversibilidad y del parámetro cinético al que afecta: inhibición no competitiva, inhibición competitiva e inhibición acompetitiva:

Tipo de inhibiciones		
	Parámetro afectado	Expresión cinética
Inhibición no competitiva	$K_1 \cdot S$	$\mu = \mu_{max} \frac{S}{K_S + S} \frac{K_1}{K_1 + I}$
Inhibición competitiva	$\frac{\mu}{Y} \frac{S}{S_0} X$	$\mu = \frac{\mu_{max} S}{\left(1 + \frac{1}{K_1}\right) + S}$
Inhibición acompetitiva	$\frac{\mu}{Y} \frac{S}{K_S + S} X$	$\mu = \frac{\mu_{max}}{1 + \frac{K_S}{S} + \frac{1}{K_I}}$

Tabla 4.6. Cinéticas de acuerdo con el tipo de inhibición. Fuente: elaboración propia

En todos los casos, K_1 es la constante de inhibición e I La concentración del compuesto inhibidor. La expresión de la inhibición acompetitiva ha sido utilizada para expresar la inhibición por el propio sustrato (S) o por el producto (P).

De forma general, al aumentar la temperatura aumenta la tasa específica de crecimiento, hasta llegar al óptimo. A partir del óptimo, diferente para cada grupo de microorganismos, la velocidad disminuye.

La expresión más ampliamente utilizada en la modelización de los procesos anaerobios es la ecuación de Arrhenius (Pavlostathis. S.G. Et ál., 1991), como:

$$\mu = K_1 e^{[a_1(T-T_{ref})]} - K_2 e^{[a_2(T-T_{ref})]}$$

El pH afecta a la tasa máxima de crecimiento, según (Angelidaki Et. ál., 1993), como:

$$\mu_{pH} = \mu \cdot f(pH)$$

4.2.3 Factores determinantes en el proceso metanogénico

Es importante examinar algunos de los factores importantes que gobiernan el proceso metanogénico. Los microorganismos, especialmente los metanogénicos, son altamente susceptibles a los cambios en las condiciones ambientales. Muchos investigadores evalúan el desempeño de un sistema anaeróbico en función de la tasa de producción de metano, porque la metanogénesis se considera un paso limitante del proceso.

Debido a esto, la biotecnología anaeróbica requiere de un cuidadoso monitoreo de las condiciones ambientales. Algunas de estas condiciones ambientales son: pH, alcalinidad, potencial redox, requerimientos de nutrientes, la presencia de tóxicos e inhibidores.

✓ pH

La digestión anaeróbica ocurre mejor dentro de un rango de pH de 6,8 a 8,0. Las mezclas más ácidas o básicas fermentarán a menor velocidad. La introducción de materia prima a menudo reducirá el pH (hará que la mezcla sea más ácida) y la digestión se detendrá o disminuirá drásticamente hasta que las bacterias hayan absorbido los ácidos. Un pH alto favorecerá la formación de amoníaco, lo cual hace a los lodos más alcalinos.

El valor de PH es crucial para un buen resultado:

- La producción es óptima cuando el pH se encuentra en un rango de 6,8-7,2;
- inhibición (debida a ácidos) si el pH es 6,2;
- inhibición (debido al amoníaco) si el pH. 7,6;

La desviación del rango óptimo da como resultado: menor rendimiento de gas y menor calidad del gas.

✓ Alcalinidad

La alcalinidad es una medida de la capacidad buffer del sistema, que es la capacidad que posee el sistema de mantener estable el pH frente a la adición de cantidades pequeñas de ácidos o bases fuertes. La presencia y concentración de un compuesto tampón depende de la composición del sustrato y de la carga orgánica total. Por lo que un nivel suficiente de alcalinidad es necesario para amortiguar la caída de pH, por ejemplo debida a la formación y acumulación de ácidos. En el caso de los residuos ganaderos, su alta alcalinidad permite una autorregulación del pH, se trabaja en todos los casos alrededor de la neutralidad.

Aunque el valor de este parámetro depende del sustrato bajo tratamiento, durante el desarrollo normal del proceso de digestión anaerobia, es recomendable una alcalinidad superior a 1,5 g/l CaCO₃ para asegurar la capacidad tampón y evitar la acidificación

✓ Potencial redox

Indica el carácter oxidante o reductor del sistema. Es necesario que este parámetro sea lo suficientemente bajo para poder asegurar el desarrollo de las poblaciones metanogénicas estrictas, las cuales necesitan que este potencial sea menor a -250 mV

✓ Requerimiento de Nutrientes (Relación Carbono/Nitrógeno)

Prácticamente toda la materia orgánica es capaz de producir biogás al ser sometida a fermentación anaeróbica. La calidad y la cantidad del biogás producido dependerán de la composición y la naturaleza del residuo utilizado. Los niveles de nutrientes deben de estar por encima de la concentración óptima para las metanobacterias, ya que ellas se inhiben severamente por falta de nutrientes

El carbono y el nitrógeno son las principales fuentes de alimentación de las bacterias metanogénicas. El carbono constituye la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células. Estas bacterias consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de estos dos elementos en la materia prima se considera en un rango de 30:1 hasta 20:1.

La descomposición de materiales con alto contenido de carbono, superior a 35:1, ocurre más lentamente, porque la multiplicación y desarrollo de bacterias es bajo, por la falta de nitrógeno, pero el período de producción de biogás es más prolongado. En cambio, con una relación C/N menor de 8:1 se inhibe la actividad bacteriana debido a la formación de un excesivo contenido de amonio, el cual en grandes cantidades es tóxico e inhibe el proceso.

Si se requieren suplementos de nitrógeno, se pueden agregar sustratos como la urea, lodos de depuradora, estiércol de ganado, etc. Si se requiere fósforo, se puede adicionar ácido fosfórico o sal fosfato de ser necesario.

✓ Presencia de tóxicos e inhibidores

Son muchas las sustancias las que pueden resultar inhibitorias en el proceso. Dicha inhibición depende de la concentración del propio inhibidor, de la composición del sustrato y de la adaptación de los microorganismos al sustrato. Así en términos absolutos, una sustancia es un tóxico o un sustrato dependiendo de su concentración.

Se debe hacer una distinción entre inhibidores que ingresan al digestor a través de la adición de sustrato y aquellos que se forman durante la degradación del sustrato.

El primer caso se aplica en particular a sustancias como los antibióticos, desinfectantes, solventes, herbicidas, sales y metales pesados que en cantidades incluso pequeñas pueden inhibir el proceso. Para residuos ganaderos, en general, los compuestos críticos son el cobre (Cu) y el zinc (Zn). Se han mostrado bajadas en la actividad de las bacterias media para concentraciones de Cu de 200 mg/l. El zinc (Zn) no suele presentar problemas a las concentraciones típicas de las deyecciones ganaderas.

En el curso de la fermentación, se forma también toda una gama de sustancias capaces de inhibir el proceso. El inhibidor más importante en las deyecciones ganaderas es el amoníaco libre (NH_3), las concentraciones a partir de las cuales el amoníaco es inhibidor no están definidas claramente, ya que básicamente dependen del estado de aclimatación de las bacterias, del pH y de la temperatura. Las concentraciones a partir de las cuales se comienzan a notar los problemas pueden estar comprendidas entre 200 mg NH_3/L y 1100 mg NH_3/L en sistemas más aclimatados (Hansen et al, 1998).

El amoníaco libre y el amonio se encuentran en equilibrio:



Este se desplaza a la derecha con un aumento del pH y/o de la temperatura. Se puede calcular la concentración de nitrógeno en forma de amoníaco mediante:

$$[N - \text{NH}_3] = \frac{[N - \text{NH}_4^+]}{1 + \frac{[\text{H}^+]}{k_a}} = \frac{[N - \text{NH}_4^+]}{1 + 10^{pK_a - \text{pH}}}$$

dónde:

$[\text{NH}_3]$: Concentración de amoníaco libre $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$

$[N - \text{NH}_4^+]$: Concentración de nitrógeno amoniacal $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$

$[\text{H}^+]$: Concentración de ión hidrógeno $\left(\frac{\text{mol}}{\text{L}}\right)$

K_a : Constante ácida de ionización del amoníaco $\left(\frac{\text{mol}}{\text{L}}\right)$

Los valores de pK_a pueden ser estimados en función de la temperatura según la siguiente expresión (Lide, 1993).

$$pK_a = 4.10^{-8}.T^3 + 9.10^{-5} T^2 - 0,036.T + 10,072$$

Otros de los compuestos intermedios generados en la descomposición de la materia orgánica que pueden acumularse y exceder la capacidad tampón del reactor son H_2 , H_2S y los AGV (Ácidos grasos volátiles). La inestabilidad de un reactor anaerobio se manifiesta generalmente por un rápido incremento en la concentración de los AGV, lo que indica un fallo en las poblaciones metanogénicas debido a sobrecarga, variación del pH del afluente, falta de nutrientes o la infiltración de sustancias tóxicas. De hecho, este parámetro es uno de los más utilizados en los sistemas de control debido a su rápida respuesta a las variaciones del sistema (Ahring et al., 1995).

Del mismo modo que con el amoníaco, la toxicidad de los AGV y H_2S está asociada a las formas no disociadas, la cantidad de ácido/base libre depende del grado de disociación (pK), pH y concentración total en disolución.

Inhibidores en procesos de descomposición anaeróbica		
Inhibidor	Concentración inhibitoria	Comentarios
Oxígeno	>0,1 mg/L	Inhibición de los microorganismos anaeróbicos
Amoniaco libre	>200 mg NH_3/L y, >1100 mg NH_3/L en sistemas más aclimatados	El efecto inhibitorio se eleva a medida que se eleva el valor del pH y la temperatura. Gran adaptabilidad de las bacterias.
Ácidos grasos volátiles	>2000 mg HAc/L	El efecto inhibitorio se eleva a medida que cae el valor del pH. Gran adaptabilidad de las bacterias.
Sulfuro de hidrógeno	>50 mg H_2S/L	El efecto inhibitorio se eleva a medida cae el valor del pH
Metales pesados	$Cu > 50$ mg/L $Zn > 150$ mg/L $Cr > 100$ mg/L	Sólo los metales disueltos tienen efecto inhibitorio.
Desinfectantes, antibióticos	No especificado	Efecto inhibitorio específico para el producto

Tabla 4.7: Inhibidores en procesos de descomposición anaeróbica y concentraciones perjudiciales. Fuente: Henze, 1995

4.2.4 Parámetros operacionales o de funcionamiento

Los parámetros operacionales hacen referencia a las condiciones de trabajo de los reactores son:

4.2.4.1 Temperatura

Según la temperatura en el reactor, se distingue entre digestión psicrófila, mesofílica y termofílica.

Rango de temperatura	°C
Psicrofílico	10 - 25
Mesofílico	25 - 45
Termofílico	45 - 65

Tabla 4.8. Rangos de temperatura en la digestión anaerobia. Fuente: elaboración Propia

La temperatura en el reactor afecta a varios parámetros, cada uno teniendo una influencia significativa en el proceso de digestión:

- Tasa de degradación. Cuanto mayor sea la temperatura, más rápida será la degradación de la materia orgánica y por ende una mayor velocidad específica de crecimiento (μ_{max}). Dentro de cada rango de temperatura, existe un intervalo para el cual dicho parámetro se hace máximo, determinando así la temperatura de trabajo óptima en cada uno de los rangos posibles de operación (Figura X).

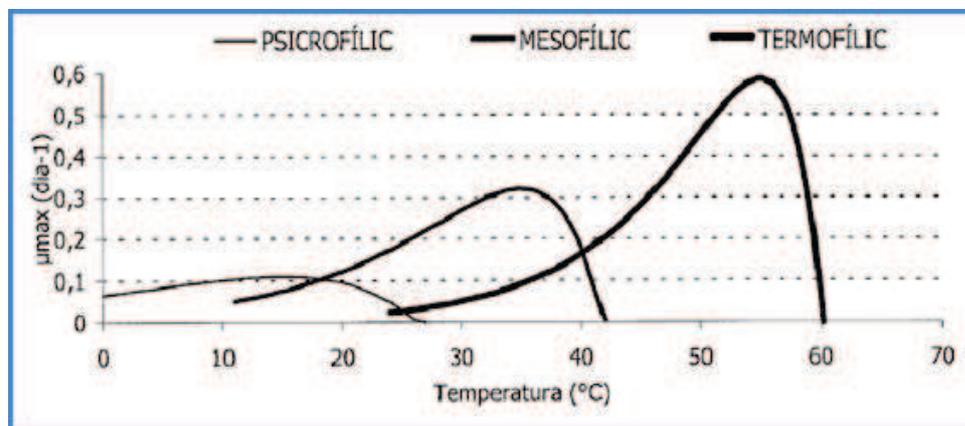


Figura 4.3: Dependencia de la velocidad específica de crecimiento con la temperatura. Fuente: Romero, 2002

Los digestores termofílicos requieren una retención más corta y, por lo tanto, volúmenes de reactor más pequeños.

- Higienización: Cuanto mayor sea la temperatura, mejor será la inactivación de patógenos durante la digestión.

- Estabilidad del proceso. Cuanto mayor sea la temperatura, mayor será la sensibilidad del proceso a los cambios de temperatura, pH y velocidad de alimentación. Además, las altas temperaturas potencian la transformación de amonio (NH_4) a amoníaco (NH_3), que aumentan el riesgo de inhibición microbiana.
- Consumo de energía. Cuanto mayor es la temperatura, mayor es la energía demanda.

A medida que aumenta la temperatura, aumenta la velocidad de crecimiento de las bacterias y las tasas de hidrólisis y con ello la velocidad global del proceso y la producción de biogás, pero también aparecen problemas en la estabilidad del proceso (por ejemplo, problemas de inhibición por amoníaco), por lo tanto, es usual trabajar en el rango mesófilo. Una temperatura entre 32°C y 35°C ha demostrado ser más eficiente para una estabilidad y continua producción de metano. El biogás producido fuera de este rango tendrá un porcentaje más alto de dióxido de carbono y otros gases que dentro de este rango.

Por otro lado, la elevada temperatura, además de producir un aumento en la tasa de descomposición y una menor viscosidad, requiere más energía para llevar el proceso de fermentación. Es por esto que las plantas de biogás que operan en rango mesofílico son las más generalizadas en la práctica debido a sus rendimientos de gas relativamente altos y a que se obtiene una buena estabilidad del proceso.

4.1.4.2 Agitación

Hay diferentes motivos para mantener un grado de agitación adecuado en el medio de digestión: mezclado y homogenización del sustrato con la población bacteriana, eliminar los metabolitos producidos por la metanogénesis, al favorecer la salida de gases, evitar la formación de espumas, capas superficiales y sedimentos, prevenir espacios muertos y caminos preferenciales en la hidráulica del sistema y eliminar la estratificación térmica, manteniendo una temperatura uniforme en todo el reactor.

El grado de agitación debe ser moderado, lo suficiente para mantener la suspensión de las partículas, en ningún caso debe ser violento, ya que podría destruir los agregados de bacterias. Por lo tanto, se necesita encontrar una solución de compromiso en la que ambas condiciones se satisfagan adecuadamente. En la práctica, esto se logra normalmente con agitadores que rotan lentamente y que ejercen sólo bajas fuerzas de cizallamiento, pero también mezclando íntegramente los contenidos del reactor a ciertos intervalos (es decir, sólo por un periodo corto y predefinido). La energía de agitación ha de estar comprendida entre 30 y $100 \text{ Wh/m}^3 \cdot \text{dia}$.

Los sistemas empleados pueden clasificarse en dos grandes grupos:

- **Agitación mecánica:** Mediante turbinas o agitadores de baja velocidad cuyos elementos giratorios desplazan al sustrato mezclándolo.
- **Agitación neumática:** Mediante la inyección de biogás a presión. Recogen el biogás producido en el digestor, lo comprimen y lo descargan a través de una serie de difusores en el fondo del tanque o mediante una serie de lanzas dispuestas radialmente ancladas en la zona superior.

En la figura siguiente se representan diferentes sistemas de agitación en digestores de mezcla completa:

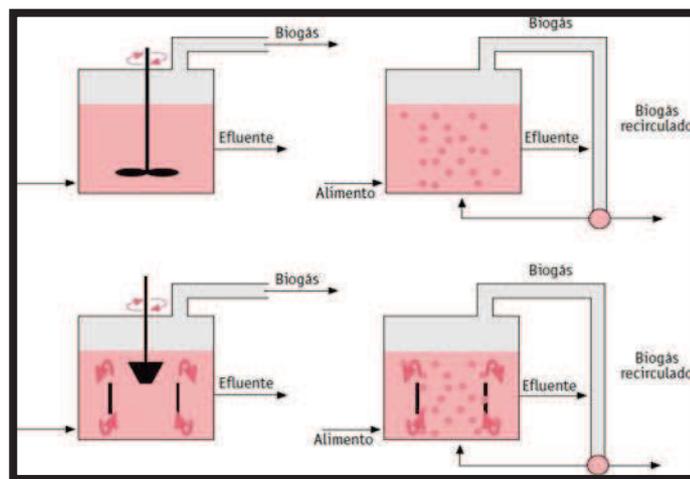


Figura 4.4: Digestores continuos de mezcla perfecta. Fuente: De Mes et al., 2003

4.1.4.3 Tiempo de retención hidráulico (TRH)

Es el tiempo promedio que el material a digerir se mantiene en el digestor hasta su descarga. El tiempo de retención hidráulico (TRH) es el cociente entre el volumen del digestor y el caudal de tratamiento. El TRH se expresa en días y está íntimamente ligado con el tipo de sustrato y la temperatura.

En la siguiente figura se indica la tendencia general de los índices de eliminación de materia orgánica (expresada en forma de sólidos volátiles, SV) y de producción específica del gas, por unidad de volumen del reactor, en función del tiempo de retención:

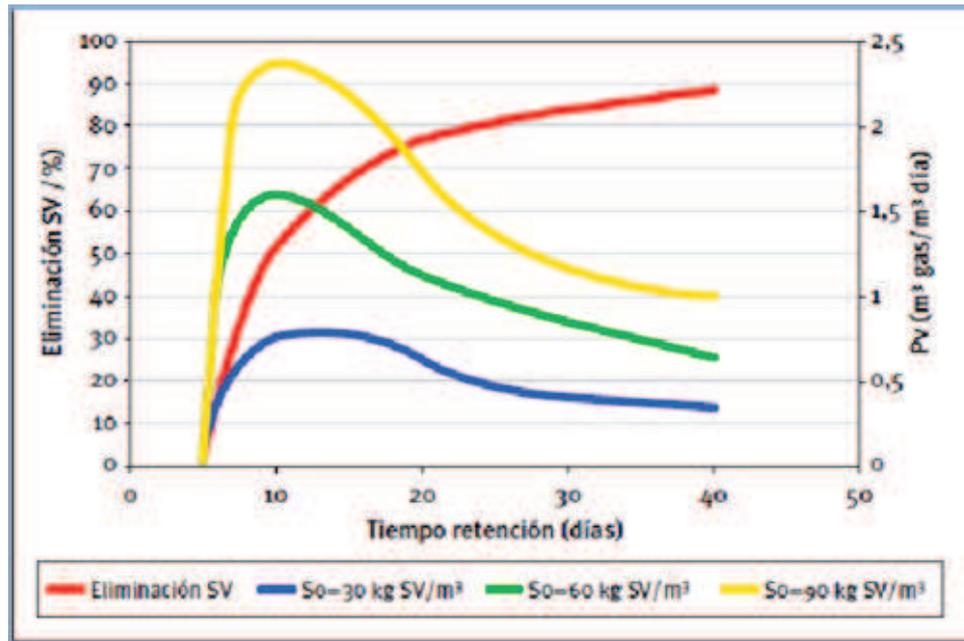


Figura 4.5: Eliminación de sólidos volátiles, SV (%) y producción volumétrica de gas P (m^3 biogás/ m^3 .día) para un reactor anaerobio continuo de mezcla completa, en función del tiempo de retención hidráulico. Fuente: centro GIRO (Gestión Integral de Residuos Orgánicos).

Notar que existe un tiempo mínimo por debajo del cual el reactor no presenta actividad y que, en el caso de deyecciones ganaderas, el periodo puede ir de los 3 a los 7 días. La eliminación de la materia orgánica sigue una tendencia asintótica, con una eliminación completa a tiempo infinito, y una producción de gas por unidad de volumen de reactor con un máximo para un tiempo de retención correspondiente a una eliminación de sustrato entre el 40 y el 60%.

Por lo tanto cabe destacar que la máxima depuración no coincide con la máxima producción de gas por unidad de volumen de reactor. Este aspecto tiene una gran importancia económica ya que si se pretende un balance energético óptimo debe trabajarse con un tiempo de retención cercano al que determina la máxima producción volumétrica de gas, aunque la depuración no sea elevada.

A modo de ejemplo se dan valores indicativos de tiempo de retención usualmente más utilizados en la digestión de estiércoles a temperatura mesofílica en la tabla 8:

Materia Prima	TRH (días)
Estiércol Vacuno Líquido	20-30
Estiércol Porcino Líquido	15-25
Estiércol Aviar líquido	20-40

Tabla 4.9: TRH para algunas materias primas. Fuente: Manual de producción de Biogás, instituto de ingeniería

Rutral, I.N.T.A. Castelar

4.1.4.4 Velocidad de carga orgánica (VCO)

Es la cantidad de materia orgánica introducida al reactor por unidad de volumen y tiempo, se expresa como $\text{kg SV/m}^3\cdot\text{d}$. Indica cuántos kilogramos de sólidos volátiles (SV) o de materia orgánica seca pueden alimentarse al digestor por m^3 de volumen de trabajo por unidad de tiempo.

Se calcula como el cociente entre el caudal de SV que entran al digestor entre el volumen útil de digestión:

$$VCO = \frac{Q \cdot [SV]_0}{V_R}; \left[\frac{\text{kg SV}}{\text{m}^3 \cdot \text{d}} \right]$$

Valores bajos implican baja concentración en el influente y/o elevado tiempo de retención. El incremento en la VCO implica una reducción en la producción de gas por unidad de materia orgánica introducida (ver fig. 3.6.), debiendo encontrar un valor óptimo técnico/económico para cada instalación y residuo a tratar.

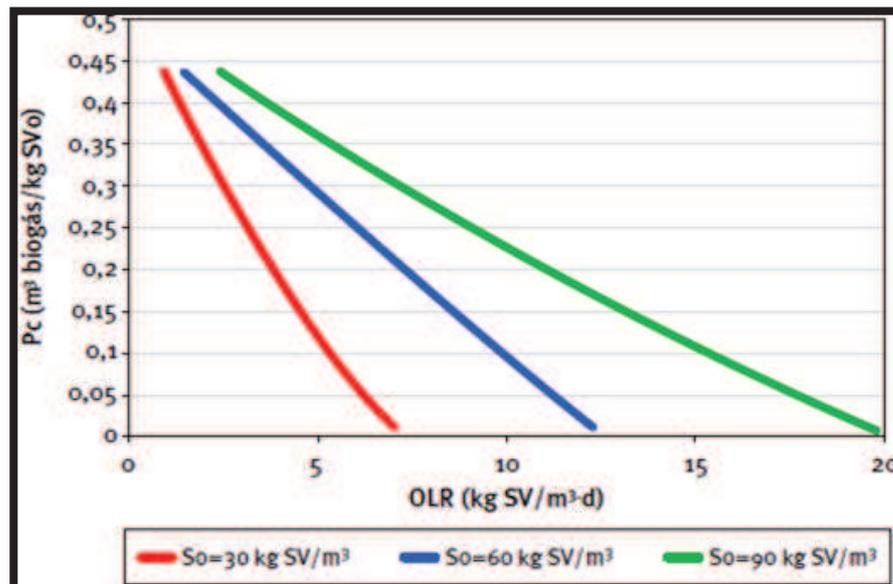


Figura 4.6: Producción de gas por unidad de carga en función de la velocidad de carga orgánica (OLR). Fuente GIRO.

Se acostumbra a trabajar con valores de carga orgánica no superiores a $3,5 - 4 \text{ kg SV/m}^3\cdot\text{d}$, ya que como se observa en el gráfico las mayores producciones de biogás se da a velocidades de carga orgánica menores. (Flotats et al., 2008)

4.3 Sustratos para la digestión anaerobia

El sustrato es el material orgánico biodegradable con el cual se alimenta al digestor para su descomposición anaeróbica. El término sustrato comprende tanto a los productos de origen vegetal como los de origen animal que se producen en cualquier proceso agroindustrial, agropecuario o agrícola.

La producción de biogás está influenciada por el tipo de sustrato, ya que estos suelen variar considerablemente en su composición o biodegradabilidad. A continuación, se describen las características a tener en cuenta en un residuo o mezcla de residuos para su valorización energética en forma de biogás:

- Sólidos totales / Humedad

Esta es la parte seca de un residuo. Se define como la cantidad de sólidos que contiene el sustrato o como la materia seca total que se alimenta diariamente al digestor. El contenido en sólidos totales (ST) de los residuos puede ser muy variable. Los residuos de origen animal, especialmente el purín porcino, tienen un contenido inferior a 10% de ST, mientras que otros superan el 20%. El porcentaje óptimo de sólidos en la mezcla a digerir en el digestor debe ser del 10-15 %.

El agua contenida en los residuos no produce biogás, sin embargo, resulta imprescindible para que el proceso fermentativo se desarrolle adecuadamente a nivel microbiológico.

En la tabla siguiente se indican los contenidos de agua y ST de varios tipos de biomasa.

Contenido de agua para diferentes sustratos		
Sustrato	Contenido de agua (%)	ST (%)
Vinazas	90-94	6-10
Cereales	12-15	58-88
Estiércol de Cerdo	85-95	5-15
Gallinaza	65-85	15-35
Forraje de Maíz	65-80	20-35
Estiércol de ganado	85-95	5-15

Tabla 4.10: Contenido de agua de diferentes sustratos. Fuente: Dimensionamiento, diseño y construcción de Biodigestores y plantas de biogás. Ing. Gabriel Moncayo Romero

- **Sólidos Volátiles / Biodegradabilidad**

La masa volátil o sólidos volátiles corresponden al volumen de masa orgánica que contiene el sustrato. Los sólidos volátiles son los componentes que se volatizan después de la incineración de la

masa seca durante 6 horas a 550 °C. Las cenizas que quedan después del secado corresponden al componente inorgánico de la masa seca.

El conocimiento de los SV es importante ya que solo este porcentaje es el contenido real de masa orgánica en el sustrato, el resto es humedad, trazas inorgánicas y otras materias que no producen biogás. Sólo el contenido de SV es el que produce el biogás durante la digestión anaeróbica en el digestor.

El porcentaje de sólidos volátiles respecto al de sólidos totales (% sb S.T.) de los residuos orgánicos agroindustriales suele variar entre el 70 – 95% sb S.T. Residuos con porcentaje inferior al 60% sb S.T. no suelen considerarse buenos sustratos para la digestión anaerobia.

- Potencial máximo de producción de biogás y producción real

Cada residuo orgánico tiene asociado un potencial máximo de producción de biogás, existiendo diferencias notables según su composición y grado de biodegradabilidad. El potencial bioquímico de metano o BMP (Biochemical Methane Potencial) es un valor que representa la cantidad máxima de producción de metano por gramo de sólidos volátiles (SV). Se obtiene experimentalmente mediante un ensayo en discontinuo (o batch) a escala de laboratorio en el que el residuo se degrada completamente en condiciones anaerobias controladas. Transcurrido el tiempo se mide el volumen de biogás producido se determina la cantidad de metano (CH₄) y de dióxido de carbono (CO₂). Este valor puede ser utilizado actualmente para diseñar y operar digestores anaerobios.

Algunos grupos de investigación europeos y constructores de plantas de biogás promueven grandes bases de datos de BMP de muchos sustratos como herramienta fundamental para el diseño y gestión de plantas de biogás. Existe una creencia generalizada, incluso en el ámbito académico, que tales bases de datos son suficientes para predecir el rendimiento de metano de cualquier sustrato bajo cualquier condición, como si el BMP fuera una propiedad definida e invariable de importancia.

A continuación, se muestra en la tabla a continuación, los BMPs de las principales fuentes de investigación europeas para los sustratos bajo análisis.

Potencial Bioquímico de metano $\left[\frac{Nm^3 CH_4}{tn SV} \right]$			
Sustrato	KTBL (Germany)	LFL (Germany)	Biowatts (Germany)
Maíz Ensilado	310–411	294–372	305–326
Purín de cerdo	336–453	240	240–273

Tabla 4.11: Comparación entre las BMP de algunos sustratos agrícolas comunes para Digestión anaeróbica, según

distintas fuentes. Fuente: Rosato, Mario Alejandro (2018)

Sin embargo, la producción real de metano o biogás de un residuo, o mezcla de residuos, a escala industrial, no sólo depende de este potencial máximo, sino también de otros factores como la temperatura, presencia de materiales no deseables y/o sustancias inhibidoras, y sobre todo, del tiempo de retención.

A escala industrial los tiempos de retención se ajustan para aprovechar los picos de producción de biogás, lo que sucede generalmente con porcentajes de eliminación de sólidos volátiles entre el 40 y el 60%. El tiempo de residencia alcanza un valor óptimo en función de criterios técnicos y económicos.

En la tabla 3.10. se indican valores clásicos de la bibliografía para purines de cerdo. En esta se aprecia el efecto negativo del nitrógeno amoniacal, sobre todo en régimen termofílico.

Referencia	Substrato	T ²	OLR	TR	NH ₄ ⁺	Pc
Hill et al., 1987	Purín de cerdo	35	3.56	10		0.30
			5.71	10		0.26
			6.86	10		0.28
			8.03	10		0.02
Van Velsen, 1979	Purín de cerdo	30	4	15	2.68	0.32
			4	15	2.75	0.33
			2.7	15	2.68	0.32
				15	2.75	0.33

Tabla 4.12: Producción de metano respecto a sólidos volátiles añadidos (P_c) en m^3 CH /kg SV, de residuos ganaderos en función de la temperatura (T^2), velocidad de carga orgánica (OLR) en kg SV/ m^3 .d, tiempo de retención (TR) en días, y nitrógeno amoniacal, en g N/L. Fuente GIRO

Una variable adicional en las deyecciones ganaderas es el tiempo de almacenaje de los purines antes de su digestión, tiempos superiores a 3 meses pueden reducir su potencial de producción en más del 70%, ya que durante el almacenaje tiene lugar un proceso de fermentación incontrolado con emisión de metano a la atmósfera.

4.3 Co-digestión anaerobia

La co-digestión anaerobia consiste en el tratamiento conjunto de dos o más sustratos de diferente origen que se complementan químicamente, aumentando la estabilidad, la producción de biogás y el equilibrio del proceso. La codigestión puede mejorar la producción de biogás cuando la

principal fuente de materia prima tiene un suministro limitado, lo que hace que la digestión de una sola materia prima sea insostenible.

También es relevante para plantas ubicadas en áreas geográficamente remotas donde el costo de transporte de la materia prima principal podría reducirse completándolo con otros tipos de materias primas disponibles localmente. Puede asegurar el funcionamiento estable durante todo el año de los digestores anaeróbicos que tratan sustratos estacionales por naturaleza o durante la rotación de cultivos. Además, la codigestión puede contribuir a la estabilidad del proceso mediante la dilución de los componentes tóxicos constituyentes contenidos en los co-sustratos.

La efectividad de la codigestión generalmente reside en la armonización de los parámetros entre las fuentes de sustratos, principalmente los macro y micronutrientes, la relación C/N, el pH, los inhibidores y compuestos tóxicos, y el contenido de humedad.

Así, la mezcla de ambos tipos de residuos da lugar a procesos más estables y con un incremento considerable en la producción de biogás.

En la siguiente tabla se recogen valores encontrados en la bibliografía para diferentes mezclas de sustratos, usando como co-sustrato base purines porcinos, se indica el coeficiente de producción de metano y el aumento en % que supone la aplicación de la codigestión.

Referencia	Composición de sustratos en la Codigestión	Producción metano (m ³ CH /kg SV) (+aumento por Codigestión en %)
Murto et Al 2004	Purín cerdo (83%)- Mezcla residuos industriales (17%)	0,56
	Purín cerdo (71%)- R. industrial (17%)- R. matadero (12%)	0,62
	Purín cerdo (66%)- R. industrial (17%)- R. matadero (12%)- R. vegetal y fruta (5%)	0,68
Amon et. Al 2006	Purín cerdo (100%)	0,22
	Purín cerdo (94%) – Glicerina (6%)	0,62 (+182%)
	Purín cerdo (54%) - Ensilaje de maíz (31%)- Maíz (15%)	0,34 (+55,5%)
	Purín cerdo (52%) - Ensilaje de maíz (29%)- Maíz (13%)- glicerina (6%)	0,44 (+100%)

Tabla 4.13: Producción de metano para la codigestión de diferentes residuos orgánicos encontrados en la bibliografía. Fuente: GIRO

Al considerar la codigestión, se deben tener en cuenta los siguientes factores:

- Disponibilidad y calidad de la materia prima
- Costo de obtener, transferir, preparar (o pretratar) y almacenar las materias primas adicionales

- Impacto en los rendimientos del proceso y la cinética de nuevas materias primas agregadas de forma continua o intermitente cuando no están disponibles durante todo el año.

4.4 Productos de la digestión anaeróbica y sus usos

4.4.1 Biogás

Es una mezcla gaseosa formada, principalmente, por metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂) y pequeñas proporciones de otros gases, como ácido sulfhídrico (H₂S), hidrógeno (H₂) y amoníaco (NH₃). La composición del biogás, depende del tipo de sustrato utilizado en el proceso de biodigestión y las condiciones de operación. En la tabla 3.13 se muestran valores medios de composición del biogás para los residuos agrícolas (Deublein y Steinhauser, 2011):

Composición de Biogás con sustratos agrícolas (Deublein y Steinhauser, 2011)			
Compuestos	Fórmula	Unidad	Valor
Metano	CH ₄	% vol	45-75
Dióxido de Carbono	CO ₂	% vol	25-55
Monóxido de Carbono	CO	% vol	< 0,2
Nitrógeno	N ₂	% vol	0,01-5,00
Oxígeno	O ₂	% vol	0,01-2,00
Hidrógeno	H ₂	% vol	0,5
Sulfuro de Hidrógeno	H ₂ S	mg N m ⁻³	10-30000
Amoníaco	NH ₃	mg N m ⁻³	0,01-2,50

Tabla 4.14 Composición del Biogas a partir de biodigestión de sustratos agrícolas. Fuente: Deublein y Steinhauser, 2011

La composición del biogás es la que determinará su poder calorífico, es decir, la cantidad de energía por unidad de masa o unidad de volumen de materia que puede desprenderse al producirse una reacción química de oxidación. El poder calorífico expresa la energía que puede liberar la unión química entre un combustible y el comburente. El principal determinante del poder calorífico del biogás es la cantidad de metano que tenga en su mezcla.

Propiedades del Biogas con sustratos agrícolas (Deublein y Steinhauser, 2011)			
Propiedades	Fórmula	Unidad	Biogás con sustratos agrícolas
Poder Calorífico Bruto	HO,N	kWh Nm – 3	5,5-8,2
Poder Calorífico Neto	HU,N	kWh Nm – 3	5,0-7,5
Densidad Normal	p	kg Nm – 3	1,16

Densidad relativa al aire	D	-	0,9
Número de metano	MZ	-	124-150
Humedad relativa	RH	%	100
Punto de rocío	ϑ_s	°C	35
Temperatura	ϑ	°C	35-60

Tabla 4.15. Propiedades del Biogás a partir de sustratos agrícolas. Fuente: Deublein y Steinhauser, 2011

Si bien en realidad los combustibles tienen siempre un mismo valor de poder calorífico, en la práctica se han definido dos valores: poder calorífico superior (PCS) y poder calorífico inferior (PCI). El PCS expresa el calor verdaderamente producido en la reacción de combustión, mientras que el PCI es el calor realmente aprovechable, sin tener en cuenta la energía de condensación del agua y otros procesos de pequeña importancia. El PCI del biogás puede variar en un rango de 4300 a 6450 kcal/Nm³ (Deublein y Steinhauser, 2011).

Depuración o acondicionamiento del biogás

Como se ha comentado anteriormente además de metano y dióxido de carbono, el biogás está formado por determinadas impurezas en pequeñas proporciones. La purificación del biogás es de crucial importancia por dos razones principales:

- para aumentar el poder calorífico del biogás y así garantizar los mejores rendimientos en los procesos de explotación de biogás, y
- cumplir los requerimientos de algunas aplicaciones de gas (motores, calderas, celdas de combustible, etc.), además de reducir el impacto de las emisiones gaseosas.

Estas impurezas y sus efectos se muestran a continuación:

Impurezas típicas del Biogás		
Componente	Contenido	Efecto
CO_2	25 – 50% by vol.	Reduce el valor calorífico Aumenta el número de metano y el antidetonante propiedades de los motores Provoca corrosión (ácido carbónico de baja concentración). Si el gas esta mojado Daña las pilas de combustible alcalinas
H_2S	0 – 0.5% by vol.	Efecto corrosivo en equipos y sistemas de tuberías. (corrosión bajo tensión); límite superior típico para motores de 0.05 por% vol.
NH_3	0 – 0.05% by vol.	Formación de óxidos de nitrógeno durante la combustión.
<i>Vapor de agua</i>	1 – 5% by vol	Provoca corrosión de equipos y sistemas de tuberías. Los condensados dañan los instrumentos y las plantas
<i>Polvo</i>	> 5 μ m	Bloquea boquillas y pilas de combustible
N_2	0 – 5% by vol.	Reduce el valor calorífico Aumenta las propiedades antidetonantes de los motores.

Tabla 4.16. Impurezas típicas del Biogás. Fuente: Deublein y Steinhauser, 2011

4.4.2 Cogeneración de Energía a partir del biogás

Por cogeneración se entiende el sistema de producción conjunta de energía eléctrica y de energía térmica útil. En los equipos de cogeneración, el gas se quema en un motor de combustión interna, que acciona un alternador, produciendo energía eléctrica. Se recupera la energía térmica del circuito de refrigeración del equipo y de los gases de escape en forma de agua caliente o vapor. Los motores de cogeneración pueden alcanzar un rendimiento energético de alrededor del 85%. Esto es debido a que este tipo de motores presentan normalmente un rendimiento eléctrico del orden del 35 y el 40%.

En el caso de los equipos de cogeneración, el biogás digerido requiere un proceso de remoción del ácido sulfúrico y del agua. En el caso de una planta de tratamiento de digestión anaerobia, una parte de la energía térmica producida por cogeneración se utiliza para la calefacción de los reactores.

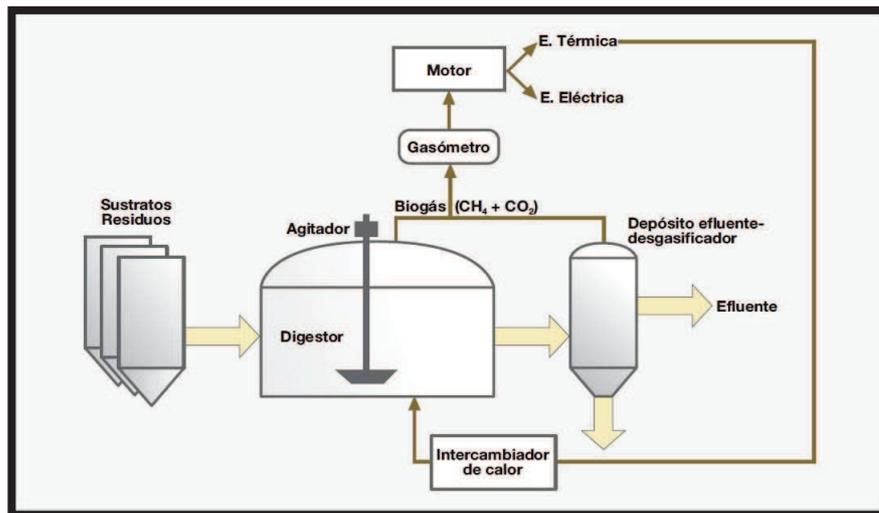


Figura 4.7: Esquema de una instalación de digestión anaeróbica con aprovechamiento del biogás en un motor de cogeneración, generando electricidad y calor. Fuente: Guía de los tratamientos de las deyecciones ganaderas.

4.4.2 Digestato

El digestato es el subproducto estabilizado semi-líquido resultante de la digestión anaerobia y tiene un uso potencial como fertilizante orgánico. El residuo orgánico que se descarga del digestor es un lodo-líquido fluido de excelentes propiedades fertilizantes, el cual está constituido por la fracción orgánica que no alcanza a degradarse y la biomasa microbiana producida. En el proceso de fermentación se remueven sólo los gases generados (CH₄, CO₂, H₂S) y se conservan en el efluente todos los nutrientes originales (N, P, K) contenidos en la materia prima, que son esenciales para las plantas.

Las características del digestato obtenido dependen del tipo de tecnología y de la materia orgánica alimentada. Además, presenta ciertas ventajas que se enumeran a continuación:

- Respecto a los residuos orgánicos antes de su digestión, los digestatos son más aptos para uso agrícola, generan menos olores, y presentan una mayor calidad higiénica.
- El digestato presenta un mayor grado de mineralización al pasar el nitrógeno y fósforo orgánico a mineral tras la fermentación. Esto lo hace asimilable a un fertilizante mineral.
- El alza en los precios de los fertilizantes agrícolas permite emplear al digestato como un recurso para disminuir los costos de producción.

En la tabla a continuación, se puede observar la composición promedio del digestato generado en un proceso de digestión anaeróbica mediante la utilización de purines porcinos y

silaje de maíz como substratos. Sin embargo, la composición varía de un sistema productivo a otro.

Parámetros	Bioabono
pH(H ₂ O 1:5)	7,9
MO (W-B) 1:5	45,0
MO (Calcinac. %)	58,0
N Total (Kjeldal %)	1,8
P Total (%)	8,4
K Total (%)	0,7
Relación C/N	25,0
N mineral (mg/kg)	30,0
C.E. (dS/m)	14,4

Tabla 4.17: Composición promedio del digestato obtenido en digestión anaeróbica con purines porcinos y silaje de maíz. Fuente: Doublein y Steinhauser, 2011

Usos del digestato

Algunas instalaciones disponen de un sistema de separación sólido-líquido que permite separar el digestato bruto en dos fracciones, una sólida y otra líquida.

Por ello, existen diferentes estrategias para la gestión y uso de los materiales; mientras que el digestato sólido es de fácil manejo y sus opciones de reciclado y características se pueden comparar con las de un estiércol sólido, la fracción líquida requiere ser almacenada para bien ser utilizada en agricultura o ser depurada para su reciclado o reutilización. En caso de depuración posterior de la fracción líquida para su utilización o vertido debe tenerse en cuenta la legislación existente en este aspecto.

En este proyecto se consideran dos posibles usos del digerido.

- Como fertilizante de suelo agrícola sin fines de comercialización. En Argentina, los parámetros y requisitos para el uso del digestato bruto como fertilizante en suelos se encuentran reguladas por la resolución 19/2019 de la Secretaría de Gobierno de Ambiente y Desarrollo.
- Como fertilizante de suelos con fines de comercialización. En cuanto a la comercialización de los mismos como producto fertilizante de valor añadido se deberá proceder de acuerdo con la ley n°20.466 y su Decreto Reglamentario 4.830/73.

4.5 Sistemas de Digestión Anaeróbica

Existen muchos procesos para tratar los diversos residuos orgánicos, los cuales dependen de las condiciones de diseño del sistema, del tipo de digester empleado y del modo de presentación de los sustratos a ser fermentados.

En general los sistemas de degradación anaerobia de residuos pueden clasificarse en función de:

- El contenido en materia seca del sustrato orgánico (*digestión húmeda o seca*).
- El régimen de operación del digester (*continuo, semi-continuo o discontinuo*).
- La temperatura de operación (*mesofílica o termofílica*)
- Numero de fases del proceso (*una o dos fases*)

Seguidamente se procede a realizar una descripción de cada uno de los sistemas y sus características principales.

4.5.1 Régimen de operación del digester

El régimen de carga o alimentación al digester determina en gran medida la disponibilidad de sustrato fresco para los microorganismos y tiene un efecto correspondiente en la generación del biogás.

✓ Biodigestores continuos

Los Biodigestores continuos operan en régimen estacionario, lo que significa que la corriente de entrada (alimento) entra de forma continua al sistema, a la vez que las corrientes de salida (efluente y biogás) son retirados. Por lo tanto, este método de alimentación mantiene un nivel constante de llenado en el digester, el cual se vacía solamente para las reparaciones. Este proceso se caracteriza por una producción continua de biogás y más alta que en los digestores discontinuos, además de proporcionar una buena utilización del espacio en el reactor. A nivel mundial, los digestores continuos son los más comunes.

✓ Biodigestores discontinuos

Los Biodigestores discontinuos operan en régimen no estacionario. La alimentación discontinua implica llenar por completo el digester con sustrato fresco e inóculo y se cierra el digester, se lleva a las condiciones óptimas de operación, se espera un cierto tiempo mientras se produce la degradación y se descarga una vez que ha finalizado la generación de biogás. Una vez vacío se vuelve a cargar con un lote fresco de material de alimentación, con la posibilidad de que una

pequeña proporción del digestato pueda quedarse para inocular el sustrato fresco. Este tipo de procesos se caracteriza por una tasa de producción de biogás variable a lo largo del tiempo.

4.5.2 Temperatura de operación.

✓ **Sistemas mesofílicos (35-40°C)**

En estos sistemas de la descomposición de la carga es más lenta que en los sistemas termofílicos, pero el consumo de energía es menor. Las plantas que operan a temperaturas mesofílicas han sido siempre las más habituales.

✓ **Sistemas termofílicos (50-70°C)**

Se caracterizan por una digestión rápida, alto rendimiento de gas y un corto tiempo de retención, tiene buenas características de desinfección. Estos sistemas son menos estables que los otros y son más difíciles de controlar, no obstante el número de sistemas de temperatura termofílicas ha aumentado significativamente en los últimos años.

4.5.3. Según el número de etapas

Como se comentó en el apartado anterior sobre las fases de la digestión anaerobia, cada una de las fases tiene unas condiciones favorables en las que llevarse a cabo. Con tal objetivo, la configuración de los sistemas de digestión anaeróbica puede ser de uno o varios digestores que operen en serie.

✓ **Sistemas de una sola etapa**

Cuando la digestión anaerobia se realiza en un solo digestor, así que las cuatro fases de la digestión anaerobia (hidrólisis, Acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis) suceden en el mismo recipiente. Dado que las condiciones óptimas de operación para cada fase son distintas, se llega a una solución de compromiso, aunque siempre favoreciendo las condiciones de la metanogénesis.

Se suele usar este sistema con residuos que tengan tiempos de retención medios-bajos (30 días aprox. o menos). Tiene la ventaja de que son sencillos en la construcción, facilidad de manejo y menores costes de operación (menos necesidad de bombeos).

✓ **Sistemas de dos etapas**

En el primer digestor se llevan a cabo las fases de hidrólisis y acidificación, mientras que en el segundo tiene lugar la metanogénesis. Con esta configuración las condiciones de operación de ambos digestores se optimizan para cada fase. Se suele usar este sistema con residuos que tengan tiempos de retención medios-altos (50 días aprox. o más).

Tiene la ventaja de poder operar en el óptimo de cada fase, pero tiene el inconveniente de que se necesita una mayor inversión y costes de operación.

4.5.4 Porcentaje de sólidos totales

La consistencia del sustrato depende de su contenido de materia seca. Ésta es la razón para que se subdivida la tecnología de digestión anaerobia en procesos de digestión húmeda y de digestión seca.

✓ **Digestión húmeda**

La digestión húmeda usa sustratos de consistencia susceptible de bombeo. En la digestión húmeda se diluye el residuo hasta una concentración máxima del 15% en ST, aunque lo habitual es que la concentración se ST esté comprendida entre 7 y 12%. La digestión húmeda en tanques cilíndricos es la norma para las plantas de recuperación de biogás de escala agrícola.

✓ **Digestión seca**

La digestión seca usa sustratos apilables. En la digestión seca se trabaja con residuos con una concentración de ST superior al 15%, siendo el intervalo frecuente del 20-40%.

4.6 Memoria Descriptiva

4.6.2 Selección y caracterización del Co-sustrato

- Silaje de Maíz

El maíz (*Zea mays*) es una planta perteneciente a la familia de las gramíneas, catalogada dentro del grupo de los cereales. El maíz es un forraje de verano que en pocos meses proporciona una elevada cantidad de materia seca, siempre que no le falte agua.

El ensilaje es un método de conservación de forrajes en el que se inhibe el crecimiento de microorganismos degradadores de la materia orgánica, preservados con ácidos, sean estos agregados o producidos en un proceso de fermentación natural, llevado a un depósito de dimensiones y forma variable denominado silo, en el que se dispone en capas uniformes eliminando el aire mediante compresión y cubriéndolo finalmente (Cañete, 1998).

- Composición

El ensilado de maíz posee un pH bajo, cercano o por debajo de 4 y los contenidos en nitrógeno amoniacal y en nitrógeno soluble deben ser inferiores al 10% y al 50% del nitrógeno total, respectivamente. La composición química del ensilado de maíz se muestra en la siguiente tabla:

Caracterización del silo de maíz				
PARÁMETROS	UNIDAD	MEDIA	MÁXIMO	MÍNIMO
Humedad	%	67	77,7	52
pH	-	3,79	4,7	3,4
Sólidos Totales	%	33,31	48,62	22,33
Sólidos Volátiles	%MS	96,59	98,38	94,39
Proteína Bruta	%MS	6,71	10	3,89
Fibra Neutra (FND)	%MS	44,14	64,73	35,69
Lignina	%MS	2,29	3,53	1,02
Celulosa	%MS	22,8	33,72	17,91
Hemicelulosa	%MS	19,05	27,48	16,76
Almidón	%MS	26,21	37,5	0
Cenizas	%MS	3,92	8,54	2,91
Nitrógeno amoniacal	%MS	0,05	0,1	0

Tabla 4.18: Composición química (% sb M.S.) del silo de maíz. Fuente: Mahanna, 1998

Desde el punto de vista nutritivo el ensilado de maíz tiene un elevado valor energético, bajo valor proteico y bajo contenido en minerales. El contenido en almidón es elevado, no siendo un forraje que aporte un alto contenido en carbohidratos estructurales.

Parámetro	Unidad	Valor
Calcio (Ca)	% MS	0,3
Fósforo (P)	% MS	0,28
Magnesio (Mg)	% MS	0,18

Tabla 4.19: Composición química del silo de maíz. Fuente: Mahanna, 1998

El potencial bioquímico de generación de metano fue tomado como el valor promedio de los obtenidos por las fuentes bibliográficas mencionadas en la tabla 4.11 y una composición de metano en el biogás del 62,8%. Los valores se observan a continuación:

Tasas específicas de generación de Biogás y Metano		
Parámetro	Unidad	Valor
Tasa específica de generación de Metano	Nm ³ CH ₄ /tn SV	0,336
Tasa específica de generación de Biogás	Nm ³ Biogás /tn SV	0,536

Tabla 4.20. Tasas específicas de generación de Biogás y Metano. Fuente: elaboración propia.

La celulosa de las plantas está presente como lignocelulosa. La fracción lignocelulosa degradable anaeróbicamente es inferior a la de celulosa pura, ello es debido a la presencia de

lignina. La biodegradabilidad de la celulosa aumenta a medida que la lignina es eliminada o modificada químicamente. Por eso, la hidrólisis de la lignocelulosa es el proceso limitante en la digestión anaerobia; ello es debido al difícil acceso de las enzimas hidrolíticas hasta las células.

La mezcla de purines de cerdo con silaje de maíz presenta una serie de ventajas respecto a la utilización únicamente de los purines. Por un lado, el elevado contenido en agua de los purines actúa como disolvente para el silaje de maíz, permitiendo obtener un %ST < 12%, el cual se mencionó, favorece las condiciones de biodigestión. Además, los purines aportan los macro y micro nutrientes necesarios para el crecimiento bacteriano.

La relación óptima de C/N del material a digerir debe estar entorno 20 y 30, que es la relación que las bacterias necesitan para crecer. Los purines de cerdo contienen una relación C/N relativamente baja (16,4), por lo tanto, el uso del silaje de maíz permite aportar el carbono orgánico necesario y ajustar la relación C/N.

4.6.3 Caracterización del sustrato mezcla

El criterio utilizado para determinar las proporciones de los sustratos en la mezcla, fue en función de que la mezcla cumpliera con los parámetros descritos en la sección 4.2 de modo que se optimizara el proceso de biodigestión por vía húmeda. La proporción de sustrato resultante fue de 85% purines de cerdo y 15% silaje de maíz.

Caracterización de la mezcla				
Parámetro	Unidad	Purines de Cerdo	Silaje de Maíz Tesis	Mezcla
Proporción	%	85	15	100
Caudales máxicos	kg/día	49.206,21	8.683,45	57.889,66
Densidad	kg/ m3	1.000	300	895
Caudales volumétrico	m3/día	49,21	28,94	78,15
Componentes de la mezcla				
pH	-	7,5	3,8	6,95
Sólidos totales (ST)	g ST kg-1	50,4	330	92,34
Sólidos Totales	%	5,04%	33,00%	9,23%
Sólidos volátiles (SV)	g SV kg-1	35,4	316,8	77,61
Sólidos Volátiles	% ST	70,24%	96,00%	74,10%
C/N	g C g-1 N	16,4	70,77	24,56
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	g NTK kg-1	5,3	21,45	7,72
Nitrógeno amoniacal total (NH4+-N)	g NH4+-N kg-1	4,4	1,65	3,99
Nitrógeno orgánico (Norg)	g Norg kg-1	0,9	19,8	3,74
Fósforo (P)	g P kg-1	1,38	9,24	2,56
Potasio (K)	g K kg-1	4,83	-	4,11
Alcalinidad Total	mg CaCO3 kg-1	16056	-	13.647,6
Generación de Biogás (62,8%CH4)				
Tasa específica de generación de Metano	m3 CH4/kg SV	0,297	0,336	0,303
Tasa específica de generación de biogás	m3 Biogás/kg SV	0,473	0,536	0,499

Tabla 4.21: Caracterización del Sustrato Mezcla. Fuente: Elaboración propia

4.6.4 Selección del sistema de Digestión Anaeróbica.

Para el caso de plantas de biogás que se alimentan de subproductos agrícolas como estiércol líquido, residuos de cosechas y cultivos energéticos, se suele seleccionar un proceso de una sola fase en el rango de temperatura mesofílica (32–42°C) con fermentación húmeda y alimentación continua. Este tipo de configuración es la que será adoptada en el proyecto y la justificación de su selección se debe a una serie de ventajas que las mismas presentan:

- Se selecciona un **régimen de operación continuo**, dado que la producción de biogás es uniforme en el tiempo y resulta mayor que en los digestores discontinuos.

- Se selecciona un **rango de temperatura mesofílico**, dado que si bien la velocidad de crecimiento y la tasa de degradación es menor respecto a un rango termofílico, el sistema resulta menos inestable, presenta menos riesgo de toxicidad e inhibición y menor consumo de potencia.
- Se realizara la digestión anaeróbica del sustrato en **una sola fase**, ya que son sistemas más sencillos en la construcción, poseen facilidad de manejo y son menores los costes de operación. Además suelen usarse con residuos que tengan tiempos de retención medios-bajos (30 días aprox. o menos), los purines porcinos tienen tiempos de entorno 15-25 días.
- Contenido en sólidos del sustrato: Puesto que el contenido en ST de nuestro sustrato es 9,23% se llevará a cabo la **digestión por vía húmeda**.

4.6.4.1 Selección del tipo de digestor

Para el presente proyecto se ha optado por seleccionar un digestor de mezcla completa (CSTR), que combina las etapas de hidrólisis y metanogénesis en un solo tanque. Los CSTR se utilizan para sustratos con bajo contenido de materia seca, por debajo del 12% de sólidos totales. Dado que el sustrato mezcla tiene 9,23% de ST, esta tecnología puede ser aplicada.

4.6.4.2 Parámetros de diseño y operación del biodigestor

Una vez definida y caracterizada la mezcla de sustratos a tratar, de haber definido el sistema de biodigestión a llevar a cabo y de haber seleccionado el modelo de digestor, se definen los parámetros de diseño adoptados para el cálculo de este.

El diseño del biodigestor requiere de la utilización de ecuaciones matemáticas que reflejen lo más fielmente posible el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de operación. En el presente proyecto se ha optado por aplicar al sistema el modelo cinético de Chen y Hashimoto, el cual ha sido profundamente utilizado para la digestión de residuos ganaderos. El modelo y las ecuaciones obtenidas al aplicar el modelo de Chen-Hashimoto al reactor continuo de mezcla completa se encuentran desarrolladas en la sección 5.3, de la memoria de cálculo. Los principales parámetros operacionales y de diseño se resumen a continuación:

Resultados – Digestión Anaeróbica			
Parámetro	Descripción	Unidad	Valor
T	Temperatura	°C	35
pH	Tiempo de retención hidráulico en el Digestor	-	6,95
$\theta_{Digestor}$	Tiempo de retención hidráulico en el Digestor	días	18
E	Eficiencia de eliminación de sustrato	% SV	79,22%
VCO	Tasa específica de generación de metano	$\frac{kg\ SV}{m^3\ día}$	3,86
Q_0	Caudal de alimentación de sustrato	$\frac{m^3}{día}$	78,15
$P_v [CH_4]$	Producción Volumétrica de metano por día	$\frac{Nm^3\ CH_4}{m^3\ día}$	0,926
$P_v [Biogás]$	Producción Volumétrica de Biogás por día	$\frac{Nm^3\ Biogás}{m^3\ día}$	1,527
$P_c [CH_4]$	Producción Específica de metano	$\frac{Nm^3\ CH_4}{kg\ SV}$	0,240
$P_c [Biogás]$	Producción Específica de metano	$\frac{Nm^3\ Biogás}{kg\ SV}$	0,396
Q_{CH_4}	Caudal de metano producido	$\frac{Nm^3\ CH_4}{día}$	1302,59
$Q_{Biogás}$	Caudal de Biogás producido	$\frac{Nm^3\ Biogás}{día}$	2148,01

Tabla 4.22: Parámetro de diseño y operación de la digestión anaeróbica. Fuente: elaboración propia.

4.6.5 Descripción de la planta de Biogás

La planta de biogás comprende todas las instalaciones y equipos que permiten el tratamiento de los efluentes porcinos y el co-sustrato seleccionado, con el objeto de la obtención de los productos descritos y la cogeneración de energía. Los procesos principales de la planta son los siguientes:

1. Recepción, descarga y homogeneización de residuos
2. Digestión anaerobia y generación de biogás
3. Purificación del biogás
4. Cogeneración de energía eléctrica y térmica
5. Almacenamiento y estabilización del digestato

A continuación se presenta el diagrama de bloques propuesto para la planta:

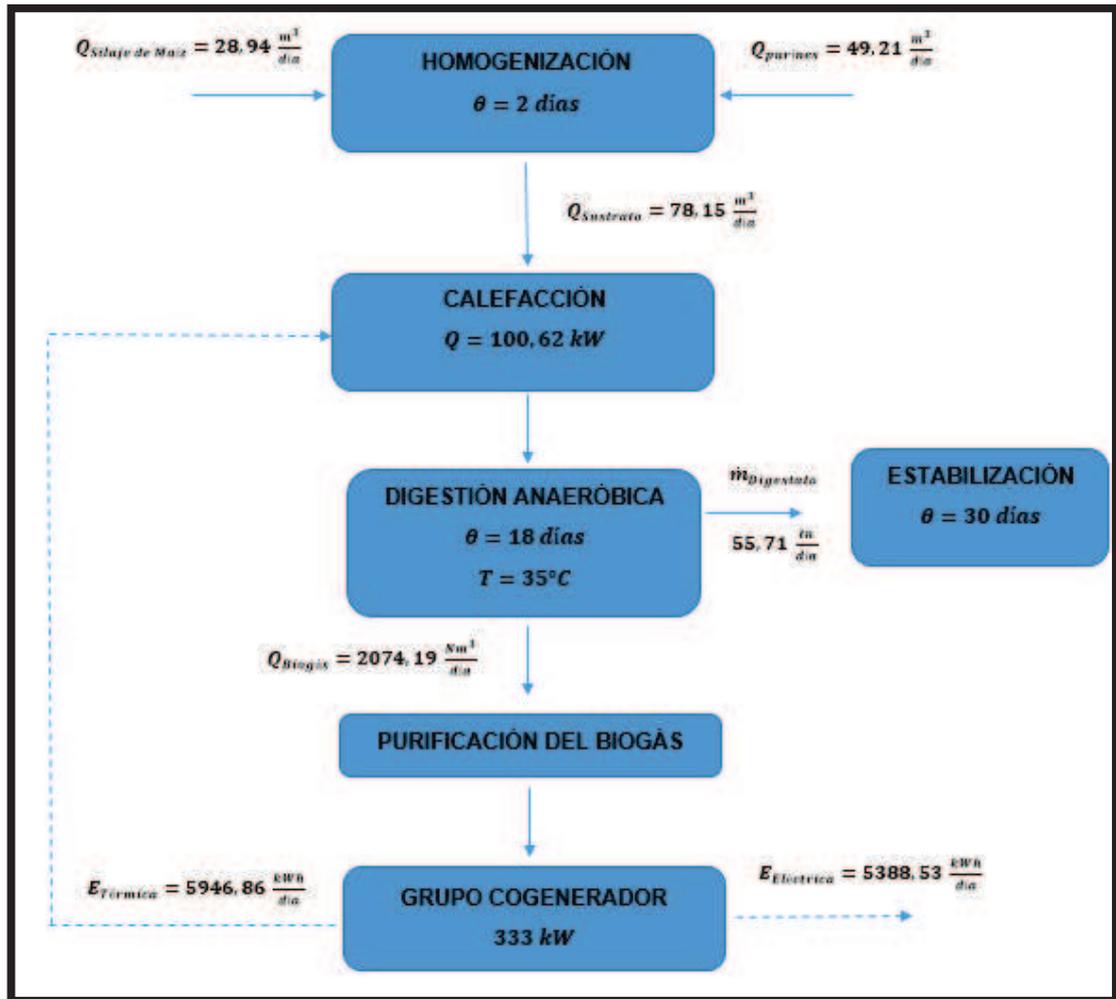


Figura 4.8: Diagrama de bloques del proceso. Fuente: elaboración propia

4.6.5.1 Recepción, descarga y homogeneización de residuos

Las materias primas de la planta de digestión anaerobia son el purín porcino procedente de la granja "Híbridos Argentinos S.A" (49,21 m³/d), y el silaje de maíz que actuará como co-sustrato (28,94 m³/d).

Los purines de cerdo son recolectados a través de un sistema de pisos enrejillados de plástico, dónde son acumulados en una fosa profunda. Los mismos serán conducidos por gravedad y bombeados hacia el tanque de homogeneización (T-01). A su vez, el silaje de maíz requerido para generar la mezcla es transportado por camiones de carga los cuales vaciarán su contenido en el tanque de homogeneización, (T-01), con capacidad suficiente para almacenar la mezcla de sustratos (78,15 m³/día) durante un periodo de 2 días. Este tanque de homogeneización está equipado con

sistema de agitación (A-01) para homogeneizar el purín procedente de las distintas granjas de la zona y mezclarlo con el silaje de maíz. A su vez, se utiliza una bomba trituradora (B-01) que asegura el tamaño mínimo de partícula para evitar obstrucciones en el sistema.

4.6.5.2 Digestión anaerobia y generación de biogás

Los sustratos ya mezclados se dirigen mediante tuberías de polietileno de alta densidad (PEAD DN 63mm) hacia el digestor donde se someten al proceso de digestión anaeróbica con el objetivo de obtener biogás para su posterior aprovechamiento energético y un digestato, parcialmente estabilizado, que presenta unas características que mejorarán la eficacia de posibles postratamientos al que podamos someterlo.

Las principales etapas que componen el proceso son las siguientes:

- **Alimentación a digestión:** los sustratos homogeneizados son impulsados desde el tanque de mezcla hacia el digestor mediante una bomba sumergible trituradora (B-01) situada en el tanque de homogenización.
- **Calentamiento del sustrato:** el aporte de energía calorífica necesario para el proceso de digestión (100,62 kW) se consigue mediante un sistema de intercambiador de calor externo (IC), en el que el fluido térmico calentado con parte de la energía térmica producida en la cogeneración, transfiere el calor a la mezcla de sustratos antes de entrar al digestor.
- **Digestión anaerobia:** se lleva a cabo en un único digestor (DA), a través del cual circula la mezcla de sustratos de forma continua, con un tiempo de retención de 18 días. En el digestor la materia orgánica fermenta a una temperatura de 35°C (rango mesófilo), el digestato se vacía por rebose al tanque de estabilización del digestato (T-03).
- **Producción de Biogás:** el digestor está equipado con una cubierta (Gasómetro) de doble membrana sintética para la acumulación del biogás generado en la fermentación (2074,19 Nm³/d).

4.6.5.3 Purificación del Biogás

El biogás almacenado en la parte superior del digestor es impulsado mediante un soplador (S-01), hacia el sistema de depuración de gases, antes de ser valorizado energéticamente en el sistema de cogeneración.

En primer lugar, el biogás pasa por un pozo de condensados o deshidratador (T-H₂O), y posteriormente se dirige al desulfurador (F-H₂S), en el que se reduce el contenido de ácido sulfhídrico presente en el biogás.

Tras su depuración, el biogás es conducido a través de una tubería de polietileno de alta densidad (DN 110 mm) hasta el motor de cogeneración, al que alimenta para su funcionamiento.

Previamente a los motores se dispone de una antorcha de seguridad para la eliminación del gas sobrante del gasómetro y el generado en el tanque de estabilización de manera controlada.

4.6.5.4 Cogeneración de energía

Una vez acondicionado el biogás se convierte en energía eléctrica y térmica dentro de la unidad compacta de cogeneración (CHP).

- **Producción eléctrica:** la energía eléctrica es generada por un motor de combustión interna de 333 kW. Una pequeña parte de la energía se utilizará para cubrir parte del consumo eléctrico de la planta (24,15kW) y la mayor parte se utilizará para su comercialización y distribución.
- **Recuperación térmica:** se recupera la energía térmica del circuito de refrigeración interno de los motores. La temperatura de salida del agua será de 80°C, que será conducida hasta el intercambiador de calor externo, donde se empleará parte de su energía térmica para el proceso de calentamiento del sustrato.

4.6.5.5 Estabilización del digestato

Una vez realizada la digestión, el efluente digerido es conducido por rebalse hacia el tanque de estabilización (T-03), dónde el mismo será conservado por un período de 30 días en condiciones de agitación (A-03) antes de ser aplicado en el suelo mediante los camiones cisterna de riego para purines porcinos.

4.6.6 Unidades y componentes de la planta de biogás

Para el dimensionado de las unidades y equipos necesarios en la planta se ha realizado una extensa búsqueda bibliográfica sobre las características constructivas, los diseños disponibles y algunas consideraciones especiales con el fin de identificar las diferentes tecnologías del biogás disponibles.

A continuación, se procede a definir las características geométricas y funcionales de los diferentes depósitos y establecer los datos básicos de los equipos que conforman las instalaciones de los diferentes procesos, en el caso que proceda se seccionará el equipo comercial que mejor se ajuste a los cálculos:

1. Área de recepción, descarga y homogeneización de materias primas

- Tanque de alimentación-homogeneización de sustratos (T-01)

- Agitador del tanque de alimentación homogeneización (A-01)
- Bomba sumergible de alimentación (B-01)

2. Área de digestión anaerobia y generación de biogás

- Intercambiador de calor externo para calentamiento de sustrato (IC)
 - Bomba del agua caliente (B-02)
- Digestor anaerobio (DA):
 - Agitador del digestor anaerobio (A-02)
- Gasómetro (GA)
 - Soplador biogás (S-B)

3. Área de purificación del biogás

- Trampa de humedad (T-H₂O)
- Filtro de H₂S (F-H₂S)
- Antorcha de seguridad

4. Área de Cogeneración

- Unidad de cogeneración (CHP)

5. Área de almacenamiento del digestato

- Tanque de almacenamiento de digestato (T-03)
 - Agitador del tanque de almacenamiento (A-03)

4.6.6.1 Tanque de alimentación - homogeneización de sustratos (T-01)

Antes de introducir los sustratos al digestor se mezclan y homogenizan en el tanque de alimentación. Se ha dimensionado este tanque para un tiempo de residencia de 2 días referido al volumen requerido para alimentar al digestor (78,15 m³/día) con el fin de tener la suficiente capacidad de almacenamiento en caso de un problema con el digestor o cualquier otro elemento de la planta. Además, se prevé un borde libre de 0,5m como factor de seguridad.

Se ha seleccionado el tanque de forma cilíndrica con el fin de que ocupe una menor superficie, con una altura para el líquido de 3,63 m y una altura total de 4,13m. Estará enterrado de manera tal que la alimentación del silaje de maíz mediante los camiones de carga se realice con facilidad por la parte superior del mismo. Se ejecutará "in situ en hormigón armado resistente a filtraciones de agua en ambiente expuesto químicamente".

Las características que se han seleccionado para este tanque se resumen a continuación:

Tanque de Homogeneización (T-01)		
Material de construcción	Hormigón armado	
Forma	Cilíndrico Parcialmente enterrado	
Cubierta	Hormigón	
Dimensiones		
Parámetro	Unidad	Valor
Vútil	m ³	156,30
hútil	m	3,63
Øalim	m	7,40
hseg	m	0,50
hreal	m	4,13
V real	m ³	177,81
εhormigón	m	0,3

Tabla 4.23: Características y dimensiones del tanque de homogeneización (T-01). Fuente: elaboración propia

El tanque de alimentación dispondrá de una entrada de sustratos en la parte superior del tanque, la cual permite abrirse en los períodos de carga, una salida de biomasa que a través de una bomba será impulsada hasta el digestor, y una descarga de arenas y/o material inorgánico que pueda haberse formado. Además, el tanque estará cubierto para evitar la entrada de aguas pluviales y la emisión de malos olores.

El piso del tanque tendrá una pendiente del 0,5% hacia la tubería de descarga de arenas. Todas estas entradas y salidas deben tener instaladas sus propias llaves de paso y sus respectivos

medidores de caudal. Es de vital importancia que todas estas válvulas y llaves sean de excelente calidad y no de metales dulces como el cobre o bronce que podrían generar serios problemas de corrosión.

Agitador del tanque de homogenización

Para realizar la mezcla de los sustratos en el tanque de homogeneización se instalará un sistema de agitación. La potencia necesaria para la mezcla de los residuos será de 0,00475 – 0,00788 kW/m³ de fluido a mezclar (Metcalf&Eddy). Por lo tanto, necesitaremos una potencia de agitación de 1,23 kW.

El fluido a agitar presenta una viscosidad y densidad similar al agua. Para este tipo de fluidos la bibliografía nos recomienda el uso de agitadores tipo turbina o hélice. Se seleccionaron dos agitadores tipo hélice de la marca Xylem modelo Flygt 4220 de 1,1 kW particularmente diseñado para la mezcla de purines ganaderos en procesos de biodigestión para realizar la mezcla y homogenización del sustrato.

4.6.6.2 Intercambiador de calor

En los procesos de digestión anaerobia una de las variables que influyen enormemente en la producción de biogás es la temperatura. El sustrato debe calentarse para lograr la temperatura necesaria de proceso (35°C) y además compensar las pérdidas de calor producidas a través de las paredes y la cubierta del digestor. El dimensionado y selección del intercambiador de calor comercial está desarrollado en la sección 5.6 de la memoria de cálculo.

Selección del sistema de calefacción e intercambiador de calor:

En el presente proyecto se ha optado por instalar un sistema de calefacción externo, es decir, antes de la entrada al digestor anaerobio se realiza el calentamiento del sustrato en un intercambiador de calor situado en el exterior del digestor. Los motivos de haber seleccionado este sistema de calefacción es que es un sistema simple en cuanto a limpieza y mantenimiento se refiere.

De los diferentes modelos de intercambiadores de calor empleados en plantas de biogás (doble tubo, carcasa tubo, placas o espirales) se ha seleccionado un **intercambiador de calor de doble tubo en flujo a contracorriente** ya que son adecuados para servicios con corrientes de alto ensuciamiento, con lodos sedimentables o sólidos, por la facilidad con la que se limpian. Las ventajas de este tipo de intercambiadores son las siguientes:

- Son flexibles, fáciles de armar y mantener.

- La cantidad de superficie útil de intercambio es fácil de modificar para adaptar el intercambiador a cambios en las condiciones de operación, simplemente conectando más horquilla o anulándolas.
- No requieren mano de obra especializado para el armado y mantenimiento.
- Los repuestos son fácilmente intercambiables y obtenibles en corto tiempo.

Asignación general de los flujos:

El sustrato (fluido frío) circulará por el tubo interior del intercambiador para facilitar la limpieza y el agua de refrigeración del motor-generator (fluido caliente) circula a contracorriente por el espacio anular de los dos tubos. Se ha seleccionado esta disposición debido a que si el sustrato circulará por el espacio anular corroería ambos tubos.

El caudal másico del fluido frío, corresponde al caudal de alimentación de la planta en unidades de Kg/s. El caudal másico del fluido caliente está impuesto por diseño del motor-generator.

Velocidad de transferencia de calor “Q”

Las necesidades de calor para el proceso vienen dadas por la cantidad de calor necesario para:

- Aumentar la temperatura del sustrato alimentado hasta la temperatura de proceso (35°C). Se ha considerado la situación más desfavorable en la que la temperatura exterior es 10,85 °C, que es la temperatura media mínima en invierno de la zona. (91,15 kW)
- Y compensar las pérdidas de calor que se producen a través de las paredes, fondo y cubierta del digestor. (9,48 kW)

El calor intercambiado entre los dos fluidos $Q = 100,62 \text{ kW}$, corresponde al calor necesario para elevar la temperatura del sustrato desde su temperatura de entrada (C) hasta la temperatura de operación del reactor (35°C) más el calor necesario para compensar las pérdidas que se producen en el digestor.

Parámetros de operación – Intercambiador de Calor		
Parámetro	Fluido frío (sustrato)	Fluido caliente
m (kg/s)	0,903	4,401
T _{ent} (°C)	10,85	80
T _{sal} (°C)	35	79,99
\bar{T} (°C)	22,93	80,00
C _{p medio} (J/kg·°C)	4178	4192,83
δ_{media} (kg/m ³)	998,7	971,90
Q _{calculado} (kW)	100,62	100,62

Tabla 4.24: Resumen de los principales parámetros de operación para el fluido frío y el fluido caliente en el intercambiador de calor. Fuente: elaboración propia.

Se ha seleccionado un intercambiador tubular con flujo en contracorriente. El sustrato (fluido frío) circula por el interior del intercambiador para facilitar la limpieza y el agua de refrigeración del motor-generator (fluido caliente) circula a contracorriente por el espacio anular de los dos tubos.

El coeficiente global de transferencia de calor obtenido para el sistema es de 920,83 W/m²·°C. La superficie de intercambio necesaria para la transferencia del calor es de 2,38m², que se consigue mediante el uso de 7 horquillas interconectadas, de longitud efectiva igual a 21 m. La longitud de los tubos que forman cada horquilla es de 3 m. Se ha seleccionado el modelo DTR 168/129 de la marca HRS-Heat Exchangers diseñado para aplicaciones industriales y medioambientales.

4.6.6.3 Digestor Anaeróbico

Una vez el sustrato está homogeneizado y calentado hasta la temperatura de operación (35 °C) es introducido al digestor por la parte superior del mismo. En términos generales, los digestores consisten en un tanque de digestión como tal, térmicamente aislado, además de un sistema de mezclado y sistemas de descarga para los sedimentos y el digestato.

El dimensionado del digestor anaerobio está desarrollado en la memoria de cálculo dónde se hace referencia a los diferentes materiales de construcción empleados, se especifica el método para la extracción del digestato y el sistema de agitación elegido.

El tanque del digestor será cilíndrico y estará situado sobre tierra. Se ha dimensionado con un volumen que corresponda con el tiempo de retención de diseño (18 días) y un espacio vacío suficiente para acumular las espumas que se producen y que estas no pasen al circuito de gas. Por lo tanto, el volumen total del digestor, 1758,40 m³, comprende el volumen útil de digestión y un % de seguridad (borde libre), el equivalente a un 25 % del volumen útil calculado.

Los digestores industriales para purines suelen tener diámetros de 16 a 30 m, con una altura del tanque, por lo general, comprendida entre los 6 y 9 m. Se ha seleccionado un diámetro de 16 m, que nos facilitará la selección de la cubierta comercial, y a partir de este se ha calculado la altura del tanque, 8,75 m.

El digestor dispondrá de una entrada de la mezcla a digerir a través de la pared del digestor, a una altura aproximada de 8,60m. La descarga de la mezcla ya digerida se realiza mediante rebose, se instalará una tubería que pueda descargar al tanque de digestato por la parte superior y una tubería media que servirá para recircular el digestato hacia el tanque de alimentación si fuera necesario. Además, deberá tener una descarga de lodos en el fondo del digestor. Todas estas entradas y salidas deben tener instaladas sus propias llaves de paso y sus respectivos medidores de caudal.

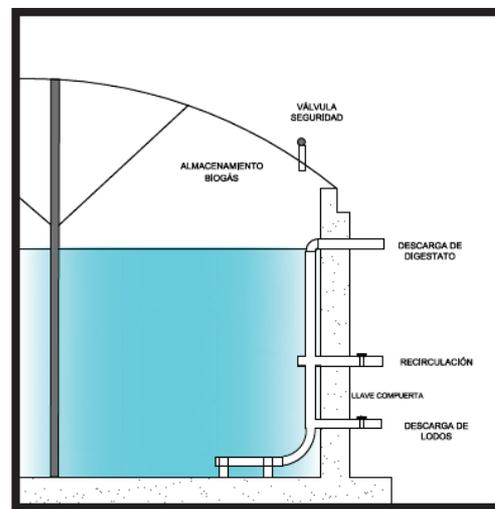


Figura 4.9: Descarga del digestato en el digestor anaeróbico. Fuente: Guía para el instalador

El digestor que se propone funciona de forma continua, es decir, se alimenta continuamente y no suele ser vaciado a lo largo de su vida útil. El equilibrio hidráulico viene determinado, por tanto, por la alimentación al digestor y la colocación de las tuberías de entrada y salida del mismo.

Al introducir la mezcla, está continuamente ir desplazando el volumen líquido existente en el interior del digestor, rebosando por la salida la misma cantidad de mezcla ya digerida. Para asegurar dicho equilibrio hidráulico es necesario fijar la altura a la que estará colocada la tubería de salida de la mezcla digerida, ya que será la boca de salida de esta conexión la que determine el nivel del líquido existente en el digestor. Por lo tanto, el rebase de la conexión de salida deberá coincidir con la altura del líquido en el digestor, es decir a 7 m.

Se construirá "in situ", y será de hormigón armado resistente a filtraciones de agua en ambiente expuesto químicamente (Hormigón C35/45 (HA-35)). La solera tendrá una pendiente del 4%. El hormigón contará con recubrimiento protector a base de pintura con base epoxi en zona de contacto con el gas (pared interior del contenedor).

Además, el digestor requiere de aislamiento térmico para reducir las pérdidas de calor por el mismo, por lo tanto, contará con un aislante térmico en los muros de 10 cm de poliuretano expandido y un revestimiento con una lámina trapezoidal de un metal galvanizado de 40 mm de espesor que protegerá a el material de aislamiento de los efectos del clima.

El digestor estará cubierto por láminas plásticas para almacenar el biogás en el digestor (gasómetro). Las características que se han seleccionado para el digestor se resumen a continuación:

Digestor Anaeróbico (DA)		
Material de construcción	Hormigón armado	
Forma	Cilíndrico sobre tierra	
Cubierta	Doble membrana plástica	
Dimensiones		
Parámetro	Unidad	Valor
Vútil	m ³	1406,72
hútil	m	7,00
Ødig	m	16
fseg	-	1,25
VBr	m ³	1758,40
hreal	m	8,75
εhormigón	m	0,3
εpoliuretano	m	0,1

Tabla 4.24: Características y dimensiones del digestor anaeróbico (DA). Fuente: elaboración propia.

Sistemas de agitación en digestores (A-02)

Para la homogenización del sustrato en el digestor de mezcla completa debe incluirse un sistema de agitación al digestor. Los principales objetivos que tiene la agitación son:

- Poner en contacto el sustrato fresco de la alimentación con la población microbiana y a la vez que exista una densidad uniforme de las mismas.
- Para la distribución uniforme de calor y nutrientes dentro del digestor.

- Ayudar con la extracción de las burbujas de biogás producidas por las bacterias metanogénicas
- Evitar la formación de costras, espumas y la sedimentación en el interior del digestor.
- Disminución en la formación de espacios muertos que reducen el volumen efectivo del digestor.

El mezclado puede ser mecánico por medio de sistemas como los agitadores dentro del reactor, hidráulico por bombas colocadas cerca y fuera del digestor o neumático soplando biogás dentro del tanque. En este proyecto se seleccionó un sistema de agitación mecánico dado que son los más habituales en las plantas de biodigestión y presenta mayor facilidad en su operación y control.

Selección agitador comercial

Para el digestor se ha optado por un sistema de agitación mecánica vertical con motor sumergible ya que son los más ampliamente utilizados en plantas de biogás agrícolas.

La potencia de los equipos necesaria se ha calculado mediante el uso del valor medio recomendado, en nuestro caso **se ha calculado una potencia de agitación de 11,08 kW**. Se ha optado por disponer al digestor de **cuatro agitadores** entre los cuales se repartirá la potencia necesaria, de este modo obtendremos una agitación homogénea a lo largo del mismo.

En concreto se han seleccionado agitadores de la marca Flyght, que dentro de su línea de productos para plantas de biogás, ofrecen agitadores sumergibles de baja y rápida velocidad que proporcionan un uso eficiente de la energía y una agitación homogénea. Tras una consulta con los representantes de la empresa, recomendaron el uso del modelo Flyght 4460 Biogas Mixer los cuales funcionan a bajas velocidades para un empuje máximo con un consumo de energía mínimo. Otra particularidad es que este modelo permite el ajuste de su profundidad y el ángulo, ofreciendo así una configuración más flexible para optimizar la producción de biogás y evitar perturbaciones en el proceso.

A continuación se presentan las características principales de los agitadores seleccionados:

Características Técnicas - Flygt 4220		
Máxima velocidad	rpm	800
Potencia Nominal	kW	1,1
Voltaje	V	380/480
Empuje máximo	N	510
Eficiencia max	N/kW	530
Diámetro de la hélice	mm	370

Tabla 4.25: Características técnicas - Flygt 4220. Fuente: elaboración propia.



Imagen 4.1: Agitador Flight 4220. Fuente: Flight

Este modelo de agitadores se instala mediante un sistema particular denominado “BIS-1 Biogas Support System”. Este sistema permite:

- Mover el agitador a diferentes alturas sin abrir el digestor ni interrumpir el proceso.
- Girar la hélice +/- 45 grados en el plano horizontal
- Remover el mezclador fuera del digestor sin vaciar el tanque



Imagen 4.2: Soporte para agitadores de la marca Flygt. Fuente: Flygt.

4.6.6.4 Gasómetro (GA)

El biogás producido en el reactor anaerobio ($86,42 \text{ Nm}^3/\text{h}$), es consumido inmediatamente por el motor, por lo que la instalación no necesita un gran depósito para el almacenamiento del biogás. En el presente proyecto se ha optado por seleccionar un gasómetro integrado en la cubierta del digestor, ahorrando así en temas de espacio. En concreto se ha elegido una cubierta del tipo doble membrana.

El gasómetro de doble membrana está montado sobre el digestor y está compuesto por una membrana exterior encargada de darle forma y por una membrana interior, que cumple con la función de cerrar herméticamente el fermentador. Un soplante de aire de apoyo en funcionamiento continuo transporta el aire en los espacios vacíos manteniendo así la presión constante independientemente de la producción y la demanda del biogás. La presión en los espacios vacíos cumple con la función de conservar la forma de la membrana exterior garantizando así que el gasómetro sea resistente a todo tipo de carga externa.

En la siguiente imagen se puede apreciar una imagen de los gasómetros de doble membrana ofrecidos por la marca alemana SATTLER:

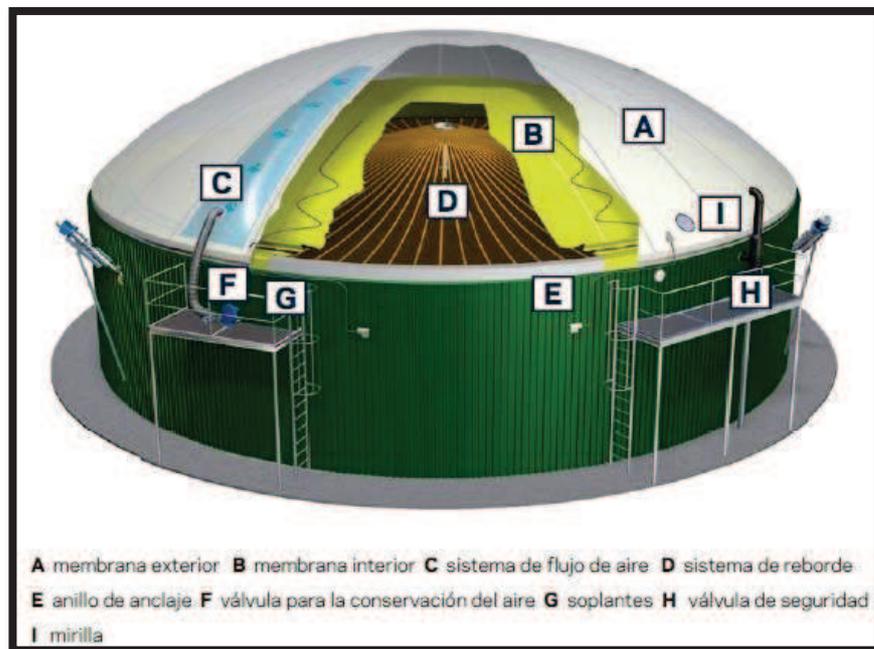


Figura 4.10: Esquema de los gasómetros de doble membrana plástica. Fuente: SATTLER

Ambas membranas se encuentran ancladas con rieles a la pared exterior del depósito de hormigón. Una subconstrucción impide que la membrana se sumerja en el interior del sustrato y que sea dañada por el sistema de mezclado. Las válvulas de seguridad protegen al gasómetro para que no se vea expuesto ni a sobrepresión ni a depresión.



Figura 4.11: Soporte de la membrana interna (izquierda). Membrana exterior (derecha). Fuente: SATTLER

En el caso de los digestores de membrana se debe prever como mínimo un volumen de almacenamiento que cubra la producción de biogás de por lo menos 4 a 6 horas. Se ha dimensionado el gasómetro para que almacene el gas generado en 5h que corresponde a 601,49 m³.

Dentro de las variantes de diseño, se ha seleccionado la cubierta de doble membrana SATTLER DMGS TM, de forma semiesférica, en función del diámetro del digestor (16 m). Las características del gasómetro quedan resumidas en la siguiente tabla:

Gasómetro (G)		
Material	EPDM	
Modelo	SATTLER DMGS TM	
Forma	Semi Esfera	
Dimensiones		
Parámetro	Unidad	Valor
Vbiogás	m ³	601,49
Øalim	m	16
Vol efectivo	m ³	1130
Presión Máx	mbar	20
Altura de los depósitos	m	8
Autonomía	hs	9,39

Tabla 4.26: Características y dimensiones del Gasómetro (G). Fuente: elaboración propia.

Como se observa la capacidad efectiva es algo mayor a la que se dimensionó, por lo tanto, puede cubrir perfectamente nuestras necesidades. En concreto la autonomía del gasómetro será de unas 8 horas aproximadamente.

4.6.6.5 Purificación del biogás – Filtro de H₂S

El biogás obtenido en el digestor posee un contenido en ácido sulfhídrico lo suficientemente bajo como para cumplir las necesidades del motor, pero para evitar problemas de corrosión en el

sistema se ha seleccionado un sistema simple de tratamiento para la eliminación de este. En el presente proyecto se ha escogido un método fisicoquímico para eliminar el ácido sulfhídrico, la adsorción en óxidos metálicos.

Existen numerosas ventajas en el uso de métodos de adsorción para purificar gases:

- Gran estabilidad térmica
- Proporciona un servicio prolongado
- Para su ejecución se emplea un simple equipamiento
- Bajo coste de inversión
- Fácil operación del sistema de purificación
- Elevada selectividad en la eliminación del sulfuro de hidrógeno.

Este método, sin embargo, requiere la utilización de grandes volúmenes de material granulado para purificar grandes flujos de gases. En este caso, por el tamaño de la instalación y el caudal y composición estimados de biogás, se considera apropiada y suficiente la utilización de este método.

Además, es importante evitar la condensación del agua sobre el sólido puesto que se reduciría la superficie reactiva, por lo que el biogás no debe estar saturado de agua. Debido a esto, antes del filtro de H₂S irá instalada una trampa de humedad.

El dimensionado del filtro de H₂S y de la trampa de humedad está desarrollado en la memoria de cálculo.

Columna de adsorción de H₂S (F-H₂S)

La columna de adsorción está diseñada para adsorber el ácido sulfhídrico gaseoso del biogás que sale de la cubierta del reactor anaerobio. La desulfuración se efectúa haciendo pasar al biogás, por una columna previamente cargada con reactivos a base de compuestos férricos, en forma de materiales sólidos granulados de gran superficie específica, que se disponen en un lecho sólido.

La instalación necesaria para realizar la desulfuración es un recipiente cilíndrico y hermético (Filtro de H₂S) de acero inoxidable, provisto de una tapa para el reemplazo del material adsorbente y una válvula de drenado en el fondo, para eliminar condensados que pudieran generarse. El gas ingresa al lecho por la parte superior, generando una zona de reacción que va desplazándose hacia la parte inferior a medida que el reactivo se va agotando, y sale del reactor por la parte inferior.



Imagen 4.3: Filtro de H₂S de acero inoxidable. Fuente: Romero, Gabriel Moncayo; “Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de Biogás”, 2020.

Es posible la regeneración del material adsorbente aunque esta debe ser controlada, ya que es un proceso exotérmico. Normalmente se trabaja con dos lechos, uno en operación y el otro regenerándose. En el presente proyecto se ha optado por instalar un solo filtro, ya que la cubierta del digestor tiene una capacidad de almacenamiento de biogás de unas 8 h aproximadamente de producción, tiempo suficiente para proceder al recambio del lecho.

✓ **Cantidad de H₂S a eliminar:**

La cantidad de ácido sulfhídrico a eliminar se ha calculado a partir de la composición máxima típica del mismo en el biogás (600 ppm), y del caudal de biogás en las condiciones de operación (172 m³/h, 35 °C). Se ha obtenido un caudal másico (mediante la densidad del sulfhídrico) de **109,9 g H₂S/h**.

✓ **Consumo de óxido férrico:**

Se ha calculado el consumo de óxido férrico estequiométricamente (159,7 g Fe₂O₃ /102 g H₂S) y se ha aplicado un factor de seguridad N= 1,5, por tanto la cantidad de óxido de hierro necesaria para el proceso será de **256,9 g Fe₂O₃/h**.

✓ **Volumen y dimensiones del filtro:**

Se ha dimensionado el filtro para **una operación de 120 días**, es decir, se procederá al recambio del material adsorbente cada 4 meses aprox. Por lo tanto, la columna contendrá **739,2 kg Fe₂O₃**.

Se ha seleccionado un adsorbente comercial con las siguientes propiedades:

Propiedades físicas de las partículas de Fe ₂ O ₃		
Diámetro del cilindro	mm	4
Longitud del cilindro	mm	10
Cantidad de óxido férrico	kg	419,44
Densidad de partículas	kg/m ³	1370
Densidad a granel	kg/m ³	850

Tabla 4.27: Propiedades físicas de las partículas de Óxido Férrico. Fuente: Romero

En base a la densidad de las partículas en el lecho, se ha calculado el volumen del lecho sólido obteniéndose un valor de 0,87 m³.

Respecto a la velocidad superficial del biogás en el lecho, la bibliografía recomienda, que ésta debe estar comprendida entre 5 y 50 cm/s. Se ha seleccionado una velocidad superficial de diseño recomendada de 0,1 m/s para asegurar un tiempo de contacto suficiente entre la fase gaseosa y la sólida.

Bajo estas restricciones se ha dimensionado el filtro como un recipiente cilíndrico de acero inoxidable. La longitud total del recipiente vertical incluye un espacio adicional debajo del lecho sólido, para el soporte del lecho y por encima y debajo del lecho para distribución y desconexión de la corriente de gas y para acceso físico al lecho.

A continuación, se presenta una tabla que resume las características básicas del equipo de adsorción de ácido sulfhídrico en el biogás:

Filtro de H ₂ S (F H ₂ S)		
Material de construcción	Acero Inoxidable	
Forma	Cilíndrico sobre tierra con soportes	
Cubierta	Acero Inoxidable	
Parámetros de operación		
Parámetro	Unidad	Valor
Q _{biogas-35°C}	m ³ /h	97,50
v	m/s	0,1
Concentración H ₂ S	mg/l	600,00

Tiempo de operación	días	120,00
Cantidad de óxido férrico	kg	419,44
Dimensiones		
Volumen	m ³	0,49
Diámetro	m	0,59
Altura util	m	1,82
Altura real	m	2,33

Tabla 4.28: Dimensiones y parámetros de operación del filtro de H₂S. Fuente: elaboración propia.

4.6.6 Purificación del Biogás - Trampa de humedad (T-H₂O)

En las trampas de humedad la condensación del agua tiene lugar por la expansión del gas, la cual ocasiona una disminución de la temperatura del mismo y la consiguiente condensación del agua que es recogida y retirada por la parte inferior del dispositivo.

Para lograr este propósito será suficiente instalar sobre la línea un accesorio idéntico a las trampas de sulfhídrico, con la diferencia de que no necesitarán relleno de hierro. Las trampas están provistas de un grifo de purga por donde se debe evacuar periódicamente el agua depositada en el fondo un medidor de nivel para comprobar el nivel de llenado en la trampa.

✓ Agua en el biogás:

El contenido en agua del biogás se ha obtenido teniendo en cuenta el porcentaje de humedad absorbido (aproximándolo al del aire saturado a 35°C), la temperatura y la producción de biogás obtenida. El mismo resultó de 909,10 kg H₂O por día.

Se utilizará una trampa de humedad modelo CP01 fabricado por “AquaLimpia Engineering”. La entrada y salida del biogás se colocan en la parte superior del tanque. La descarga se realiza a través de un sifón en forma automática cuando el nivel de condensado en el tanque sobrepasa el nivel de salida de la tubería del sifón. A continuación se muestra las características técnicas del mismo.

Especificaciones técnicas – Trampa de Humedad				
Modelo	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Q biogás (Nm ³ /h)	Material
CP01	300	800	<200	Acero inoxidable

Tabla 4.29: Especificaciones técnicas de la trampa de humedad seleccionada. Fuente: elaboración propia.



Imagen 4.4: Trampa de Humedad CP01. Fuente: AquaLimpia.

En el fondo del tanque se prevé una llave de cierre para vaciar el tanque y realizar tareas de limpieza.

4.6.6.7 Unidad de cogeneración (CHP)

En el presente proyecto el biogás generado es aprovechado energéticamente en una unidad de cogeneración CHP (generación simultánea de calor y electricidad).

En casi todos los casos, esto significa utilizar unidades de CHP en paquetes pequeños, donde el biogás se quema en un motor de combustión interna acoplado a un generador. Además de estos elementos un módulo CHP consiste en sistemas de intercambio de calor para la recuperación de energía térmica de los gases de escape, circuitos de aceite de lubricación, sistemas hidráulicos para la distribución del calor y conmutación eléctrica, así como un equipo de control para la distribución de la potencia y el control de la unidad CHP.

Para el cálculo de la potencia eléctrica a instalar en el equipo de cogeneración se ha estimado la potencia eléctrica a generar, a continuación se presenta una tabla resumen con los resultados:

Resultados del Generador			
Parámetro	Descripción	Unidades	Valor
$E_{Biogás}$	Energía Primaria en el Biogás	Kwh/d	12984,41
$P_{Biogás}$	Potencia Primaria en el Biogás	KW	541,02
$E_{Eléctrica-día}$	Energía eléctrica generada por día	Kwh/día	5388,53
$E_{Térmica-día}$	Energía térmica generada por día	Kwh/día	5946,86
$E_{Eléctrica-año}$	Energía eléctrica generada por año	Mwh/año	1841,08
$E_{Térmica-año}$	Energía térmica generada por año	Mwh/año	2031,84
$P_{Eléctrica a instalar}$	Potencia Eléctrica a instalar CHP	KW	269,43
$P_{Térmica a instalar}$	Potencia Térmica a instalar CHP	KW	297,34

Tabla 4.30: Resultados obtenidos en los cálculos del grupo cogenerador. Fuente: elaboración propia.

Selección del grupo de cogeneración

Se ha seleccionado el modelo M08 CHP B333 del fabricante R. Shmitt Enertec. A continuación, se exponen sus principales características técnicas los parámetros calculados y las verificaciones realizadas:

Especificaciones Técnicas		
Fabricante	-	R Shmitt Enertec
Modelo ENERGIN	-	M08 CHP B333
Potencia Eléctrica	kW	333
Potencia Térmica	kW	367
Consumo de combustible	kW	802
Consumo Propio	kW	5,6
Eficiencia eléctrica	%	41,5
Eficiencia térmica	%	45,8
Eficiencia global	%	87,3

Tabla 4.31: Especificaciones técnicas del grupo de cogeneración seleccionado. Fuente: elaboración propia.

4.6.6.8. Tanque de almacenamiento y estabilización del digestato (T-03)

En este tanque se almacena los sustratos digeridos que se extraen de la parte superior del digestor. El volumen del tanque dependerá por tanto, del volumen del afluente al digestor y del aprovechamiento que se le pueda dar al digestato.

Como no se ha analizado el uso que se le dará al digestato se dimensionara este tanque para que permita acumular los purines varios días o semanas, durante las épocas del año en que no es

aconsejable su aplicación agrícola, como por ejemplo épocas de lluvia o cuando no exista demanda de nutrientes. Según lo establecido por los Códigos de Buenas Prácticas Agrarias sobre el almacenamiento de estiércoles, podríamos sugerir que para los digestatos, el volumen de almacenaje deberá ser suficiente para mantenerlo entre 1 y 4 meses antes de su distribución.

Se ha seleccionado un tiempo de retención de 30 días, y además no se ha considerado para el cálculo del volumen del tanque la reducción de los volúmenes diarios de carga, obteniéndose un volumen aproximado del tanque de 2344,53 m³ aprox.

El tanque de descarga será circular y estará situado semienterrado sobre tierra para posibilitar el transporte del digerido desde el digestor al tanque por rebose. Se ejecutará "in situ" en hormigón armado. Debe estar impermeabilizado por una lámina de plástico o cualquier otro sistema que garantice el sellado y la impermeabilización total del tanque.

Además, para preservar el valor fertilizante del digestato, el tanque estará cubierto, así se evita la entrada de agua de lluvia y la volatilización del amoníaco. La cubierta será de hormigón armado. La misma contendrá una boca superior para permitir el acceso de las mangueras de succión de los camiones cisterna para su aplicación al suelo.

Los camiones cisterna utilizados para la extracción del digestato y el riego corresponden a dos unidades que ya contaba el establecimiento de estiercoleras modelos VWF 22000 Acero inoxidable del año 2018 de la marca Fliegl, la cual cuenta con una capacidad de 22000 litros de almacenamiento.



Imagen 4.5: Estiercolera abonador de purines Fliegl VFW 22000 utilizado en la granja Híbridos Argentinos S.A.

Fuente: Fliegl

Las características que se han seleccionado para este tanque se resumen a continuación:

Tanque de estabilización (T-03)		
Material de construcción	Hormigon armado	
Forma	Cilíndrico sobre tierra-Parcialmente enterrado	
Cubierta	Hormigón armado	
Dimensiones		
Parámetro	Unidad	Valor
Vútil- Estab	m ³	2344,53
hútil	m	8,27
Øestab	m	19,00
fseg	-	1,10
hreal	m	9,10
VEstab	m ³	2578,98
Ehormigón	m	0,30

Tabla 4.32: Características y dimensiones del tanque de estabilización (T-02). Fuente: elaboración propia.

4.6.6.9 Elementos de seguridad de la planta

Ante la posibilidad de que alguno de los sistemas de control fallase y no permitiera al operario reaccionar frente algún problema en el proceso, se debe aprovisionar la planta con algunos sistemas de seguridad.

- Válvula de seguridad y arresta llamas del gasómetro

Por razones de seguridad los tanques de almacenamiento de gas tienen que estar dotados de válvulas de alivio para la presión exigida y para la presión negativa, de modo que se impidan cambios severos de presión no permitidos dentro del gasómetro.

Si en algún momento se produjese un aumento de la presión del biogás en el gasómetro que pudiera producir algún defecto en el mismo, la válvula de seguridad abrirá el circuito de forma automática cuando llegue a una presión de consigna (20 mbar).

Los arrestallamas son dispositivos mecánicos pasivos instalados en la boquilla de un tanque de almacenamiento o en un sistema de tuberías de vapor inflamable. Las funciones de los arrestallamas son:

- Permitir el paso del vapor en condiciones normales de operación.
- Detener y extinguir cualquier frente de llamas que se propague a través de la mezcla de vapor/aire inflamables en condiciones de emergencia.

Al detener las llamas, se protege el tanque de almacenamiento o el equipo ubicado en el sistema de tuberías de los daños catastróficos que puede provocar una ignición no controlada. Hay varios diseños de arrestallamas disponibles. La elección del arrestallamas apropiado depende de factores tales como la ubicación con respecto a la fuente de ignición y las propiedades inflamables de la mezcla de vapor/aire.

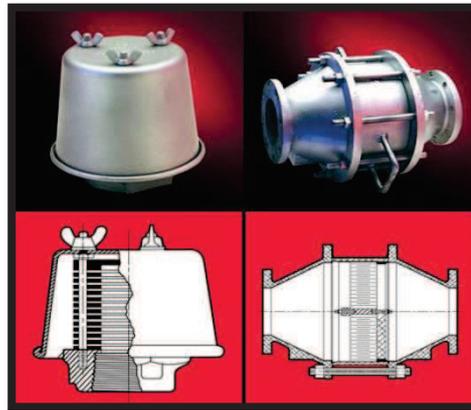


Figura 4.12: Válvulas de alivio. Fuente: GIRO

Para tal fin se ha seleccionado una válvula de alivio de vacío y presión con arrestallamas incluido de la marca Varec Biogás modelo 5810B. Están diseñadas para la instalación en cubierta de digestores anaerobios de baja presión.

La válvula de alivio protege la cubierta de presión y vacío excesivo dentro del tanque. La válvula parallamas protege al gasómetro de accidentes por ignición de gas, está diseñada para detener la propagación de la llama de fuentes externas.



Figura 4.13: Válvula combinada de alivio de presión y apaga llamas marca VAREC BIOGAS. Fuente: Varec.

Antorcha de seguridad

La instalación de un quemador de biogás tiene como objetivo la seguridad del sistema, la reducción del impacto ambiental y de malos olores. Aunque se cuente con sistemas para el uso del biogás, siempre se debe instalar un quemador por seguridad en caso de que exista una producción de biogás mayor a su consumo, o por paros del equipo que pueden ocurrir temporalmente debido a fallas operaciones, trabajos de mantenimiento o reducción de consumo de gas.

La selección de la antorcha se realiza de forma que el caudal máximo de biogás pueda quemarse a presión nominal (funcionamiento continuo). La potencia de la antorcha se regula en función del poder calorífico del biogás y de la cantidad.

La antorcha seleccionada es una antorcha estándar para plantas de biogás y gases residuales. Debido a la combustión cerrada, consigue una eficiencia de combustión superior al 99%. Además, como la llama es oculta, permite su instalación inclusive cerca de zonas residenciales. Se ha seleccionado el modelo FAII100MP la cual puede operar para un caudal de biogás entre 80-150Nm³/h, por lo que se adecua para nuestro proyecto. El mismo será adquirido a través de la empresa Zorg.

4.6.7 Equipos de Conducción

En el siguiente apartado se procede a la descripción de las líneas presentes en la planta, se definirán las conducciones de cada línea, en cuanto a materiales y diámetros, así como los elementos presentes en las mismas.

Además, se analizan las pérdidas de carga debidas a cada elemento presente en la línea para finalmente seleccionar los equipos de impulsión necesarios para el funcionamiento de la planta.

4.6.7.1 Líneas 1 y 2: Sustrato y digestato

Para conducir el sustrato y el digestato se han seleccionado conducciones de PE 100, las razones por las que se ha seleccionado este tipo de conducciones se enumeran a continuación:

- Resistencia a la corrosión (excelente resistencia química)
- Alta resistencia eléctrica
- Buena resistencia mecánica a golpes y presión
- Baja conductividad térmica frente a temperaturas extremas
- Buena hermeticidad de sus uniones.
- Son flexibles, ligeras y de fácil instalación, además de ser baratas.
- Presentan baja rugosidad (superficie interior lisa, mejor escurrimiento y bajas posibilidades de taponamiento).

Ambas líneas están constituidas por tuberías en las que las velocidades de es de 0,92 m/s (Metcalf&Eddy; $0,6 \text{ m/s} < v < 1 \text{ m/s}$ y Steinhouser $0,8 \text{ m/s} < v < 1,5 \text{ m/s}$) para evitar fuertes pérdidas, pero asegurándonos que el flujo de circulación a través de las conducciones corresponda a un flujo turbulento totalmente desarrollado, con el objetivo de evitar decantación de sólidos y la consecuente formación de costras. En concreto, en esta instalación, las línea 1 y 2 circularan por una tubería serie SDR de 40 mm de diámetro nominal.

4.6.7.2 Línea 3: Agua caliente

Para conducir el agua caliente (90°C) desde el sistema de refrigeración del motor- generador hasta el intercambiador de calor (línea 3) se han seleccionado **tuberías de acero inoxidable**, ya que con el polietileno tendríamos problemas de deformación.

Las tuberías se fabrican en dimensiones normalizadas por la ASTM (Asociación Americana para pruebas y Materiales). Una característica importante es que el diámetro nominal (DN) no corresponde con el diámetro externo (DE) ni al diámetro interno (DI). Se mantiene constante el DE para los diferentes espesores de pared (e), por lo que el diseño del tubo se basa en esta característica. Se mide en pulgadas.

En este caso se han dimensionado las conducciones para una velocidad de flujo recomendada para conducciones metálicas de agua de 1,95 m/s ($0,5 \text{ m/s} < v < 3 \text{ m/s}$). Para ello se han seleccionado tubos de acero inoxidable con un DN de $1 \frac{1}{4}$ (31,75 mm) y un numero de célula 40S, que determina su espesor.

4.6.7.3 Línea 4: Biogás

Para conducir el biogás entre los diferentes elementos de la línea se han seleccionado también conducciones de polietileno de alta densidad ya que estas son resistentes al biogás en este caso no existirán problemas de deformación a que la temperatura máxima de trabajo es de 35°C .

La conducción ha sido dimensionada para una velocidad de flujo de 11,1 m/s, que está dentro del intervalo recomendado para gases a baja presión ($10 < v_F < 20 \text{ m/s}$). **En concreto se han seleccionado tubos de PE de alta densidad serie SDR 11 y DN 90 mm.**

La línea de conducción de gas irá preferiblemente enterrada o recubierta para evitar el deterioro (cristalización) por la luz solar. De lo contrario, se colocará elevada para evitar daños físicos causados por personas o animales. Hay que tener muy en cuenta que pasos de tuberías por la membrana de cubierta o por la losa de los digestores se la ejecute profesionalmente de tal manera que no haya fugas de biogás.

Todas las tuberías de biogás deben pintarse de amarillo con una flecha que indique la dirección de flujo.



Figura 4.14: Ejemplo de tubería de biogás. Fuente: Operaciones unitarias en ingeniería química, 7ma edición.

4.5.7.2 Válvulas

Las válvulas son dispositivos que sirven para regular o impedir la circulación del fluido por una conducción. Es imprescindible que cada cierto tramo de tuberías se instale llaves de paso de cierre rápido y de media vuelta para el cierre del flujo. También se deben instalar válvulas antirretornos antes y después de cada elemento de la instalación. De esta manera se puede llevar a cabo cualquier tarea de limpieza o reparación.

Las válvulas empleadas en los sistemas de tuberías de plantas de biogás se detallan brevemente a continuación:

Válvulas de compuerta: Se diseñan para abrir o cerrar completamente una conducción evitando con ello el paso del fluido. El órgano de cierre consiste en un disco perpendicular a la dirección del flujo, que se desplaza verticalmente sin girar. El disco tiene forma de cuña y se adapta a un asiento que presenta la misma forma.

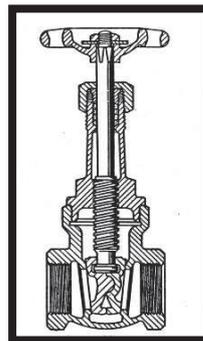


Figura 4.15: Válvula de compuerta. Fuente: Operaciones unitarias en ingeniería química, 7ma edición.

Se situará una válvula de compuerta en la línea 1 situada en la descarga del tanque de homogeneización (T-01) y otra en la línea 2 situada a la descarga del digester (DA).

Válvulas de bola: El órgano de cierre es una bola con una perforación diametral de igual sección que la tubería. El movimiento completo de accionamiento de la válvula es de $\frac{1}{4}$ de vuelta, con el que pasan de estar totalmente abiertas a totalmente cerradas cuando la bola gira 90o.

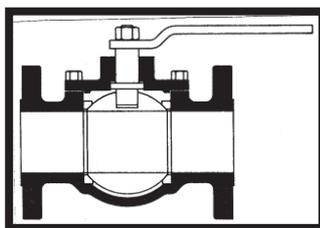


Figura 4.16: Válvula de bola. Fuente: *Operaciones unitarias en ingeniería química, 7ma edición.*

Se instalarán 3 válvulas de bola en la línea de biogás, una al principio de la línea, en la descarga del gasómetro, otra en la alimentación del sistema de purificación del biogás (T-H₂O) y otra al final de la línea, en la alimentación del módulo CHP. Además es necesaria otra válvula de bola situada en la línea de alimentación de la antorcha de seguridad que actuara como válvula de control en el sistema de control de presión del gasómetro.

Válvulas de retención: Se diseñan para permitir que el fluido circule en un único sentido. Su apertura se produce debido a la presión del fluido que circula por las conducciones en un determinado sentido. Cuando el flujo se detiene se cierra de forma automática por acción de la gravedad o mediante un resorte en la parte móvil.

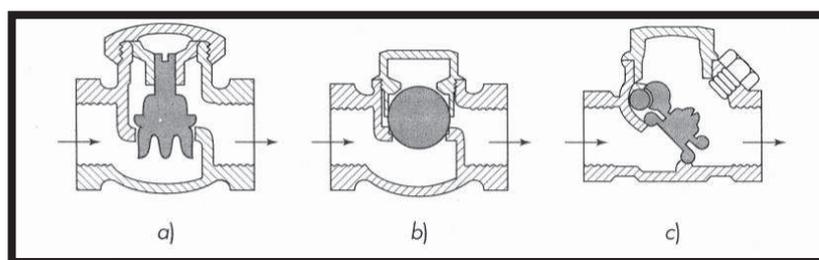


Figura 4.17: Válvula de retención: a) de elevación, b) de bola, c) de bisagra. Fuente: *Operaciones unitarias en ingeniería química, 7ma edición.*

En la planta se ha considerado la instalación de 4 válvulas de retención y su objetivo básicamente es el de proteger las bombas o equipos similares.

Se situarán dos válvulas de retención en la línea 1:

- ✓ una situada en conexión con la válvula de compuerta situada a la salida del tanque de homogeneización (T-01), su función será proteger la bomba (B-01)
- ✓ otra situada a la salida del intercambiador de calor (IC) para el buen funcionamiento del mismo.

Se situará una válvula de retención en la línea 3, en la descarga de la bomba (B-02) que impulsará el agua caliente al intercambiador de calor (IC).

Se instalará una válvula de retención en la línea 4, en la descarga del soplador de biogás (S-B).

Válvula de globo: Se usan para cortar o regular el flujo del líquido y este último es su uso principal. Son especialmente indicadas para producir estrangulamiento debido a la resistencia que presenta ante el flujo. En ocasiones la caída de presión en los sistemas suele ser elevada por lo que para minimizar este hecho se emplean válvulas de globo Y en ángulo.

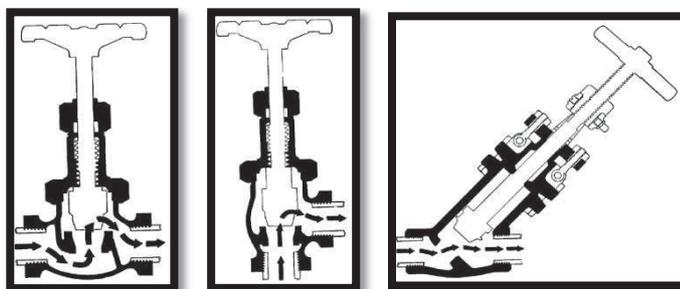


Figura 4.18: Válvula de globo (estándar, en ángulo y en Y (de izq. a dcha.). Fuente: Operaciones unitarias en ingeniería química, 7ma edición.

Se instalará una válvula de globo en la línea 3 que permitirá ajustar el flujo de agua caliente en el intercambiador de calor (IC).

Válvulas en las líneas de conducción				
	Línea 1	Línea 2	Línea 3	Línea 4
Válvula de compuerta	1	3		
Válvula de bola				4
Válvula de globo			2	
Válvula de retención	2		2	1

Tabla 4.33: Válvulas en las líneas de conducción. Fuente: elaboración propia.

4.6.7.3 Sistemas de impulsión

Para generar el movimiento de los fluidos desde un punto a otro del proceso serán necesarias dos bombas (una para el sustrato y otra para el agua del intercambiador) y un soplador (para el biogás). Las técnicas de cálculo de bombas y compresores difieren. Para bombas se utilizó el

balance de energía mecánica o ecuación de Bernoulli, para compresores se utilizó el balance de energía térmica.

Bomba 1: alimentación del sustrato al digester

La bomba 1 estará sumergida en el tanque de alimentación, bombeará el sustrato hasta el digester, previo paso por el intercambiador de calor. Se instalarán dos bombas que funcionen alternativamente, con el fin de incrementar la vida útil de las mismas. De esta forma se puede mantener la alimentación en caso de avería o tareas de mantenimiento.

La bomba deberá impulsar un caudal constante de 3,26 m³/h a una altura manométrica de unos 9,72 m; deberá tener al menos una potencia de 78,91 W. Para este servicio se ha seleccionado una bomba sumergible GRUNDFOS SEG.40.09.2.1.502:

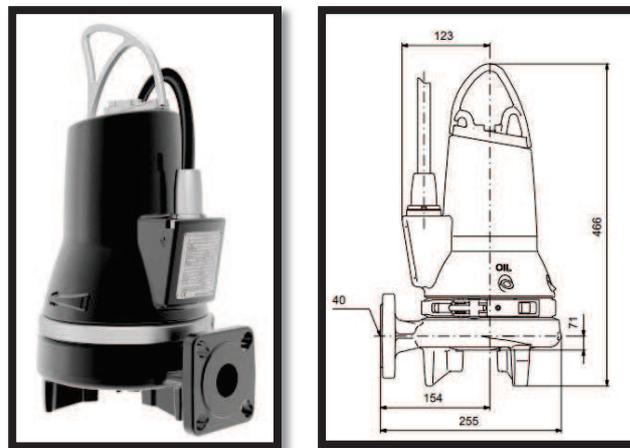


Figura 4.19 y 4.20: Bomba Sumergible GRUNDFOS. Modelo SEG.40.09.2.1.502. Fuente: Grundfos

Esquema del sistema de acoplamiento (dcha.)

Las bombas de la gama EF de Grundfos están diseñadas para bombear purines generados en granjas, así como en diversas aplicaciones industriales.

Es una bomba sumergible de fundición, con motor totalmente sumergible antideflagrante integrado de una fase. El diseño es compacto y permite una instalación provisional y permanente. Poseen un impulsor abierto de un solo álabe que ofrece unas excelentes propiedades de cara al transporte de sólidos de un tamaño de hasta 50 mm.

Se instalará sumergida, incluido el sistema de acoplamiento para instalación sumergida que será fijado con pedestal de acoplamiento en fundición gris GG-25, incluido tubo guía, cadena de elevación y todos los elementos necesarios para la correcta instalación. Otra ventaja muy importante

de este tipo de bombas es que posee un aparejo que permite desconectarla del tubo y sacarla para mantenimientos sin que el operador requiera entrar al tanque.

Bomba 2: Agua caliente del intercambiador

La bomba 2 estará conectada al sistema de refrigeración del motor generador y se encargará de aportar al intercambiador de tubos concéntricos el agua de refrigeración del motor, que saldrá de éste a una T^a de unos $90\text{ }^{\circ}\text{C}$.

La bomba deberá impulsar un caudal constante de $16,3\text{ m}^3/\text{h}$ a una altura manométrica de unos $6,80\text{ m}$ y deberá tener al menos una potencia hidráulica de $293,69\text{ W}$.

Las bombas TP son bombas centrifugas con conexión de aspiración y descarga en línea de idéntico diámetro. Se utiliza para el bombeo de líquidos en sistemas de calefacción y pueden utilizarse en un amplio rango de temperaturas.

El diseño de la bomba incluye un sistema de extracción superior que facilita el desmontaje del cabezal del motor con fines de mantenimiento. La bomba esta acoplada directamente a un motor asíncrono, refrigerado por ventilador. El cuerpo de la bomba es de fundición, el eje e impulsor de acero inoxidable.

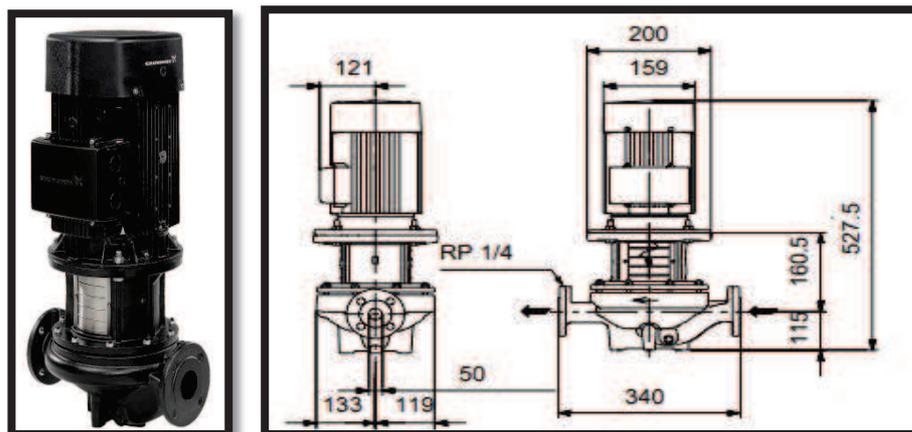


Figura 4.21: Bomba marca GRUNDFOS modelo TP 50-90/4 A-F-A-BAQE-EX3. Fuente: Grundfos.

- **Soplador para la línea de biogás**

El soplador impulsará el biogás desde la cubierta del digestor hacia la unidad de CHP. Deberá comprimir el biogás a una presión tal que éste pueda fluir fácilmente por la línea, superando las pérdidas de carga producidas en el sistema de tratamiento del biogás y además aportarle la presión requerida por la unidad de ciclo combinado.

La presión a la salida del compresor deberá ser por tanto, la presión del biogás requerida por la unidad de CHP (200 mbar) más las pérdidas totales de presión producidas en la línea (22,37 mbar). Por tanto:

El soplador deberá impulsar un caudal constante de 97,50 m³/h desde una presión de 15 mbar hasta una presión de salida mínima de 222,37 mbar y máxima de 552,37 mbar, aportando un ΔP comprendido entre 207 y 537 mbar.

Para este servicio se ha seleccionado la Serie TD – Range GOR de los sopladores de la marca “FPZ Blower Technology” que proporciona diferentes modelos especializados en la impulsión de biogás. En concreto se ha seleccionada un soplador de canal lateral modelo K05. Este tipo de sopladores aumentan la presión del gas aspirado gracias a la fuerza centrífuga proporcionada por el impulsor.

El modelo seleccionado, permite aportar la presión necesaria calculada para el caudal de operación seleccionado. A continuación se exponen las tablas de performance del modelo y los gráficos de operación.



Imagen 4.5: Soplador de canal lateral, serie TD, modelo K05. Fuente: FPZ Blower Technology

El soplador deberá impulsar un caudal constante de 97,50 m³/h desde una presión de 15 mbar hasta una presión de 214 mbar y deberá tener al menos una potencia de 1,023 kW.

Para este servicio se ha seleccionado un soplador de la marca MAPRO® que proporciona diferentes modelos especializados en la impulsión de biogás. En concreto se ha seleccionada un soplador de canal lateral. Este tipo de sopladores aumentan la presión del gas aspirado gracias a la fuerza centrífuga proporcionada por el impulsor.

4.6.8 Distribución de los equipos en planta

Para la distribución en planta de los equipos se han seguido las diferentes distancias de seguridad con el objeto de reducir la influencia recíproca en caso de que se produzca un daño, evitar la propagación de fuego y proteger el tanque de almacenamiento de gas.

Para tal fin, es necesario disponer distancias de seguridad de:

- al menos 6 m en sentido horizontal entre los tanques de almacenamiento de gas y las instalaciones, equipos y edificios adyacentes no relacionados con el biogás (con una altura inferior a 7,5 m) o las vías de transporte.
- La distancia mínima recomendada para la instalación de la antorcha es 30 metros del tanque de almacenamiento de biogás.
- Deben mantenerse distancias de seguridad de al menos 6 m, dentro de una planta de biogás, entre el tanque de almacenamiento de gas y las salas de instalación para motores de combustión interna. En las instalaciones de superficie, la distancia de seguridad se mide a partir de la proyección vertical del borde del tanque de almacenamiento.

A su vez, para seleccionar la ubicación de las unidades se tuvo en cuenta varias características del complejo:

- El equipo debe tener fácil accesibilidad para poder trasladar la materia orgánica a utilizar desde las disposiciones de acumulación que se encuentran en el extremo final de las naves.
- La disposición final del equipo debe tener suficiente espacio, para llevar a cabo una infraestructura adecuada externa, que lo mantendrá a resguardo de las condiciones climáticas.

4.6.8.1 Selección de la ubicación de la planta

A partir del diseño, dimensionamiento y confección de los planos se obtuvo que la planta requiere 63 metros de largo y 27 metros de ancho, una superficie de 1701 m² totales aproximadamente. La distribución de las unidades y equipos se puede apreciar en la siguiente imagen:

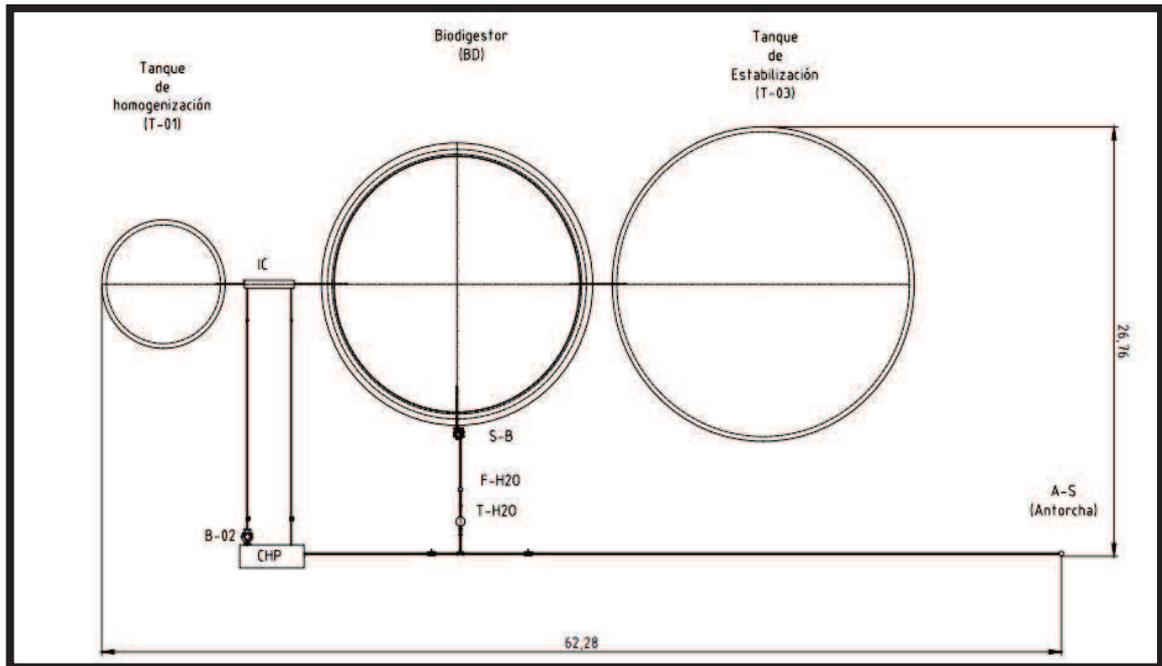


Figura 4.22: Vista Superior de Planta, unidad en metros. Fuente: elaboración propia

Considerando la superficie requerida, las distancias de seguridad y el sitio de emplazamiento, se seleccionó la siguiente área disponible del terreno para la instalación de la planta ubicada al NO de los corrales. La misma cuenta con una superficie de 68.442 m² disponibles, con medidas de 490m de largo y 160m de ancho, cumpliendo así con el espacio requerido de las instalaciones.



Figura 4.23: Sitio de emplazamiento para la planta de biodigestión. Fuente: Google Earth.

5. Memoria de Cálculo

5.1 Cuantificación de los Purines de Cerdo

La metodología empleada en la cuantificación de los purines de cerdo se basó en la utilización de coeficientes de generación de purín de acuerdo a la orientación productiva y peso del cerdo, especificados en el manual de “Buenas Prácticas de Manejo y Utilización de Efluentes Porcinos” del Ministerio de Agroindustria, Presidencia de la Nación, tal como se observa en la figura a continuación:

COMPONENTE	UNIDADES	RECRÍA	ENGORDE	ENGORDE	ENGORDE	CACHORRAS REPOSICIÓN	PADRILLOS	CERDA GESTACIÓN	CERDA MATERNIDAD + LECHONES
			1	2	3				
			23-57KGS.	57-80KGS.	80-114KGS.				
CANTIDAD									
Peso	kg/día	1,68	2,73	3,64	4,27	3,73	3,73	3,73	11,82

Figura 5.1: Coeficientes de generación de purines. Fuente: Buenas prácticas de manejo y utilización de efluentes porcinos, Ministerio de Agroindustria, 2018.

La información que muestra la figura X ha sido adaptada de bibliografía internacional, realizando las conversiones de unidades necesarias y expresa la tasa de generación de purín por categoría de cerdo en el sistema productivo. Es importante tener presente que los valores presentados están desarrollados sobre una dieta seca en base a Maíz, asumiendo un máximo de 5% de pérdida de alimentos, la cual se asemeja al sistema de producción analizado.

La cuantificación de los purines totales del sistema fue obtenida mediante el siguiente cálculo para cada categoría de cerdos:

$$\text{Cant. de cerdos (Unidad)} \times \text{Tasa de generación de purines} \left(\frac{\text{Kg purín}}{\text{día} \cdot \text{unidad}} \right) = \text{purín generado} \left(\frac{\text{kg purín}}{\text{día}} \right)$$

A continuación, se muestran los resultados obtenidos:

Cuantificación de purines porcinos de la granja Híbridos Argentinos									
Componente	Unidades	Recría	Engorde			Cachorras reposición	Padrillos	Cerde Gestación	Cerde Maternidad + 19 Lechones por año
			23-57kg	57-80kg	80-114kg				
Tasa de generación de purín	kg/día	1,68	2,73	3,64	4,27	3,73	3,73	3,73	11,82
Cantidad	-	4836	3455	3455	3455	53	40	600	147
Purín generado	kg/día	8125,09	9430,91	12574,55	14750,91	197,84	149,20	2236,77	1740,94

Tabla 5.1: Cuantificación de purines porcinos. Fuente: elaboración propia.

De esa manera, se obtuvo la cantidad total de residuos generados por día en el sistema:

$$\dot{m}_0 = 49206,21 \frac{kg}{día}$$

5.2 Determinación de la proporción de los sustratos

La determinación de la proporción de los sustratos a utilizar en la mezcla se definió principalmente de manera tal que la composición de la mezcla presente compuestos en valores determinados y propiedades en rangos específicos que implican una operación y funcionamiento adecuado del biorreactor. Las mismas fueron especificadas en la sección 4.5 “Sistemas de Digestión Anaeróbica”. A continuación, se resumen las características principales que fueron tomadas en cuenta para la determinación de las proporciones:

- Relación C/N > 20 y < 30.
- pH en el rango de 6,8-7,2
- % sólidos totales < 12%

A su vez, se corroboró que las concentraciones de las sustancias tóxicas e inhibitoras se encuentren dentro del rango de operación definido en la sección 4.1.3 de la Memoria Descriptiva. Se seleccionó operar con un %15 de Silaje de Maíz y un 85% de purín de cerdo. A partir de las proporciones, se determinaron los caudales máxicos y volumétricos de la mezcla, la densidad y la concentración de los componentes bajo análisis. El resultado se puede observar en la tabla X.

Caracterización de la mezcla				
Parámetro	Unidad	Purines de Cerdo	Silaje de Maíz Tesis	Mezcla
Proporción	%	85	15	100
Caudales máxicos	kg/día	49.206,21	8.683,45	57.889,66
Densidad	kg/ m3	1.000	300	895
Caudales volumétrico	m3/día	49,21	28,94	78,15
Componentes de la mezcla				
pH	-	7,5	3,8	6,95
Sólidos totales (ST)	g ST kg-1	50,4	330	92,34
Sólidos Totales	%	5,04%	33,00%	9,23%
Sólidos volátiles (SV)	g SV kg-1	35,4	316,8	77,61
Sólidos Volátiles	% ST	70,24%	96,00%	74,10%
C/N	g C g-1 N	16,4	70,77	24,56
Nitrógeno total Kjeldahl (NTK)	g NTK kg-1	5,3	21,45	7,72
Nitrógeno amoniacal total (NH4+-N)	g NH4+-N kg-1	4,4	1,65	3,99
Nitrógeno orgánico (Norg)	g Norg kg-1	0,9	19,8	3,74
Fósforo (P)	g P kg-1	1,38	9,24	2,56
Potasio (K)	g K kg-1	4,83	0	4,11*
Alcalinidad Total	mg CaCO3 kg-1	16.056	0	13.647,6*

Tabla 5.2: Caracterización del sustrato Mezcla. Fuente: elaboración propia

A su vez, dado que no se cuentan con ensayos de la tasa de generación de biogás del sustrato mezcla, se estimó la producción de Metano de la mezcla a partir de las tasas de generación específicas de cada sustrato, utilizando la siguiente ecuación:

$$BMP_{Mezcla} = BMP_{Sustrato\ 1} \times \frac{\%_{Sustrato\ 1}}{100} + BMP_{Sustrato\ 2} \times \frac{\%_{Sustrato\ 2}}{100}$$

Generación de Biogás (62,8%CH4)				
Tasa específica de generación de Metano, $G_{o\ [CH_4]}$	Nm3 CH4/kg SV	0,297	0,336	0,303
Tasa específica de generación de biogás, $G_{o\ [Biogás]}$	Nm3 Biogás/kg SV	0,473	0,65	0,499

Tabla 5.3: Tasa específica de generación de biogás y metano. Fuente: elaboración propia

Resulta importante señalar que en el caso del silaje de maíz, no se cuentan con datos de varios compuestos y parámetros, de manera que fueron omitidos en la composición de la mezcla. Sin embargo, se aclara que estos son estudios de estimación y en la realidad se deberá realizar la caracterización del sustrato mezcla.

5.3 Digestión Anaeróbica

Tal como se describió en la sección 4.6.4 de la memoria descriptiva, se propone la utilización de un reactor anaeróbico de mezcla completa, en régimen de operación continuo, en condiciones de temperatura mesofílicas ($T=35^{\circ}\text{C}$), por vía húmeda. Además, tal como se mencionó en la sección 4.1.2 de la Memoria descriptiva, existen diversos modelos matemáticos para modelar el crecimiento bacteriano en un proceso de digestión anaeróbica. En este proyecto, se optó por utilizar el modelo de Chen y Hashimoto.

5.3.1 Metodología Aplicada

En primera instancia, se procedió a definir las tasas cinéticas de crecimiento biológico en el reactor. Chen y Hashimoto proponen un modelo cinético, el cual ha sido profundamente utilizado para digestores tratando residuos ganaderos y es el que será utilizado en este proyecto. Este modelo hace uso de la ecuación cinética de Contois para definir la velocidad específica de crecimiento de microorganismos:

$$\mu = \frac{\mu_{\max} S}{\beta \cdot X + S}$$

dónde:

- μ_{\max} : Tasa máxima de crecimiento (d^{-1})
- S: concentración de sustrato del digestor ($\frac{\text{kg SV}}{\text{m}^3}$)
- X: Concentración de la Biomasa ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)
- β : parámetro cinético adimensional

β es igual cociente entre la concentración del sustrato y la masa celular que da lugar a una velocidad específica de crecimiento igual a la mitad de su velocidad máxima.

A su vez:

$$r_X = \frac{dX}{dt} = \mu X \quad (\text{Tasa de crecimiento celular})$$

$$r_S = -\frac{r_X}{Y_{X,S}} \quad (\text{Tasa de utilización del Sustrato})$$

$$r_d = -k_d X \quad (\text{Descomposición endógena})$$

$$r'_X = \frac{dX}{dt} = \mu X - k_d X \quad (\text{Tasa de crecimiento celular})$$

En este modelo, el coeficiente de producción se considera constante y no se tiene en cuenta el fenómeno de muerte celular, por lo tanto:

$$r_X = -Y_{X,S} \cdot r_S \quad \rightarrow \quad r_S = -\frac{r_X}{Y_{X,S}}$$

A continuación, se presenta el diagrama de flujo, los valores iniciales, los balances de materia aplicados al proceso y las consideraciones realizadas en el mismo:

A continuación, se presenta el diagrama de flujo, los valores iniciales, los balances de materia aplicados al proceso y las consideraciones realizadas en el mismo:

✓ Diagrama de flujo

En la siguiente imagen se muestra el diagrama de flujo del proceso con las variables a tener en cuenta:

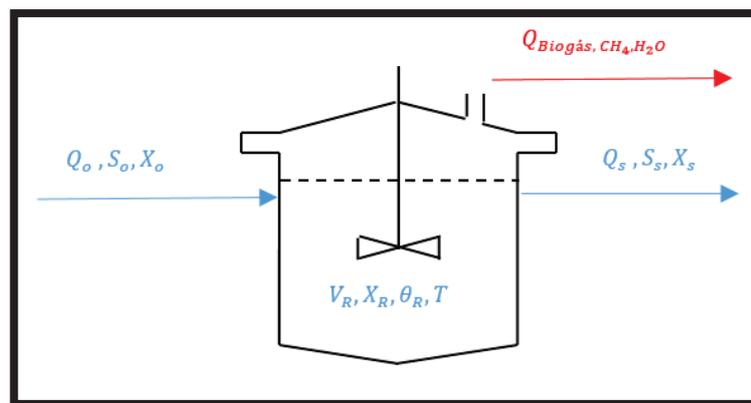


Figura 5.2: Diagrama de flujo del biodigestor. Fuente: elaboración propia.

Dónde:

- V_R : Volumen de reacción, (m^3)
- T : Temperatura del efluente en el reactor ($^{\circ}C$)
- Q : Caudal volumétrico de entrada \approx salida ($m^3/día$)
- X : Concentración microorganismos (kg/m^3)
- S_o : Concentración de sustrato a la entrada (kg/m^3)
- S_s : Concentración de sustrato a la salida (kg/m^3)

A continuación, se exponen los datos de entrada al biorreactor:

Datos de Entrada		
\dot{m}_o	$\frac{kg}{día}$	57889,66
Q_o	$\frac{m^3}{día}$	78,15

SV_0	$\frac{Kg\ SV}{m^3}$	69,46
ST_0	$\frac{Kg\ ST}{m^3}$	82,64
$[N - NH_4]_0$	g NH ₄ + - N kg ⁻¹	3,99

Tabla 5.4: Parámetros a la entrada del biorreactor. Fuente: elaboración propia

✓ Balances de Materia y determinaciones:

Se realizan una serie de consideraciones referentes al reactor biológico, ya que aplicamos el modelo de reactor continuo mezcla perfecta al proceso de digestión:

- El sustrato mezcla contiene bacterias pero estas no causan una degradación neta de la materia, por lo que suponemos que la concentración de bacterias en el efluente a tratar es despreciable

$$X_0 \cong 0.$$

- Se supone que la densidad se mantiene constante, ya que la masa de biogás es despreciable con respecto a la masa de digestato.
- Se supone que la materia orgánica (el sustrato), es soluble y por tanto sólo son considerados como sólidos las células. Esta hipótesis se basa en que los tiempos de retención en el sistema son suficientemente grandes como para lograr que los compuestos orgánicos inicialmente presentes en el agua se hidrolizan a sustancias más pequeñas y solubles.
- El considerar al sustrato como soluble, implica que la concentración de la materia orgánica en el efluente que abandona el sistema S_5 . es igual a la de la corriente de salida del reactor S_r .

A continuación, se presentan los balances de materia realizados:

<i>Balance de Biomasa:</i>	$\frac{dX}{dt}V = Q(X_0 - X) + r_X V \quad \rightarrow \quad \frac{dX}{dt} = -\frac{X}{\theta} + \mu X$
<i>Balance de Sustrato:</i>	$\frac{dS}{dt}V = Q(S_0 - S) + r_S V \quad \rightarrow \quad \frac{dS}{dt} = \frac{(S_0 - S)}{\theta} + r_S$

En estado estacionario:

<i>Balance de Biomasa:</i>	$0 = -\frac{X}{\theta} + \mu X \quad \rightarrow \quad \mu = \frac{1}{\theta}$
----------------------------	--

$$\text{Balance de Sustrato:} \quad 0 = \frac{(S_0 - S)}{\theta} + r_s \rightarrow r_s = -\frac{(S_0 - S)}{\theta}$$

Igualando la expresión de la tasa de utilización de sustrato con la definida en la ecuación X obtenemos:

$$r_s = -\frac{(S_0 - S)}{\theta} = -\frac{r_X}{Y_{X,S}} = -\frac{\mu X}{Y_{X,S}} = -\frac{X}{\theta Y_{X,S}} \rightarrow X = Y_{X,S} (S_0 - S)$$

Sustituyendo la concentración de biomasa, X, en la ecuación de Cantois, se obtiene:

$$\mu = \frac{\mu_{max} \cdot S}{\beta Y_{X,S} (S_0 - S) + S}, \quad \text{dónde } \beta \cdot Y_{X,S} = K \text{ (parámetro cinético adimensional)}$$

Y operando llegamos a la concentración del sustrato en el digestor:

$$S = \frac{K}{(\theta \mu_{max} - 1 + K)} \cdot S_0$$

Dónde:

- ✓ θ : tiempo de retención hidráulico (días)
- ✓ μ_{max} : tasa máxima de crecimiento ($\frac{1}{d}$)
- ✓ K : Constante de inhibición de Chen – Hashimoto
- ✓ S_0 : Concentración de sustrato en la entrada ($\frac{kg SV}{m^3}$)

5.3.2 Producción de Biogás y parámetros de operación

El parámetro K es conocido como constante adimensional de inhibición de Chen- Hashimoto, que refleja la inhibición debida al crecimiento de la biomasa en el reactor y la inhibición por la baja en la disponibilidad del sustrato. Estos comprobaron que aumenta con un aumento de la concentración de sólidos volátiles en la entrada al digestor y propusieron las expresiones siguientes para el cálculo de μ_{max} (d^{-1}) y K:

$$\mu_{max} = 0,013 T - 0,129$$

$$K = 0,6 + 0,021 e^{0,05 S_0}$$

Dónde:

- T: temperatura (°C)
- S_0 en ($kg SV/m^3$ purín)

En estas condiciones, la eficiencia en la eliminación del sustrato es,

$$E = 1 - \frac{S}{S_0} = 1 - \frac{K}{(\theta \mu_{max} - 1 + K)}$$

Y la producción de metano, P_c , en unidades de $m^3 CH_4/kg SV$, se puede expresar en función de la carga orgánica aplicada mediante la ecuación:

$$P_c = G_0 \left(1 - \frac{K}{(\theta \mu_{max} - 1 + K)} \right) = G_0 \cdot E$$

Donde, G_0 ($Nm^3 CH_4 \cdot kg^{-1}$) es la producción de metano o biogás por unidad de materia orgánica degradada. Es un parámetro teórico cuya determinación se realiza en condiciones en que todo el sustrato ha sido degradado, lo que implica tiempo infinito. Este valor se halla mediante una medida de biodegradabilidad en discontinuo.

La producción de gas, P_v , por unidad de tiempo y volumen del reactor ($m^3 CH_4/m^3 \cdot d$) será:

$$P_v = G_0 \frac{(S_0 - S)}{\theta} = \frac{G_0 S_0}{\theta} \left(1 - \frac{K}{(\theta \mu_{max} - 1 + K)} \right) = \frac{G_0 S_0}{\theta} E = \frac{Q G_0 S_0}{V} E$$

Dónde:

- P_v : producción de biogás, ($m^3 CH_4 \cdot m^{-3} reactor \cdot d^{-1}$)
- G_0 : producción de gas por unidad de sustrato eliminado, ($m^3 CH_4 \cdot kg^{-1} SV$)
- θ : tiempo de retención hidráulico, (d)
- μ_{max} : tasa máxima de crecimiento, (d^{-1})
- S : concentración de sustrato del digestor ($kg SV \cdot m^{-3}$)
- S_0 : concentración de sustrato del digestor ($kg SV \cdot m^{-3}$)
- K : Parámetro cinético adimensional
- Q : caudal másico de entrada ($m^3 \cdot d^{-1}$)
- V : Volumen del reactor (m^3)

$$\text{La producción } P_v \text{ presenta un máximo para } \theta = \frac{1}{\mu_{max}} \left(1 + K^{\frac{1}{2}} \right)$$

La eficiencia en la depuración para el tiempo de retención correspondiente al máximo de P_v depende, según el modelo de Chen-Hashimoto, solamente de K , disminuyendo la eficiencia con un aumento de ésta.

Para la determinación del tiempo de retención hidráulico, se procedió a graficar y analizar la producción específica de biogás y la eficiencia de remoción del sustrato para diferentes valores de θ . A partir del tiempo de retención se calcularán los siguientes parámetros de diseño del digestor:

- La producción de gas, por unidad de tiempo y volumen del reactor, P_v , ($Nm^3 CH_4/m^3 \cdot d$):

$$P_{v [CH_4]} = \frac{G_0 S_0}{\theta} E$$

$$P_v [\text{Biogás}] = \frac{G_0 S_0}{\theta} E$$

- La producción de gas referida al consumo de sustrato, P_c ($\text{Nm}^3 \text{CH}_4/\text{kg SV}$) y ($\text{Nm}^3 \text{Biogás}/\text{kg SV}$):

$$P_c [\text{CH}_4] = G_0 \cdot E$$

$$P_c [\text{Biogás}] = G_0 \cdot E$$

- La producción diaria (Q) de CH_4 ($\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{d}$) y de Biogás ($\text{Nm}^3 \text{Biogás}/\text{d}$):

$$Q_{\text{CH}_4} = Q_0 \cdot SV_0 \cdot P_c [\text{CH}_4]$$

$$Q_{\text{Biogás}} = Q_0 \cdot SV_0 \cdot P_c [\text{Biogás}]$$

- La producción específica (P_e de Biogás ($\text{Nm}^3 \text{Biogás}/\text{t residuo}$):

$$P_e [\text{Biogás}] = \frac{Q_{\text{Biogás}}}{m_0}$$

- $V_{\text{util digestión}}$ (m^3) necesario:

$$V_{\text{util dig}} = Q_0 \cdot \theta$$

- VCO ($\text{kg SV}/\text{m}^3 \cdot \text{d}$) con la que trabajara el digestor:

$$VCO = \frac{Q_0 \cdot SV_0}{V_{\text{util dig}}}$$

5.3.3 Resultados: parámetros de operación y producción de biogás

Definida la temperatura de operación a 35°C , se determinaron según las ecuaciones X, los siguientes parámetros:

Parámetros cinéticos		
Parámetro	Unidad	Valor
μ_{max}	$\frac{1}{\text{día}}$	0,326
K	-	1,277

Tabla 5.5: Parámetros cinéticos obtenidos y utilizados. Fuente: elaboración propia.

La curva de degradación obtenida para la selección del tiempo de retención hidráulico se puede observar a continuación:

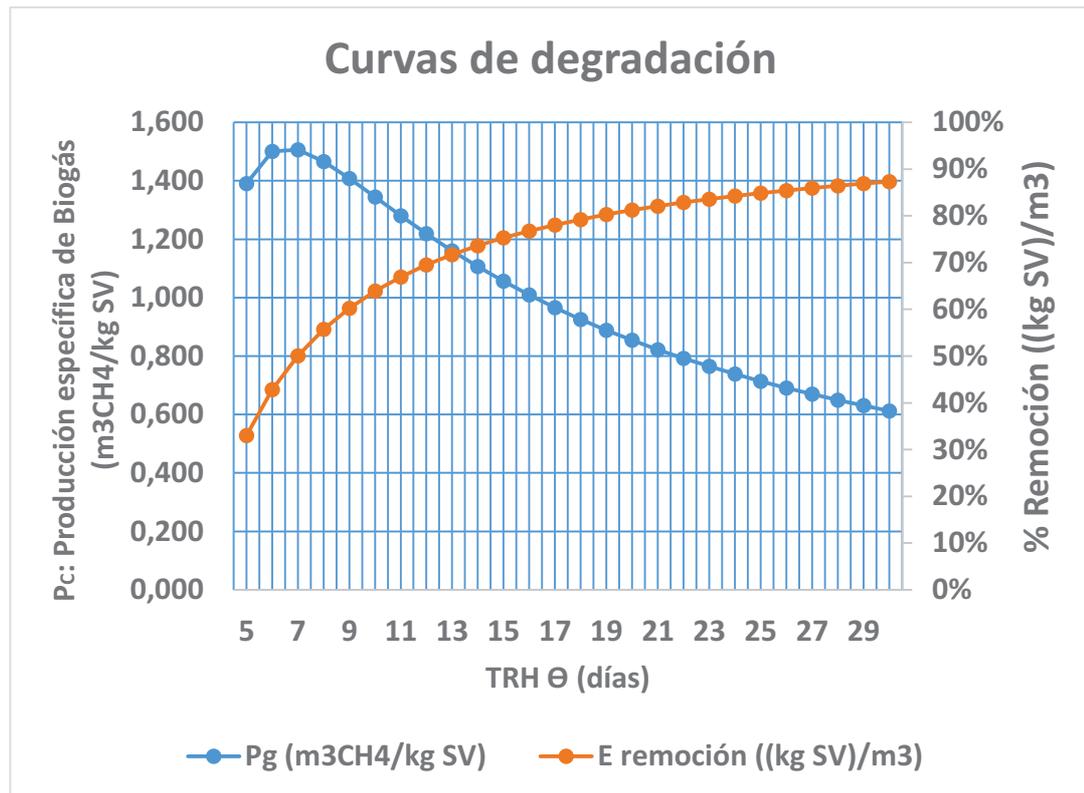


Figura 5.3: Gráfico de las curvas de degradación en función del tiempo de retención hidráulica (días). Fuente: elaboración propia.

La máxima depuración no coincide con la máxima producción de gas por unidad de volumen del reactor. Por lo tanto, para el dimensionamiento de los digestores se debe tener en cuenta cuál es la prioridad de la planta en cuestión:

- Control del impacto ambiental de algún tipo de residuo orgánico
- Producción de fertilizante y acondicionador de suelos.
- Producción de biogás como combustible.

En el caso del presente proyecto, se buscó maximizar la producción de biogás para la generación de energía eléctrica como principal objetivo, considerando la obtención de un nivel de depuración del efluente aceptable ($E > 75\%$) para su utilización como acondicionador de suelos evitando las posibles afectaciones sobre el ambiente y considerando que el volumen de carga en el digestor se encuentre en el intervalo recomendado entre 3,5 - 4 kg SV / m³ d. Aplicando dicho criterio, en la tabla X en amarillo se exponen los valores de Θ (días) que cumplen los criterios y que fueron considerados para la operación.

Determinación de Θ				
Θ (días)	$P_{c [CH_4]}$	E remoción ((kg SV)/m3)	V útil (m3)	Volumen de carga (Kg SV /m3 día)
17	0,966	78,06%	1328,57	4,09
18	0,926	79,22%	1406,72	3,86
19	0,889	80,27%	1484,87	3,66
20	0,854	81,21%	1563,02	3,47

Tabla 5.6: Determinación del tiempo de retención hidráulico. Fuente: elaboración propia.

Por lo expuesto anteriormente, se ha seleccionado un TRH para el digester de 18 días que supone trabajar con una eliminación de SV del 79,22% y una producción de biogás de 0,926 Nm³ CH₄ / kg SV. En la siguiente tabla se resumen los parámetros de operación seleccionados y los parámetros de diseño referidos a la producción de biogás:

Resultados – Digestión Anaeróbica			
Parámetro	Descripción	Unidad	Valor
T	Temperatura	°C	35
pH	Tiempo de retención hidráulico en el Digester	-	6,95
$\theta_{Digestor}$	Tiempo de retención hidráulico en el Digester	días	18
E	Eficiencia de eliminación de sustrato	% SV	79,22%
VCO	Tasa específica de generación de metano	$\frac{kg\ SV}{m^3\ día}$	3,86
Q_0	Caudal de alimentación de sustrato	$\frac{m^3}{día}$	78,15
$P_{v [CH_4]}$	Producción Volumétrica de metano por día	$\frac{Nm^3\ CH_4}{m^3\ día}$	0,926
$P_{v [Biogás]}$	Producción Volumétrica de Biogás por día	$\frac{Nm^3\ Biogás}{m^3\ día}$	1,527
$P_{c [CH_4]}$	Producción Específica de metano	$\frac{Nm^3\ CH_4}{kg\ SV}$	0,240
$P_{c [Biogás]}$	Producción Específica de metano	$\frac{Nm^3\ Biogás}{kg\ SV}$	0,396
Q_{CH_4}	Caudal de metano producido	$\frac{Nm^3\ CH_4}{día}$	1302,59
$Q_{Biogás}$	Caudal de Biogás producido	$\frac{Nm^3\ Biogás}{día}$	2148,01

Tabla 5.6: Resultados de los parámetros obtenidos en la digestión anaeróbica. Fuente: elaboración propia.

Dado que se desconoce la composición del biogás generado en el proyecto, se considerará una composición promedio del biogás en función de la bibliografía consultada.

Composición del Biogás considerado			
Compuestos	Fórmula	Unidad	Valor adoptado
Metano	CH ₄	% vol	62,8
Dióxido de Carbono	CO ₂	% vol	37
Monóxido de Carbono	CO	% vol	< 0,2
Nitrógeno	N ₂	% vol	0,2
Oxígeno	O ₂	% vol	0

Agua	H2O	% vol	<0,1
Sulfuro de Hidrógeno	H2S	mg N m-3	10-600
Amoníaco	NH3	mg N m-3	0,01-2,50
Densidad Normal	ρ	kg Nm – 3	1,16

Tabla 5.7: Composición del Biogás adoptado. Fuente: elaboración propia.

5.3.4 Producción y composición del digestato

La cantidad de digestato que se produce es teóricamente la diferencia entre el caudal másico de entrada al digestor y el caudal másico de biogás formado en el digestor. Por lo tanto:

$$\dot{m}_{digestato} = \dot{m}_0 - \dot{m}_{Biogás}$$

El metano tiene una densidad aparente de $0,717 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ a 0°C y $1,013 \text{ bar}$ de presión. No obstante, el biogás es más pesado que el metano, debido a que contiene también otros gases. Suele tener una densidad relativa entre $1,0$ y $1,35$ respecto del aire. Los resultados reales de la densidad del biogás se obtendrán a partir de la composición de este y la temperatura.

Propiedades del biogás y sus componentes			
Parámetro	Descripción	Unidad	Valor
$\delta_{[CH_4]}(0^\circ\text{C}, 1\text{atm})$	densidad del CH4 (0°C , 1atm)	kg/m3	0,717
$\delta_{[CO_2]}(0^\circ\text{C}, 1\text{atm})$	densidad del CO2 (0°C , 1atm)	kg/m3	1,74
$\delta_{Biogás}(0^\circ\text{C}, 1\text{atm})$	Densidad del Biogás (68,2%CH4) (0°C , 1atm)	kg/m3	1,049
Hum_{abs}	Humedad absorbida a saturación en aire (35°C)	g agua/kg aire	36,71
$G_o [CH_4]$	Tasa específica de generación de metano	(Nm3 CH4/kg SV)	0,303
$G_o [Biogás]$	Tasa específica de generación de biogás	Nm3 Biogas/kg SV	0,499

Tabla 5.8: Propiedades del biogás y sus componentes. Fuente: elaboración propia

$$\dot{m}_{digestato} = \dot{m}_0 - G_o \delta_{Biogás}(0^\circ\text{C}, 1\text{atm})$$

- **SV en el digestato:** la concentración de SV en el del digestor se obtiene mediante la eficiencia de remoción:

$$SV_{digestor} = SV_0 (1 - E)$$

- **ST en el digestato:** el cálculo de los ST en digestato se realiza restándole al caudal total de digestato calculado anteriormente, su contenido en agua. Tal contenido de agua será toda la que ingreso al digestor menos la que se va en el biogás (se considerará el biogás saturado de humedad a 35°C).

$$\dot{m}_{ST\ digestato} = \dot{m}_{Digestato} - \dot{m}_{H_2O\ digestato} - \dot{m}_{H_2O\ Biogás}$$

El agua que se va saturada en el biogás se ha calculado asemejando el comportamiento del gas al aire a la misma temperatura:

$$\dot{m}_{H_2O (Biogás)} = Q_{Biogás} \frac{Nm^3}{día} \times \frac{308 \text{ }^\circ K}{273 \text{ }^\circ K} \delta_{Biogás} \frac{kg}{m^3} Hum_{abs} \left(\frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ aire}} \right)$$

$$\dot{m}_{H_2O \text{ digestato}} = m_0 (1 - \%ST)$$

Una vez definida la masa de agua saturada en el biogás y la masa de agua en el digestato, se puede obtener los kg por día de ST en el digestato. A su vez, la concentración de ST reales a la salida del digestor será:

$$ST_{digestato} \left(\frac{kg \text{ ST}}{tn \text{ digestato}} \right) = \frac{\dot{m}_{ST \text{ digestato}}}{\dot{m}_{Digestato}}$$

- **Nitrógeno en el digestato:** se ha considerado que la eficiencia de transformación de los SV en metano es la misma que la fracción de nitrógeno orgánico que se transforma en amoniacal. Por tanto, la cantidad de nitrógeno amoniacal que restará en el efluente será la cantidad de nitrógeno amoniacal de la entrada más la cantidad de nitrógeno orgánico que se ha transformado.

$$\frac{kg \text{ } N_{NH_4^+}}{tn \text{ digestato}} = \frac{(N_{NH_4^+ \text{ ent}} + N_{Org \text{ ent}} \times E)}{\dot{m}_{Digestato}} \times Q_o$$

5.3.5 Resultados: Producción y composición del digestato

A continuación, se resumen los resultados de los principales parámetros que caracterizan la producción y composición del digestato:

Resultados – Producción y composición del digestato					
Efluente (0)			Digestato		
\dot{m}_0	kg/día	57889,66	$\dot{m}_{Digestato}$	kg/día	55636,40
SV_0	kg SV / m3	69,46	$SV_{digestato}$	$\frac{kg \text{ SV}}{tn \text{ digestato}}$	20,28
ST_0	kg ST / m3	82,64	$ST_{digestato}$	$\frac{kg \text{ ST}}{tn \text{ digestato}}$	97,76
$[N - NH_4]_0$	g NH4+-N kg-1	3,99	$[N - NH_4]_{Dig}$	$\frac{kg \text{ } N_{NH_4^+}}{tn \text{ digestato}}$	7,23
$\dot{m}_{H_2O (Biogás)}$	$\frac{kg \text{ } H_2O}{día}$	93,31	Q_{ST-dig}	$\frac{kg \text{ ST}}{día}$	5438,84
			Q_{SV-dig}	$\frac{kg \text{ SV}}{día}$	1128,04395
			$\dot{m}_{H_2O \text{ digestato}}$	$\frac{kg \text{ } H_2O}{día}$	52544,1297

Tabla 5.9: Resultados de la producción y composición del digestato. Fuente: elaboración propia.

5.4 Tanque de alimentación – Homogenización de Sustratos

Antes de introducir la biomasa al digestor se mezclan y homogenizan los sustratos con agua o con parte del digestato que sale del digestor. Por lo tanto, los tanques de alimentación se dimensionan para el volumen diario de biomasa que se alimenta al digestor.

El volumen de este tanque debe almacenar 1-2 días del volumen requerido para alimentar al digestor. Se debe prever un borde libre en el tanque, mínimo de 0,5 m.

5.4.1 Dimensionado del tanque de alimentación

En nuestro caso los residuos a tratar tienen un contenido de ST del 9,23% por lo que no será necesaria la adición de agua. El volumen de este tanque debe almacenar 1-2 días del volumen requerido para alimentar al digestor. Se ha seleccionado un tiempo de 2 días.

$$V_{\text{útil-tqe alimentación}} = Q \cdot \theta_{\text{alim}}$$

Se ha seleccionado el tanque de forma cilíndrica con el fin de que ocupe una menor superficie. Una vez obtenido el volumen útil se procede a determinar el diámetro del tanque y la altura útil. Para la determinación de la altura útil del tanque se considera que la relación altura con el diámetro debe ser una relación 2:1 siguiendo así la bibliografía consultada (metodología de Deublein y Steinhauser, 2011).

$$V_{\text{útil-alim}} = \frac{\pi \phi^2}{4} h_{\text{útil-alim}} = \frac{\pi \phi^3}{8} \rightarrow \phi = \sqrt[3]{\frac{8V}{\pi}}$$

$$h_{\text{útil-alim}} = \frac{\phi}{2}$$

A su vez, a la $h_{\text{útil-alim}}$ se le debe añadir una $h_{\text{seguridad}}$ de 0,5m de borde libre, por lo que:

$$h_{\text{alim}} = h_{\text{útil-alim}} + h_{\text{seguridad}}$$

Con la nueva altura y el diámetro determinado, se busca redondear los valores para facilitar el proceso constructivo y se define el volumen final del tanque de alimentación utilizando la relación inicial. En la siguiente tabla se observa el dimensionamiento realizado:

Dimensionamiento - Tanque de alimentación		
Qalim	m3/día	78,15
θ_{alim}	días	2
Vútil	m3	156,30
hútil	m	3,68
ϕ_{alim}	m	7,36
ϕ_{alim} Seleccionado	m	7,40
hútil	m	3,63

hseg	m	0,50
Dimensiones (Construcción)		
hreal	m	4,13
Øalim	m	7,40
V real	m ³	177,81
Espesor	m	0,3

Tabla 5.10: Dimensionamiento del tanque de alimentación (T-01). Fuente: elaboración propia.

5.4.2 Selección del agitador

El fluido a agitar presenta una viscosidad y densidad similar al agua. Para este tipo de fluidos la bibliografía nos recomienda el uso de agitadores tipo turbina o hélice. La potencia necesaria para la mezcla de los residuos se puede obtener a partir del volumen obtenido del tanque y los valores bibliográficos consultados. Según Metcalf & Eddy se requiere una potencia entre 0,00475 – 0,0078 KW/m³. Para el cálculo de la potencia necesaria se utilizará el valor máximo de la bibliografía mediante la siguiente ecuación:

$$P_{Agitador} = 0,00788 \frac{KW}{m^3} \times V_{\text{útil-alim}} (m^3)$$

Determinación de la potencia del agitador	
$P_{Agitador} (KW)$	1,23

Tabla 5.11: Determinación de la potencia del agitador. Fuente: elaboración propia.

Se ha seleccionado un agitador tipo hélice, es un agitador de flujo axial, que opera con velocidad elevada y se emplea para líquidos poco viscosos. Los agitadores de hélice más pequeños, giran a toda velocidad del motor, unas 1150 o 1750 rpm; los mayores giran de 400 a 800 rpm.

5.4.3 Selección del agitador comercial

Se seleccionó los agitadores tipo hélice de la marca Xylem modelo Flygt 4220 de 1,1 kW particularmente diseñado para la mezcla de purines ganaderos en procesos de biodigestión. Se optó por la utilización de dos unidades en simultáneo de modo que la potencia entregada por los mismos sea menor a la máxima y ante la eventualidad de un desperfecto técnico en una de las unidades, se pueda continuar operando con la unidad restante. A continuación, se presentan las características técnicas más importantes del equipo:

Características Técnicas - Flygt 4220		
Máxima velocidad	rpm	800
Potencia Nominal	kW	1,1
Voltaje	V	380/480

Empuje máximo	N	510
Eficiencia max	N/kW	530
Diámetro de la hélice	mm	370

Tabla 5.12: Características técnicas - Flygt 4220. Fuente: elaboración propia.



Imagen 5.1: Flygt 4220. Fuente: Flygt

Este modelo de agitadores se instala mediante un sistema particular denominado “BIS-1 Biogas Support System”. Este sistema permite:

- Mover el agitador a diferentes alturas sin abrir el digestor ni interrumpir el proceso.
- Girar la hélice +/- 45 grados en el plano horizontal
- Remover el mezclador fuera del digestor sin vaciar el tanque



Imagen 5.2: Soporte para agitadores de la marca Flygt. Fuente: Flygt.

5.5 Digestor Anaerobio de Mezcla Completa

En las plantas agrícolas para la producción de biogás se utilizan principalmente digestores verticales con agitación. En términos generales, los digestores consisten en un tanque de digestión

como tal, térmicamente aislado, además de un sistema de calentamiento, sistemas de mezclado y sistemas de descarga para los sedimentos y el digestato.

En este proyecto se plantea la utilización de un digestor industrial de hormigón armado colocado sobre el suelo.

La cubierta puede ser de hormigón armado, acero o de membranas plásticas. Las cubiertas de hormigón y de láminas de plástico son las más comunes. A partir de un determinado tamaño de digestor se necesita una columna central que soporte el peso de la cubierta. El sustrato es mezclado por agitadores ubicados dentro o al lado del digestor.



Imagen 5.3 y 5.4: Digestor en construcción. Fuente: Guía de planificación para proyectos de biogás en Chile.

5.5.1 Dimensionamiento del Digestor Anaeróbico

El volumen total del digestor comprende el volumen útil y un % de seguridad que da lugar a un borde libre por la posible formación de espumas. En este caso se utilizará un valor del 25%, el cual es recomendado por la bibliografía (Deublein y Steinhauser, 2011).

El volumen útil de digestión fue calculado en la sección 5.3.2 de “Digestión Anaeróbica”, dónde se aplicó el modelo cinético de Chen y Hashimoto al sistema alimentado y se seleccionó un tiempo de retención hidráulico de diseño.

$$V_{Digestor} = V_{\text{útil dig}} (1 + 0,25)$$

Al igual que en el tanque de alimentación, se adopta una relación 2:1 entre la altura con el \emptyset calculado siguiendo la metodología de Deublein y Steinhauser, 2011.

$$\emptyset = 2 h$$

$$V_{Digestor} = \frac{\pi \emptyset^2}{4} h_{Digestor} = \frac{\pi \emptyset^3}{8} \rightarrow \emptyset = \sqrt[3]{\frac{8V}{\pi}}$$

Una vez determinado el \emptyset , se adoptó un valor de acuerdo a los \emptyset estandarizados de membranas plásticas disponibles. Finalmente se determina la $h_{\text{útil-digestor}}$ y la $h_{digestor}$ con el \emptyset seleccionado mediante las siguientes relaciones:

$$V_{Digestor} = \frac{\pi \phi^2}{4} h_{Digestor} \rightarrow h_{Digestor} = \frac{V_{Digestor} \times 4}{\pi \phi^2}$$

$$V_{\text{Útil-Digestor}} = \frac{\pi \phi^2}{4} h_{\text{Útil-Digestor}} \rightarrow h_{\text{Útil-Digestor}} = \frac{V_{\text{Útil-Digestor}} \times 4}{\pi \phi^2}$$

En la siguiente tabla se observa el dimensionamiento realizado:

Dimensiones - Biorreactor		
QBR	m3/día	78,15
TRHalim	días	18
Vútil	m3	1406,72
Ødig	m	15,30
Ødig seleccionado	m	16,00
hútil	m	7,00
fseg	-	1,25
Dimensiones finales adoptadas		
Ødig seleccionado	m	16,00
hreal	m	8,75
Vdigestor	m3	1758,40
Espesor pared	m	0,5

Tabla 5.13: Dimensionamiento del biorreactor (DA). Fuente: elaboración propia.

5.5.2 Selección del Aislamiento Térmico

Los digestores requieren de aislamiento térmico para reducir las pérdidas de calor en el mismo. Se puede utilizar generalmente todo tipo de material aislante que se instala para aislar tuberías de calor, calderas, paredes de viviendas, etc.

El coeficiente de conductividad es un valor específico de cada material que significa la capacidad que tiene el material de conducir flujo calorífico, independientemente del espesor del material. Se considera un material como aislante cuando su coeficiente de conductividad es menor a 0,1 W/m·K. Este valor debe estar entre 0,03-0,06 para que se pueda utilizar en digestores. El espesor ideal del aislante debe ser entre 10-20 cm, no se debe utilizar espesores menor a 6 cm.

Se utilizan láminas trapezoidales de metal para proteger el material de aislamiento de los efectos del clima. La tabla siguiente presenta algunos ejemplos de materiales de aislamiento:

Material de aislamiento	Conductividad térmica (W/m·K)
-------------------------	-------------------------------

Materiales de aislamiento de fibra mineral (aprox. 20-40 kg/m ³)	0,030-0,040
Láminas de aislamiento de perlita (aprox. 150-210 kg/m ³)	0,045-0,055
EPS de espuma de partículas de poliestireno (15 kg/m ³)	0,030-0,040
EPS de espuma de partículas de poliestireno (20 kg/m ³)	0,020-0,040
EPS de espuma de partículas de poliestireno (25 kg/m ³)	0,030-0,040
EPS de espuma de extrusión de poliuretano (30 kg/m ³)	0,020-0,035
Vidrio espuma	0,040-0,060

Tabla 5.14: Valores característicos de materiales aislantes. Fuente: Versión en español del manual de construcción de biodigestores, 2017.

Para el presente proyecto se ha optado por poner espuma de poliuretano de 10 cm de espesor y una chapa de revestimiento galvanizado de 40 mm de espesor.

5.5.3 Selección de la descarga del digestor

El digestor que se propone funciona de forma continua, es decir, se alimenta continuamente y no suele ser vaciado a lo largo de su vida útil. El equilibrio hidráulico viene determinado, por tanto, por la alimentación al digestor y la colocación de las tuberías de entrada y salida del mismo.

5.5.4 Selección del equipo de agitación

Al igual que el tanque de alimentación, se utilizó un valor mínimo de potencia requerida para la agitación del bioreactor:

$$P_{\text{Agitación}} = 0,00788 \frac{KW}{m^3} \times V_{\text{útil-Digestor}} (m^3)$$

Determinación de la potencia del agitador	
$P_{\text{Agitador}} (KW)$	11,08

Tabla 5.15: Determinación de la potencia del agitador. Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a la bibliografía consultada, para tanques de diámetro mayor a 13 metros y menor a 20 metros, se suelen utilizar 2 agitadores los cuales deben distribuirse en diferentes alturas del tanque. Para este proyecto se seleccionó los modelos Flygt 4460 Biogas Mixer los cuales funcionan a bajas velocidades para un empuje máximo con un consumo de energía mínimo. Otra particularidad es que este modelo permite el ajuste de su profundidad y el ángulo, ofreciendo así una configuración más flexible para optimizar la producción de biogás y evitar perturbaciones en el proceso.

Características Técnicas - Flygt 4460		
Máxima velocidad	rpm	69
Potencia Nominal	kW	7,5
Voltaje	V	380/480
Empuje máximo	N	2860

Diámetro de la hélice	mm	1250
-----------------------	----	------

Tabla 5.16: Características técnicas - Flyght 4460. Fuente: elaboración propia.

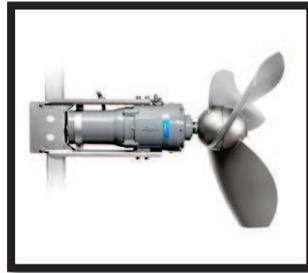


Imagen 5.5: Flyght 4460. Fuente: Flygt

En este caso se optó por utilizar 4 unidades equitativamente distribuidas en el reactor, de manera tal que los mismos no operen a su máximo de capacidad en condiciones normales y dada la rotura de uno de los dispositivos el sistema puede suplir la potencia de mezclado requerida.

Al igual que el modelo Flygt 4220 utilizado en el tanque de alimentación, este modelo de agitadores se instala mediante el sistema "BIS-1 Biogas Support System" cuyas características fueron descritas en la sección 5.4.3 de la memoria de cálculo.

5.6 Intercambiador de Calor

Si bien existen, diversos sistemas para calefaccionar el efluente a digerir, en este proyecto se ha optado por un sistema de calentamiento externo mediante un intercambiador de calor.

5.6.1 Dimensionado del intercambiador de calor

Para llevar a cabo el dimensionado del intercambiador de calor haremos uso del método logarítmico de temperaturas (LMTD). Según este método son seis los pasos a seguir en el diseño:

- ✓ Seleccionar el tipo de intercambiador apropiado para la aplicación
- ✓ Determinar las temperaturas y la velocidad de transferencia de calor mediante el balance de energía.
- ✓ Calcular el incremento de temperatura medio logarítmico (ΔT_{ml})
- ✓ Obtener, seleccionar o calcular el coeficiente de transferencia global de calor U.
- ✓ Calcular el área superficial, A_s .
- ✓ Seleccionar un intercambiador con A_s igual o mayor a la calculada.

5.6.1.1 Selección del tipo de intercambiador

Los factores principales a tener en cuenta en la elección de un tipo de intercambiador dado para un servicio concreto, son las siguientes:

- Temperatura de trabajo, y estado (líquido o vapor) de los fluidos.
- Presiones de las corrientes, y pérdidas de presión admisibles.
- Caudales de los fluidos.
- Posibilidad de ensuciamiento del aparato. Las incrustaciones actúan como una resistencia al paso del calor, dificultándolo.
- Acción corrosiva de los fluidos.
- Espacio disponible para la instalación.

Para el presente proyecto se ha seleccionado un intercambiador de calor externo de tipo doble tubo en flujo contracorriente. Los intercambiadores de doble tubo son el tipo más simple que se puede encontrar de tubos rectos. Consiste en dos tubos concéntricos, lisos o aleteados.



Imagen 5.6: Intercambiador de calor de doble tubo de la marca HRS. Fuente: HRS.

Constructivamente están constituidos por juegos de tubos concéntricos, conectados por uniones en forma de "T", cabezales de retorno y codos en "U" según el esquema de la figura X:

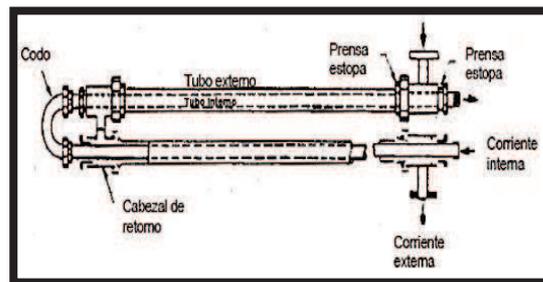


Figura 5.4: esquema de una horquilla en intercambiador de calor de doble tubo. Fuente: Operaciones unitarias en ingeniería química, 7ma edición.

El esquema de la figura 9 representa una “horquilla” y se arma con tubo roscado o bridado común. Los intercambiadores de calor de doble tubo consisten en varias horquillas interconectadas de tal manera que se consiga el área de transferencia obtenida en los cálculos de dimensionamiento.

Se utilizan cuando el área de intercambio de calor oscila entre los 10-20 m² (≈100-200 ft²), y por lo tanto trabajan con valores bajos de calor de aproximadamente 300 kW. Entre las aplicaciones y usos más adecuados de los intercambiadores de doble tubo se encuentran los siguientes:

- Cuando un fluido es un gas, o un líquido viscoso, o su caudal es pequeño, mientras el otro es un líquido de baja viscosidad, o con alto caudal.
- Son adecuados para servicios con corrientes de alto ensuciamiento, con lodos sedimentables o sólidos por la facilidad con la que se limpian.
- Si hay una buena respuesta a la limpieza química o los fluidos no ensucian, las uniones pueden ser soldadas para resistir altas presiones de operación.

Asignación general de los flujos:

- El fluido más corrosivo o que presente mayor ensuciamiento debe ir por el lado interior del tubo (si va por el espacio anular corroerá ambos lados, y los tubos son más fáciles de limpiar)
- El fluido de mayor presión debe ir por el lado interior del tubo (razones de seguridad)
- El fluido más viscoso debe ir por el lado de menor área (se obtienen mejores coeficientes de película.)
- El fluido de mayor masa debe ir por el lado que garantice una mayor área.

Teniendo en cuenta estos criterios, en nuestro intercambiador, el fluido que circulará por el interior del tubo será el sustrato (fluido frío) y el fluido que circulará por el espacio anular será el agua de refrigeración del motor generador (fluido caliente).

5.6.1.2 Balance de energía y determinación de parámetros

Las necesidades de calor de un digestor vienen dadas por la cantidad de calor necesario para:

- Aumentar la temperatura del sustrato alimentado hasta la temperatura de proceso (35°C) previa alimentación al digestor.
- Compensar las pérdidas de calor que se producen a través de las paredes, fondo y cubierta del digestor.

Para el cálculo de “Q” realizamos un balance de energía a un volumen de control que encierra la totalidad del intercambiador y el digestor, para un flujo estacionario. En la figura X, podemos observar un esquema del proceso con las corrientes de entrada y de salida.

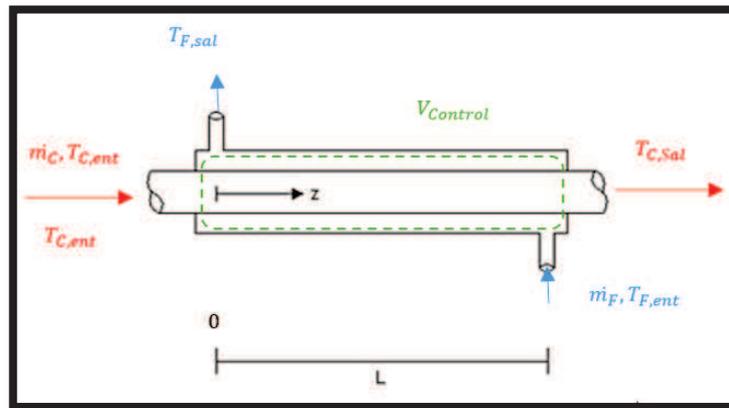


Figura 5.5: Diagrama de flujo - Intercambiador de calor de doble tubo en contracorriente. Fuente: elaboración propia.

Consideraciones

- Modelo de flujo pistón.
- Estado estacionario.
- Los flujos de los fluidos frío y caliente permanecen constantes.
- El coeficiente global de transferencia de calor (U) es constante en toda la trayectoria.
- Los calores específicos de ambos fluidos son constantes en toda la trayectoria.
- No hay cambios de fase en el sistema.
- Las pérdidas de calor en el intercambiador son despreciables.

La ecuación se reduce a un balance de entalpía puesto que no se realiza trabajo externo, no se transfiere calor al sistema si el intercambiador está bien aislado, y los cambios de energía cinética y potencial suelen ser insignificantes si se consideraran las pérdidas a través del digestor. Por lo tanto tenemos que el balance de energía queda de la siguiente forma:

$$Q = \dot{m}_C \cdot C_{p,C} (T_{C,ent} - T_{C,sal}) = \dot{m}_F \cdot C_{p,F} (T_{F,ent} - T_{F,sal}) + \text{Pérdidas en el digestor}$$

Dónde:

- \dot{m}_C : velocidad de flujo del fluido caliente, kg/s.
- \dot{m}_F : Velocidad de flujo del fluido frío, kg/s.
- C_p : Calor específico, J/kg·°C.

- $T_{C,ent}$: Temperatura del fluido caliente en la entrada, °C.
- $T_{C,sal}$: Temperatura del fluido caliente en la salida, °C.
- $T_{F,ent}$: Temperatura del fluido frío en la entrada, °C.
- $T_{F,sal}$: Temperatura del fluido frío en la salida, °C.
- Q: velocidad de transferencia de calor, W.
- Pérdidas de calor a través de las paredes, fondo y cubierta del digestor.

Comenzaremos analizando las pérdidas en el digestor, luego se analizarán los datos de densidad y calor específico de los fluidos y se procederá al cálculo de la velocidad de transferencia de calor, Q.

Cálculo de las pérdidas de calor en el digestor

Las pérdidas de calor a través de las paredes, fondo y cubierta del digestor, se calculan utilizando la siguiente expresión:

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T$$

Dónde:

- q = pérdida de calor (Kcal)
- U = Coeficiente global de transmisión de calor (Kcal/h·m²·°C)
- A = superficie a través de la cual se produce la pérdida de calor (m²)
- ΔT = Diferencia de temperatura entre el interior y el exterior (°C)

El coeficiente de transmisión de calor viene determinado por la siguiente expresión:

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{e_1}{k_1} + \dots$$

Siendo

- h_1 = kilocalorías transmitidas por un fluido de temperatura T_1 a la superficie S_1 en una hora para un grado centígrado de diferencia de temperatura y para un metro cuadrado de superficie.
- h_2 = kilocalorías transmitidas por un fluido de temperatura T_2 a la superficie S_1 en una hora para un grado centígrado de diferencia de temperatura y para un metro cuadrado de superficie (Kcal/h·m²·°C)
- e = espesor de la pared, m

- **k** = kilocalorías que pasan en una hora a través de un metro cuadrado de superficie del material cuando su espesor es un metro y la diferencia de temperatura entre sus caras es un grado centígrado.

Para el diseño de digestores pueden adoptarse los siguientes valores tomados de la bibliografía (Hernández Lehmann):

Coefficiente h:

Parámetro	Superficie en contacto	Coefficiente h $\left(\frac{KCal}{h m^2 ^\circ C}\right)$
h_{fango}	Pared Hormigón - fango	300
h_{aire}	Pared - aire	20
h_{suelo}	Pared - suelo	50

Tabla 5.17: Coeficientes de convección para diferentes superficies de contacto. Fuente: elaboración propia.

Coefficiente k:

Parámetro	Material de construcción	Coefficiente k $\left(\frac{KCal}{h m ^\circ C}\right)$
$k_{hormigón arm}$	Hormigón armado	1,4
$k_{hormigón masa}$	Hormigón en masa	1,1
$k_{poliuretano}$	Espuma de poliuretano	0,02

Tabla 5.18: Coeficientes de conductividad para diferentes materiales de construcción. Fuente: elaboración propia.

La determinación de las pérdidas de calor en el digestor se realizó considerando una temperatura del efluente de 35°C y la temperatura media del ambiente para el mes más frío y el más cálido en la localidad. Sin embargo, para el dimensionamiento se utilizó el valor correspondiente a la mayor pérdida de calor generada la cual resulta en invierno. Se considerará entonces que la temperatura del sustrato antes de entrar al reactor coincide con la temperatura media del mes más frío para la localidad bajo estudio.

Temperaturas		
T reactor	°C	35
T amb - Verano	°C	18
T amb - Invierno	°C	10,85

Tabla 5.19: Temperaturas medias de la localización del reactor y de operación (°C). Fuente: elaboración propia.

A continuación, se procede a determinar las pérdidas de calor en el digestor:

- **Pérdidas de calor en las paredes del digestor:**

Primero se determina la superficie de intercambio:

$$A_{pared} = 2 \pi r h$$

En segundo lugar, se determina el coeficiente global de transferencia a través de la pared según las constantes respectivas de conductividad y convección de los materiales y el medio.

$$U_{Pared} = \frac{1}{\frac{1}{h_{aire}} + \frac{e_{hormigón}}{k_{hormigón}} + \frac{e_{Poliuretano}}{k_{Poliuretano}} + \frac{1}{h_{fango}}}$$

Por último, calculamos las pérdidas de calor:

$$q_{Pared} = U \cdot A (T_{Digestión} - T_{Aire})$$

- **Pérdidas de calor en el fondo del digestor**

Primero calcularemos la superficie de intercambio:

$$A_{fondo} = \pi r^2$$

Segundo calculamos el coeficiente global de transmisión del fondo:

$$U_{fondo} = \frac{1}{\frac{1}{h_{Suelo}} + \frac{e_{hormigón}}{k_{hormigón}} + \frac{e_{Losa}}{k_{hormigón}} + \frac{1}{h_{fango}}}$$

- **Pérdidas de calor por la cubierta**

Las pérdidas de calor a través del techo son insignificantes, porque el techo está en contacto con gas dentro de la cubierta y rodeado de aire por fuera (Deublein y Steinhauser, 2011). Realizando esta consideración, no se consideraron las pérdidas de calor por la cubierta dado que en comparación a las pérdidas a través de las paredes del reactor y hacia el suelo resultan despreciables.

Pérdidas de calor totales del digestor:

$$q_{pérdidas} = q_{pared} + q_{cubierta} + q_{fondo}$$

Resultados de las pérdidas de calor:

Resultados - Pérdidas de Calor					
Pérdidas de calor en la pared del digestor			Pérdidas de calor en el fondo		
Asup - pared	m2	351,68	Asup - fondo	m2	201,06
Upared	Kcal/hm2°C	0,18	Upared	Kcal/hm2°C	1,36
qpared	Kcal/h	1569,74	qfondo	Kcal/h	6582,86
$q_{pérdidas}$ (Kcal/h)			8152,61		
$q_{pérdidas}$ (KW)			9,48		

Tabla 5.20: Determinación de las pérdidas de calor en el bioreactor. Fuente: elaboración propia.

Datos de densidad y calor específico de los fluidos

Aunque estemos trabajando con una mezcla de purines y silaje de maíz, se ha realizado la aproximación de tomar como propiedades de la mezcla, las propiedades del agua a la misma

temperatura. Se ha realizado esta aproximación ya que no se disponen de datos de densidad y calor específico del sustrato para distintas temperaturas y además el error cometido no será apreciable ya que dicha mezcla está formada mayoritariamente por agua.

T (°C)	ρ (kg/m ³)	c_p (kJ/kg·K)	$\mu \cdot 10^6$ (N·s/m ²)	$\nu \cdot 10^6$ (m ² /s)	$k \cdot 10^3$ (W/m·K)	$\alpha \cdot 10^6$ (m ² /s)	$\beta \cdot 10^3$ (1/K)	Pr
0.001	1005	4.213	1766	1.757	567.2	0.1339	-0.08021	13.12
5	1004	4.201	1506	1.500	574.8	0.1363	0.01135	11.00
10	1003	4.191	1300	1.297	583.0	0.1387	0.08744	9.348
15	1001	4.184	1135	1.134	591.4	0.1412	0.15230	8.033
20	999.5	4.180	1001	1.001	599.8	0.1436	0.20900	6.975
25	997.9	4.176	890.1	0.8920	608.0	0.1459	0.25940	6.114
30	996.2	4.175	797.6	0.8007	616.0	0.1481	0.3051	5.406
35	994.3	4.174	719.6	0.7238	623.6	0.1503	0.3470	4.817
40	992.4	4.174	653.3	0.6583	630.7	0.1523	0.3859	4.323
45	990.3	4.175	596.3	0.6022	637.4	0.1542	0.4225	3.906
50	988.1	4.177	547.1	0.5537	643.6	0.1559	0.4572	3.551
55	985.7	4.179	504.2	0.5115	649.3	0.1576	0.4903	3.245
60	983.2	4.182	466.6	0.4746	654.4	0.1592	0.5221	2.981
65	980.6	4.184	433.5	0.4420	659.1	0.1606	0.5528	2.752
70	977.9	4.188	404.1	0.4132	663.2	0.1620	0.5827	2.551
75	975.0	4.191	378.0	0.3877	666.9	0.1632	0.6118	2.375
80	971.9	4.195	354.6	0.3648	670.2	0.1644	0.6402	2.219
85	968.8	4.199	333.6	0.3443	673.0	0.1654	0.6682	2.081
90	965.5	4.204	314.6	0.3259	675.5	0.1664	0.6958	1.958
95	962.1	4.209	297.5	0.3092	677.5	0.1673	0.7230	1.848
100	958.5	4.214	281.9	0.2941	679.3	0.1682	0.7501	1.749

Figura 5.6: Propiedades del agua líquida a presión atmosférica. Fuente: S.A. Klein y F.L Alvarado, "Engineering Equation Solver Software (EES)", Academia Versión 6.271

Fluido frío (sustrato).

La densidad del fluido frío adoptado para los cálculos corresponde a la temperatura media del fluido frío entre la entrada y la salida, (\overline{T}_F).

$$\overline{T}_F = \frac{T_{F,ent} + T_{F,sal}}{2} \rightarrow C_{p(frío)} \rightarrow \delta_{Frío}$$

Por lo que, mediante interpolación obtenemos los datos de densidad y capacidad calorífica para el fluido frío (sustrato). A su vez, queda determinada la velocidad de flujo mediante la siguiente ecuación:

$$m_F \left(\frac{kg}{s} \right) = Q_{Alim} \left(\frac{m^3}{s} \right) \delta_{F,M} \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

La cantidad de calor necesaria para el calentamiento del sustrato y mantener la temperatura en el digestor de 35 °C será:

$$Q_{total} = m_F \cdot C_{p,F} (T_{F,ent} - T_{F,sal}) + Pérdidas en el digestor$$

La cuál podemos obtener con los resultados obtenidos. En la siguiente tabla se resumen los valores y la velocidad de transferencia de calor Q obtenida.

Resultados - Fluido frío		
Parámetro	Unidad	Valor
T entrada	°C	10,85
T sal	°C	35
T media	°C	12,075
densidad media	kg/m ³	998,7
Cp	J/Kg °C	4178
Q	m ³ /día	78,15
m _F	kg/h	0,903
q pérdidas	Kw	9,48
Qsustrato	Kw	91,15
Qtotal	Kw	100,62

Tabla 5.21: Resultados obtenidos para el fluido frío (sustrato). Fuente: elaboración propia.

De esta manera, se obtiene que el sistema de calefacción debe aportar 100,62 kW para calentar el sustrato a la temperatura de operación considerando las pérdidas de calor en el digestor.

Fluido caliente (agua)

La velocidad de flujo del fluido caliente queda determinada por la siguiente relación, dónde como se mencionó, la densidad y la capacidad calorífica dependen de la temperatura y el caudal depende del diseño del motor-generator.

$$m_c \left(\frac{kg}{s} \right) = Q_c \left(\frac{m^3}{s} \right) \delta_{c,M} \left(\frac{kg}{m^3} \right)$$

Una vez definido el caudal másico del fluido caliente y habiendo obtenido la velocidad de transferencia de calor, se debe buscar el valor de la temperatura de salida y de temperatura media que permita satisfacer la siguiente relación considerando que la densidad y la capacidad calorífica son función de la misma. La temperatura de entrada del agua y su caudal másico están determinadas por el motor-generator selecto. El modelo M08 CHP B333 circula el agua a una temperatura entre los 80°C y los 90°C a un caudal de $16,3 \frac{m^3}{h}$.

$$Q = m_c \cdot C_{p,c} (T_{c,ent} - T_{c,sal}) = Q_c \left(\frac{m^3}{s} \right) \delta_{c,M} \left(\frac{kg}{m^3} \right) C_{p,c} (T_{c,ent} - T_{c,sal})$$

Dónde:

$$\bar{T}_c = \frac{T_{c,ent} + T_{c,sal}}{2}$$

Para ello se realizan los siguientes pasos:

- Se supone un valor de $T_{C,sal}$ y se determina la \bar{T}_C
- Se determina la $C_{p,C}$ y la $\delta_{C,M}$ a la \bar{T}_C
- Luego reordenando la ecuación X, utilizando los valores de $C_{p,C}$ y la $\delta_{C,M}$ a la \bar{T}_C , se debe verificar que la $T_{C,sal}$ sea igual a la $T_{C,sal}$ supuesta.

$$T_{C,sal} = \left(T_{C,ent} - \frac{Q}{Q_C \left(\frac{m^3}{s} \right) \delta_{C,M} \left(\frac{kg}{m^3} \right) C_{p,C}} \right)$$

- En caso contrario, se toma el nuevo valor de $T_{C,sal}$ obtenida y se repite el proceso hasta que se verifique la condición.

A continuación, se pueden observar los resultados obtenidos:

Resultados – Intercambiador de calor		
Parámetro	Fluido frío (sustrato)	Fluido caliente
m (kg/s)	0,903	4,401
T_{ent} (°C)	10,85	80
T_{sal} (°C)	35	79,99
\bar{T} (°C)	22,93	80,00
C_p medio (J/kg·°C)	4178	4192,83
δ media (kg/m ³)	998,7	971,90
$Q_{calculado}$ (kW)	100,62	100,62

Tabla 5.22: Propiedades de los fluidos del intercambiador. Fuente: elaboración propia.

5.6.1.3 Cálculo del incremento de temperatura logarítmica (ΔT_{ml})

Para el cálculo de esta temperatura media logarítmica (ΔT_{ml}) se hace uso de la siguiente expresión, que para el flujo en contracorriente toma la forma:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{C,sal} - T_{F,ent}) - (T_{C,ent} - T_{F,sal})}{\ln \left(\frac{(T_{C,sal} - T_{F,ent})}{(T_{C,ent} - T_{F,sal})} \right)}$$

5.6.1.4 Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor U.

En el intercambiador el calor se transfiere del fluido caliente (agua refrigeración de motor-generador) hacia la pared del tubo interno, después a través de la pared por conducción y por último, de la pared hacia el fluido frío (sustrato) de nuevo por convección.

La resistencia térmica total contiene dos resistencias a la convección (externa e interna al tubo) y una a la conducción por el tubo interior del intercambiador.

Resulta conveniente combinar todas las resistencias que se encuentran en la trayectoria del flujo de calor de fluido caliente hacia el frío en una sola resistencia R y expresar la velocidad de transferencia entre los dos fluidos como:

$$Q = \frac{\Delta T_{ml}}{R_{Total}} = U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} = U_i \cdot A_i \cdot \Delta T_{ml} = U_o \cdot A_o \cdot \Delta T_{ml}$$

Cancelando ΔT_{ml} , la ecuación queda de la siguiente forma:

$$R_{Total} = R_i + R_{pared} + R_o = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o} = \frac{1}{U A}$$

Los subíndices i y o se refieren a la superficie interior y exterior del tubo, respectivamente, por su significado en inglés, in y out.

Para el intercambiador se tiene que:

$$A_i = \pi \Phi_i L \quad y \quad A_o = \pi \Phi_o L$$

- k es la conductividad térmica del material
- L la longitud de los tubos
- h_o son los coeficientes individuales de convección interior y exterior, respectivamente.
- r_i : radio interno del tubo interno, m.
- r_o : radio externo del tubo interno, m.

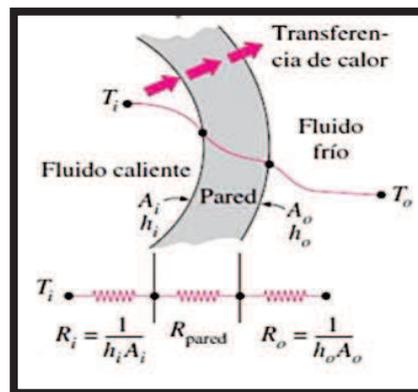


Figura 5.7: esquema de transferencia de calor a través del doble tubo. Fuente: *Operaciones unitarias en ingeniería química, 7ma edición.*

El rendimiento del intercambiador suele deteriorarse con el paso del tiempo como resultado de la acumulación de depósitos sobre las superficies de transferencia de calor. La capa de depósito

representa una resistencia adicional para la transferencia y provoca una disminución de la misma. El efecto neto de estas acumulaciones se representa por un factor de incrustación R_f el cual es una medida de la resistencia térmica introducida por la incrustación.

$$R_{Total} = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_o A_o} + \frac{R_{f,o}}{A_o} + \frac{R_{f,i}}{A_i} = \frac{1}{UA}$$

El coeficiente global de intercambio de calor no tiene significado a menos que se especifique el área sobre la cual se basa. En los intercambiadores de doble tubo es costumbre usar la superficie interior del tubo interno como la superficie de referencia. Por ello, se expresará el coeficiente global de intercambio de calor referido al área interior y en función del diámetro interior y exterior del tubo interno.

$$\frac{1}{U_i} = \frac{\phi_i}{h_o \phi_o} + R_{f,o} \frac{\phi_i}{\phi_o} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \phi_i}{2k} + R_{f,i} + \frac{1}{h_i}$$

Selección del diámetro y espesor de los tubos.

Las dimensiones y características de los tubos para estos intercambiadores, están dadas por la codificación IPS (Iron Pipe Sites, tabla siguiente) y el espesor está dado por el número de catálogo (cédula):

Dimensiones estándar y pesos (kg/m) - Sistema Inglés									
Diámetro nominal	Diámetro exterior	Schedule							
		5S		10S		40 S		80 S	
		Espesor de pared y peso							
Pulg.	(mm)	mm	kg/m	mm	kg/m	mm	kg/m	mm	kg/m
1/8	10.3	-	-	1.25	0.28	1.73	0.37	2.42	0.47
1/4	13.7	-	-	1.66	0.49	2.24	0.63	3.03	0.8
3/8	17.2	-	-	1.66	0.63	2.32	0.85	3.2	1.1
1/2	21.3	1.66	0.81	2.11	1	2.77	1.27	3.74	1.62
3/4	26.7	1.66	1.02	2.11	1.28	2.87	1.68	3.92	2.2
1	33.4	1.66	1.3	2.77	2.09	3.38	2.5	4.55	3.24
1 1/4	42.2	1.66	1.66	2.77	2.69	3.56	3.39	4.86	4.47
1 1/2	48.3	1.66	1.91	2.77	3.11	3.69	4.06	5.08	5.41
2	60.3	1.66	2.4	2.77	3.93	3.92	5.45	5.54	7.49
2 1/2	73	2.11	3.69	3.05	5.26	5.16	8.64	7.01	11.4
3	88.9	2.11	4.52	3.05	6.46	5.49	11.3	7.62	15.3
3 1/2	101.6	2.11	5.18	3.05	7.41	5.74	13.6	8.08	18.6
4	114.3	2.11	5.84	3.05	8.37	6.02	16.1	8.56	22.3

Figura 5.8: Dimensiones y pesos estándar para tubos de intercambiadores de calor. Fuente: Operaciones unitarias en ingeniería química, 7ma edición.

Las configuraciones más utilizadas incluyen tubos de acero al carbono, de longitud efectiva (es decir, la longitud de tubo empleada en una horquilla, igual al doble de la longitud de cada tubo) de 1,5 a 12 metros (más comunes 6,12, 15 y 20 pies), con las siguientes combinaciones de diámetros:

INTERCAMBIADOR IPS				
Pulg.	mm	Área de flujo		cm
		Anillo	Tubo	
		cm ²	cm ²	
2 x 1 1/4	50 x 32	7,67	9,67	2,32
2 1/2 x 1 1/4	57 x 32	16,98	9,67	5,13
3 x 2	76 x 50	18,90	21,64	3,89
4 x 3	100 x 76	20,25	47,41	2,89

Tabla 5.23: Valores característicos de materiales aislantes. Fuente: Versión en español del manual

En nuestro caso necesitaremos que el área de flujo en el espacio anular sea mayor que en el interior del tubo, puesto que el flujo del fluido caliente es mayor. Por lo tanto, se selecciona el arreglo: 2 1/2 y 1 1/4, puesto que el área del ánulo es más grande que el área del tubo.

Seleccionando de la tabla de dimensiones estándar para un n° de cedula intermedio de 40 (que determinará el espesor) se obtienen los siguientes valores para el tubo interior y exterior.

Tubería Seleccionada		
	Tubo interior	Tubo exterior
DN	1"1/4	2"1/2
Diámetro exterior	42,2 mm	73 mm
Espesor	2,77 mm	3,05 mm
Diámetro interior	39,43 mm	69,95 mm

Tabla 5.24: Descripción de la configuración seleccionada. Fuente: elaboración propia.

Cálculo del coeficiente individual de película interna, h_i

Para el cálculo de h_i , es preciso en primer lugar estimar las propiedades del fluido a la temperatura media entre la entrada y salida del intercambiador.

Datos necesarios para el cálculo de h_i			
Parámetro	Unidad	Fluido Frío	Fluido Caliente
m	kg/s	0,903	0,016
Tent	°C	10,850	80,000
Tsal	°C	35,000	78,170
Tprom	°C	22,925	79,085
Cp medio	J/Kg °C	4178,000	3462,412
dmedia	kg/m ³	998,700	972,467
μ media	(kg /m·s) . 10 ⁶	936,12	358,88
Kmedia	(w/m°C) . 10 ³	604,60	669,60
Prmedia	-	6,47	2,25

Tabla 5.25: Datos necesarios para la determinación del coeficiente individual de película interna h_i . Fuente: elaboración propia.

El cálculo del coeficiente de película interna se puede calcular a partir de la expresión que define el número de *Nusselt*, que es un número adimensional que representa la mejora de transferencia de calor a través de una capa de fluido como resultado de la convección en relación a la conducción a través de la misma capa:

$$Nu_d = \frac{h_i \phi_i}{k} \rightarrow h_i = \frac{Nu_d k}{\phi_i}$$

A su vez, es necesario conocer otra correlación empírica que depende del número de Reynolds (Re) y de Prandtl (Pr). Por lo tanto es necesario conocer primero el régimen de flujo en el que nos encontramos (que viene dado por el número de Reynolds) para así poder seleccionar la correlación del número de Nusselt que mejor se adapte a las condiciones de operación.

Para determinar Reynolds, primero definiremos $G \left(\frac{kg}{m^2 s} \right)$, como la velocidad másica, la cual viene dada por la siguiente expresión:

$$G = \frac{m}{A_S}$$

De esa manera, Reynolds queda definido según la siguiente ecuación:

$$Re = \frac{G \phi_i}{\mu}$$

En régimen turbulento completamente desarrollado se utiliza la siguiente correlación para el número de Nusselt:

$$Nu_d = 0,023 \cdot Re^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^n$$

- $n = 4$ Cuando $Re > 10000$ y $0,6 < Pr < 160$ para $T_{sal} > \bar{T}$
- $n = 3$ Cuando $Re > 10000$ y $0,6 < Pr < 160$ para $T_{sal} < \bar{T}$

Una vez determinado el número de Nusselt podemos calcular el coeficiente de transferencia de película interna, h_i

$$h_i = \frac{Nu_d k}{\phi_i}$$

Cálculo del coeficiente individual de película externa, h_o

Para conductos no circulares usaremos el diámetro equivalente (D_{eq}) para el cálculo de Re_D y Nu_D . En el caso que nos ocupa, el conducto es la sección anular entre los dos tubos concéntricos, por lo que el ϕ_{eq} vendrá dado por:

$$\phi_{eq} = \phi_i - \phi_o$$

Conocido esto, se comenzará por el cálculo del Reynolds para la corriente que circula por la sección anular de los tubos (agua caliente), mediante el diámetro equivalente y se obtendrá el número de Nusselt aplicando la misma ecuación que para fluido que circula por el interior del tubo. Una vez determinado el número de Nusselt podemos calcular el coeficiente de transferencia de película externa, h_o

$$h_o = \frac{Nu_d k}{\phi_{eq}}$$

Determinaciones - h _i			
Parámetro	Unidad	Fluido Frío (in)	Fluido Caliente (out)
G	kg/m ² s	739,80	1.800,34
Re	-	31.160,63	140.884,75
Nu	-	190,99	384,30
h	w/m ² °C	2.928,53	9.281,357

Tabla 5.26: Determinación de h_i. Fuente: elaboración propia.

Factores de incrustación interno y externo, R_{fi}, R_{fo}

Para la determinación de los factores incrustación se utilizaron tablas con valores típicos para intercambiadores de calor de doble tubo. Los mismos se estiman en función del tipo de fluido, la temperatura y la velocidad de flujo.

Fouling resistances for water in shell and tube heat exchangers (m ² K/W)				
Temperature of heating medium	Up to 120°C		120–200°C	
Temperature of water	50°C		Over 50°C	
	Flow velocity		Flow velocity	
Cooling water	≤ 1 m/s	> 1 m/s	≤ 1 m/s	> 1 m/s
Seawater	0.00009	0.00009	0.00018	0.00018
Brackish water	0.00035	0.00018	0.00053	0.00035
Cooling tower and artificial spray pond:				
Treated make up	0.00018	0.00018	0.00035	0.00035
Untreated	0.00053	0.00053	0.00090	0.00075
City or well water	0.00018	0.00018	0.00035	0.00035
River water:				
Clean	0.00035	0.00018	0.00053	0.00035
Normal	0.00053	0.00035	0.00070	0.00053
Sewer	0.00141	0.00090	0.00175	0.00141
Muddy or silty water	0.00053	0.00035	0.00075	0.00053
Hard (over 250 ppm)	0.00053	0.00053	0.00090	0.00090
Engine jacket	0.00018	0.00018	0.00018	0.00018
Distilled or closed circle	0.00009	0.00009	0.00009	0.00009
Treated boiler feedwater	0.00018	0.00009	0.00018	0.00018
Boiler blowdown	0.00035	0.00035	0.00035	0.00035

Figura 5.9: Factores de incrustación para agua en intercambiadores de calor de tubo (m² °C/W). Fuente: Warren L. McCabe, Operaciones Unitarias en Ingeniería Química

Determinación del factor de incrustación			
Parámetro	Unidad	Fluido Frío	Fluido Caliente
Área del flujo	m ²	0,00122	0,00262
velocidad	m/s	0,74	1,73
T _{prom}	°C	22,925	79,997
R _f	m ² °C/W	0,00053	0,00009

Tabla 5.27: Determinación del factor de incrustación para ambos fluidos. Fuente: elaboración propia.

Cálculo del coeficiente global de transferencia de calor U.

Conocidos ya los valores de los coeficientes individuales de película, tanto interna como externa y los factores de incrustación, se puede calcular el coeficiente global de transferencia de calor a partir de las resistencias.

Como se comentó al principio de este apartado, se expresará el coeficiente global de intercambio de calor referido al área de intercambio interior y en función del diámetro interior y exterior del tubo.

$$\frac{1}{U_i} = \frac{\phi_i}{h_o \phi_o} + R_{f,o} \frac{\phi_i}{\phi_o} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \phi_i}{2k} + R_{f,i} + \frac{1}{h_i}$$

Donde:

- U: coeficiente global de transferencia de calor referido al área interior, W/m².°C
- h_i: coeficiente individual de convección en el lado del fluido frío (interior tubo interior),
- h_o: coeficiente individual de convección en el lado anular, por donde va el fluido calefactor,
- d_i: Diámetro interno del tubo interior,
- d_o: Diámetro exterior del tubo interior,
- r_i: radio interno del tubo interior, m.
- r_o: radio externo del tubo interior, m.
- k: conductividad térmica del material, acero inoxidable

Y sustituyendo todos los valores:

$$\frac{1}{U_i} = \frac{\phi_i}{h_o \phi_o} + R_{f,o} \frac{\phi_i}{\phi_o} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right) \phi_i}{2k} + R_{f,i} + \frac{1}{h_i}$$

Existen tablas que dan intervalos representativos del coeficiente global de transferencia de calor para distintas configuraciones de intercambiadores de calor. Según la bibliografía consultada (flujo de Fluido y Transmisión de calor, Levenspiel), se puede considerar, para un intercambiador de calor de tubos concéntricos, con flujo a contracorriente y considerando el sistema agua-agua, el valor del coeficiente global de transferencia de calor estaría comprendido entre el 800 y 1500 W/m².°C.

5.6.1.5 Determinación del área superficial, A_s.

A partir de la ecuación de diseño del intercambiador se calculará el área necesaria para poder transferir el calor de un fluido a otro:

$$Q = U_i \cdot A_{int} \cdot \Delta T_{ml}$$

Despejando el área de intercambio:

$$A_{int} = \frac{Q}{U \Delta T_{ml}} \times 1,2$$

Se ha sobredimensiona el área de intercambio en un 20% como factor de seguridad. Para el cálculo de la longitud de intercambio, se define el área de intercambio como:

$$A_{int} = \pi \phi_i L \rightarrow L = \frac{A_{int}}{\pi \phi_i}$$

Las configuraciones más utilizadas incluyen tubos de acero inoxidable, de longitud efectiva (es decir, la longitud de tubo empleada en una horquilla, igual al doble de la longitud de cada tubo) de 1,5 a 12 metros (más comunes 12, 15 y 20 pies)

La longitud efectiva seleccionada será de 6m por lo tanto la longitud de cada tubo corresponderá a 3 m ($L_{efectiva} = 2 L_{tubo}$)

Y por lo tanto el n° de horquillas se calcula como:

$$N_{Horquillas} = \frac{L}{L_{efectiva}}$$

Resultados – Dimensión del IC		
U	W/m ² °C	920,83
As	m ²	1,99
As x (1,2)	m ²	2,38
Lcalc	m	19,24
Ltubo	m	3
n horquillas calc	-	6,41
n horquillas	-	7

Tabla 5.28: Resultados del dimensionamiento del Intercambiador de calor. Fuente: elaboración propia.

5.6.1.6 Resumen del intercambiador:

El calor intercambiado entre los dos fluidos $Q = 100,62$ kW, corresponde al calor necesario para elevar la temperatura del sustrato desde su temperatura de entrada (C) hasta la temperatura de operación del reactor (35°C) más el calor necesario para compensar las pérdidas que se producen en el digestor.

Por lo tanto, se ha seleccionado un intercambiador tubular con flujo en contracorriente. El sustrato (fluido frío) circula por el interior del intercambiador para facilitar la limpieza y el agua de

refrigeración del motor-generator (fluido caliente) circula a contracorriente por el espacio anular de los dos tubos.

El coeficiente global de transferencia de calor obtenido para el sistema es de $920,83 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$. La superficie de intercambio necesaria para la transferencia del calor es de $1,97 \text{ m}^2$, que se consigue mediante el uso de 7 horquillas interconectadas, de longitud efectiva igual a 6 m. La longitud de los tubos que forman cada horquilla es de 3 m.

5.6.2 Selección de un intercambiador comercial

Con estos datos se ha seleccionado el modelo DTR 168/129 de la marca HRS-Heat Echargers diseñado para aplicaciones industriales y medioambientales. Se utilizarán tubos de longitud de 3m y un total de 7 horquillas interconectadas.

MODELOS	LONGITUD (m)	ÁREA (m ²)	CONEXIÓN SERVICIO	CONEXIÓN PRODUCTO	CAUDAL MÁX SERVICIO (m ³ /hr)	CAUDAL MÁX PRODUCTO (m ³ /hr)	VOLUMEN SERVICIO (l)	VOLUMEN PRODUCTO (l)
DTR 51/25	3 - 6	0,4	DN40	DN15	13	4	8,2	2,5
DTR 64/38	3 - 6	0,6	DN40	DN25	17	10	10,3	5,7
DTR 76/51	3 - 6	0,9	DN40	DN40	18	18	14,1	11
DTR 104/64	3 - 6	1,1	DN65	DN50	43	29	29,7	16,9
DTR 104/76	3 - 6	1,3	DN65	DN65	33	41	21,5	24,8
DTR 129/104	3 - 6	1,8	DN80	DN80	37	77	26	46,4
DTR 168/129*	3 - 6	2,4	DN100	DN100	55	120	45,4	73,6

Área y volúmenes para modelos de 6m. * DTR 168/129: hasta 5 bares de presión en camisa.

Tabla 5.29: Modelos disponibles para intercambiadores de calor de doble tubo HRS. Fuente: HRS.



Imagen 5.7: Intercambiador de calor de doble tubo HRS. Fuente: HRS.

5.7 Almacenamiento de Biogás o Gasómetro

El volumen de almacenamiento de biogás se calcula en base a la producción de biogás y los consumos horarios de los generadores de energía eléctrica. Mientras que la producción de biogás es continua a lo largo del día, el consumo de gas de la caldera o cogenerador pueden ser variables,

dependiendo de la demanda. Por lo tanto se tiene que compensar esta diferencia disponiendo al biogás en tanques de almacenamiento apropiados.

Los tanques de almacenamiento de gas deben ser a prueba de fugas, a prueba de presión y resistentes al medio, a la luz ultravioleta, a la temperatura y a la acción del clima.

Se puede distinguir entre tanques de presión baja, media y alta.

- Los tanques de presión baja son los más comunes, operan a una presión calibrada de 0,5 a 30 mbar. Los tanques de presión baja están hechos de láminas plásticas que deben cumplir con los requisitos de seguridad. Estos tanques pueden estar instalados como cubiertas de gas en la parte superior de los digestores (tanques de almacenamiento integrado) o como instalaciones externas de almacenamiento.
- Tanques de almacenamiento de presión media y presión alta que almacenan el biogás a presiones operativas entre 5 y 250 bar en contenedores y balones presurizados de acero. Son caros y los costes operativos son altos, por lo que prácticamente nunca se usan en plantas agrícolas de biogás.

Tanques de almacenamiento integrado

Se usan cubiertas hechas de láminas plásticas para almacenar el gas en el digestor mismo o en el tanque de almacenamiento. Las láminas de plástico forman un sello a prueba de fuga de gas alrededor de la parte superior del tanque. En el tanque se coloca una estructura de soporte. Cuando no hay gas en el almacenamiento, las láminas plásticas están dobladas encima y se soportan con esta estructura.

Los tanques de almacenamiento de tipo techo flotante son comunes. Generalmente tienen una segunda lámina de plástico extendida encima de la lámina que retiene el gas para dar protección adicional contra el clima. Un soplador sopla aire dentro del espacio entre los dos laminados. Esto ayuda a que la lámina exterior se mantenga estirada todo el tiempo mientras que la lámina interior pueda adaptarse al volumen del biogás almacenado. Este sistema es capaz de mantener una presión de gas razonablemente constante.

En cuanto al tiempo de almacenamiento del biogás, se encontraron diferentes valores de acuerdo a la bibliografía consultada:

- Eder y Schulz (2006) indican una capacidad de almacenamiento de 5 a 12 horas de gas producción en el caso de cogeneración.
- Deublein y Deublein y Steinhauser, 2011 sugieren (2011) una capacidad de almacenamiento para 12– 18 horas de producción de gas para cogeneración.

- Gorisch y Helm recomiendan (2006) una capacidad de almacenamiento media para 4 horas de producción de gas.

Generalmente, el volumen de almacenamiento se elige en función de la disponibilidad de espacio y presupuesto. Muchas plantas de biogás funcionan con 2 a 3 horas de capacidad de almacenamiento. En el caso de los digestores de membrana se debe prever como mínimo un volumen de almacenamiento que cubra la producción de biogás de por lo menos 4 a 6 horas.

5.7.1 Dimensionado del gasómetro

El biogás se almacenará en la cubierta del digestor. En este caso se ha seleccionado una cubierta del tipo doble membrana. A continuación se presentan las características que deben tener las membranas de las cubiertas para digestores:

- ✓ Las membranas de cubierta tienen que ser de un material flexible. Si no son flexibles al inflarse se deforman y no regresan a su forma inicial. Se recomienda el uso de membranas de EPDM (Caucho Etileno Propileno Dieno tipo M ASTM).
- ✓ Deben ser resistentes a los rayos UV para que tengan una larga vida útil.
- ✓ Debe ser resistente a los ácidos y materiales agresivos.
- ✓ Debe tener un bajo índice de permeabilidad al biogás para que no se escape este por la cubierta.
- ✓ Resistir a las inclemencias del tiempo.
- ✓ Alta vida útil.

El biogás producido en el reactor anaerobio, es consumido inmediatamente por el motor, por lo que la instalación no necesita un gran depósito para el almacenamiento del biogás. En el caso de los digestores de membrana se debe prever como mínimo un volumen de almacenamiento que cubra la producción de biogás de por lo menos 4 a 6 horas.

Se dimensionó el gasómetro para que almacenara el gas generado en 5 h.

$$V_{\text{Biogás}} = Q_{\text{Biogás (35°C)}} \cdot \theta_{\text{gasómetro}}$$

El caudal de biogás a 35°C se obtiene a partir de la siguiente relación:

$$Q_{\text{Biogás (35°C)}} = Q_{\text{Biogás (0°C)(P=1atm)}} \frac{\text{Nm}^3}{\text{día}} \times \frac{308 \text{ °K}}{273 \text{ °K}}$$

Gasómetro - dimensionamiento		
$Q_{\text{Biogás}}$	Nm3 Biogás /día	2074,19
$Q_{\text{Biogás (35°C)}}$	m3 Biogás /día	2887,15
$\theta_{\text{gasómetro}}$	horas	5

$V_{\text{Biogás}}$	m ³	601,49
$\varnothing_{\text{alim}}$	m	16,00

Tabla 5.30: Dimensionamiento del gasómetro. Fuente: elaboración propia.

5.7.2 Selección del Gasómetro

En la siguiente imagen se muestran las variantes de diseño que proporcionan diferentes marcas proveedores de dobles membranas para gasómetros. Se ha seleccionado la cubierta en función del diámetro del digestor (16 m) que fue calculado anteriormente:

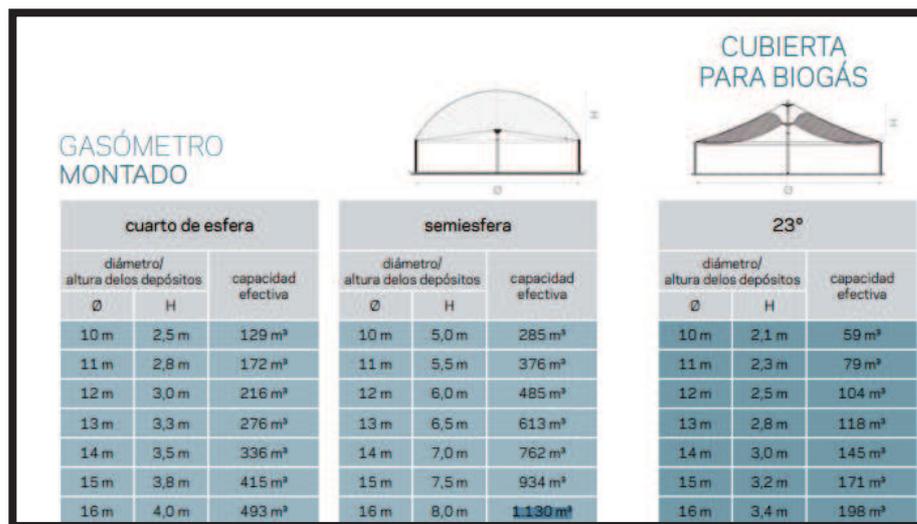


Figura 5.10: Marcas y propiedades de dobles membranas de PE para gasómetros. Fuente: SATTLER.

Dentro de las variantes de diseño, se selecciona la cubierta de doble membrana SATTLER DMGS TM, de forma semiesférica de 16m, como se observa la capacidad efectiva es superior a lo que se dimensionó y la presión máxima que alcanza es de 20mbar. Se prevé la instalación de una válvula de seguridad que regule la presión dentro del gasómetro a un valor de 15mbar.

5.8 Columna de adsorción de H₂S

En primera instancia se debe determinar el caudal másico de H₂S que contiene el biogás y la cantidad a remover para alcanzar los valores admisibles en el grupo de cogeneración. Para los fines del dimensionamiento, se consideró utilizar una concentración de H₂S en el biogás de 600 ppm y, si bien la misma resulta ser usualmente baja y aceptable para las necesidades de los grupos cogeneradores de energía, puede causar problemas de corrosión en el sistema. De esa manera, se propone una concentración de salida inferior a 50ppm de H₂S.

Para ello se realizaron los siguientes cálculos:

Antes que nada, se debe corregir el caudal de biogás a las condiciones de operación (35 °C, P= 1atm):

$$\dot{m}_{H_2S} = Q_{Biogás(35°C)} \times [H_2S]_{Biogás} \times \delta_{H_2S(35°C)}$$

Resultados		
Parámetro	Unidades	Valor
$Q_{Biogás}$	Nm3/h	86,42
$Q_{Biogás(35°C)}$	m3/h	97,50
$[H_2S]_{Biogás}$	mg/l	600,00
$\delta_{H_2S(35°C)}$	g/dm3	1,06
$\delta_{H_2S(35°C)}$	kg/L	0,85
Cálculos del H2S a eliminar		
\dot{m}_{H_2S}	g/hora	64,22
\dot{m}_{H_2S}	kg /día	1,54

Tabla 5.31: Resultados de determinaciones para la columna de adsorción de H2S. Fuente: elaboración propia.

A continuación se expone un diagrama de flujo del proceso analizado:

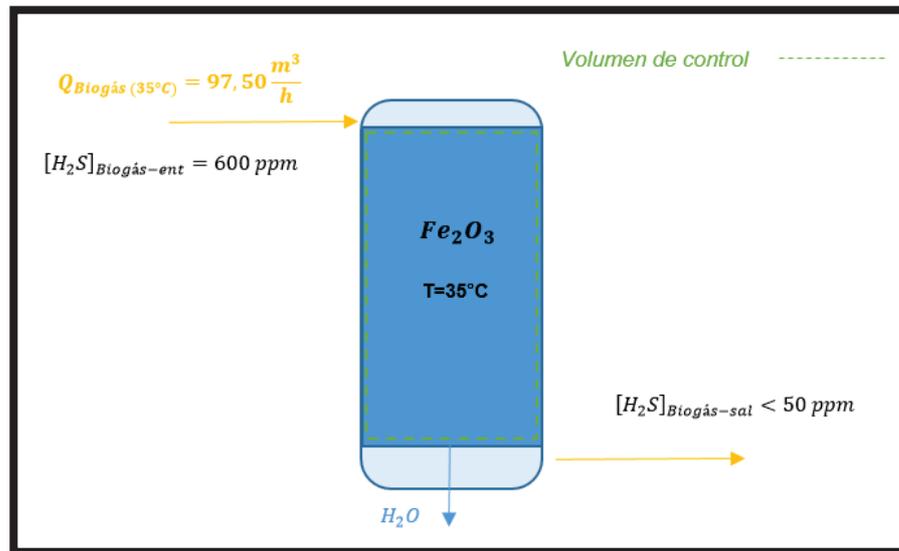
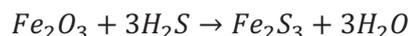


Figura 5.10: Diagrama de flujo de la adsorción de H2S con óxido férrico. Fuente: elaboración propia.

5.8.1 Consumo de óxido férrico

El dimensionamiento de los filtros de óxido de hierro se dimensiona en función de la cantidad de H_2S en el biogás crudo a eliminar y en base a la eficiencia de adsorción de los pellets de óxido de hierro. La capacidad de absorción $e_{adsorción} \left(\frac{g Fe_2O_3}{kg H_2S} \right)$ de azufre depende de la calidad de la masa de hierro. El proceso consiste en hacer reaccionar químicamente el H_2S de la corriente gaseosa con el óxido de hierro obteniéndose como productos el sulfuro ferroso (Fe_2S_3) y vapor de agua.



$$159,7 \text{ g} + 102 \text{ g} \rightarrow 207,7 \text{ g} + 54 \text{ g}$$

La cantidad de óxido férrico necesaria para eliminar el flujo másico de H₂S del biogás si la eficiencia resultara del 100% se calcula de acuerdo a la relación estequiometría de la reacción de la siguiente manera:

$$m_{Fe_2O_3} = \dot{m}_{H_2S} \times \frac{159,7 \text{ g } Fe_2O_3}{102 \text{ g } H_2S}$$

Se asume una eficiencia del 50% para los fines del dimensionamiento:

$$m_{Fe_2O_3} = \dot{m}_{H_2S} \times \frac{159,7 \text{ g } Fe_2O_3}{102 \text{ g } H_2S} \times 0,5$$

Para el dimensionamiento de la cantidad de óxido férrico se realizan las siguientes consideraciones:

- El medio filtrante debe durar 4 meses antes de ser reemplazado.

5.8.2 Dimensionamiento de la columna de adsorción

Se dimensionará el sistema de columnas de adsorción para una operación de 180 días, es decir, se procederá al recambio del material adsorbente cada 6 meses aproximadamente y dos columnas. Por lo tanto el filtro deberá contener óxido férrico para 180 días de funcionamiento:

$$m_{Fe_2O_3} = \dot{m}_{Fe_2O_3} \times 120 \text{ días}$$

Para la determinación del volumen, se utiliza el valor de la densidad promedio de los pellets de óxido férrico:

Propiedades físicas de las partículas sólidas de óxido férrico para la desulfuración		
Tamaño de partícula	mm	Φ (4,0±0,3) x (5-20)
Densidad de granel	kg/L	0,8-0,9
Superficie específica	m ² /g	70-80
Resistencia compresión	N/cm	80

Tabla 5.32: Propiedades físicas de las partículas de óxido férrico. Fuente: elaboración propia.

Se ha seleccionado un adsorbente comercial con las siguientes propiedades:

Condiciones de funcionamiento normal		
Temperatura	°C	15-55
Presión de funcionamiento	MPa	4
Tiempo de contacto	Segundos	30
Velocidad espacial	h-1	Máx. 1500
Relación de longitud y diámetro	-	2-6
Contenido de H ₂ S de la entrada	mg/m ³	Max. 5000
Contenido de H ₂ S de la entrada	mg/m ³	Max. 0,1

Tabla 5.33: Condiciones de funcionamiento normal de la columna de adsorción. Fuente: elaboración propia.

En base a la densidad, se calculará el volumen del lecho sólido:

$$Vol_{Fe_2O_3} = \frac{m_{Fe_2O_3}}{\delta_{Fe_2O_3}}$$

Para el dimensionamiento del lecho, se considera un contenedor cilíndrico de acero inoxidable. Respecto a la velocidad superficial del biogás en el lecho, la bibliografía recomienda, que ésta debe estar comprendida entre 5 y 50 cm/s. Se selecciona una velocidad de diseño de 10 cm/s (0,10 m/s) para asegurar un tiempo de contacto suficiente entre la fase gaseosa y la sólida, y por lo tanto la sección transversal del lecho (S) y su diámetro se calculan a partir de la siguiente relación:

$$S = \frac{Q}{v} = \pi \frac{\phi^2}{4}$$

La altura del lecho se obtiene a partir del volumen y la superficie obtenidos:

$$h_{Fe_2O_3} = \frac{V_{Fe_2O_3}}{S_{Fe_2O_3}}$$

A su vez, se debe incluir un espacio adicional debajo del lecho sólido, para el soporte del lecho, y por encima y debajo del lecho para distribución y desconexión de la corriente de gas y para acceso físico del mismo. Se deben dejar de 1 a 1½ pies de cada lado.

$$h_{filtro} = h_{Fe_2O_3} + 2 \times (30,48 \text{ mm})$$

Por lo tanto las dimensiones finales del filtro quedan de la siguiente manera:

Dimensionamiento del filtro de H2S		
$Q_{Biogás (35^\circ C)}$	m3/h	97,50
v	m/s	0,1
$Vol_{Fe_2O_3}$	m3	0,49
ϕ	m	0,59
$h_{Fe_2O_3}$	m	1,82
h_{filtro}	m	2,43

Tabla 5.34: Dimensionamiento del filtro de H2S. Fuente: elaboración propia.

5.9 Trampa de humedad

La humedad contenida en el biogás se extrae por medio de un tanque que se instala antes del sistema de purificación del biogás. Se trata de un tanque de acero inoxidable en donde se almacena el condensado por golpeo del biogás contra una hoja de acero inoxidable. El condensado se descarga por medio de un sifón de descarga automática por presión o por medio de una llave de cierre.

El contenido en agua del biogás se obtuvo a partir de la composición de este, teniendo en cuenta el porcentaje de humedad (aproximándolo al del aire a 35°C), la temperatura y la producción de metano obtenida. La misma se realizó en la sección 5.3.4 y se obtuvo un valor de:

$$\dot{m}_{H_2O (Biogás)} = 90,10 \frac{kg H_2O}{día}$$

5.9.1 Selección de la trampa de humedad

Se utilizará una trampa de humedad modelo CP01 fabricado por “AquaLimpia Engineering”. La entrada y salida del biogás se colocan en la parte superior del tanque, La descarga se realiza a través de un sifón en forma automática cuando el nivel de condensado en el tanque sobrepasa el nivel de salida de la tubería del sifón. A continuación se muestra las características técnicas del mismo.

Especificaciones técnicas – Trampa de Humedad				
Modelo	Diámetro (mm)	Altura (mm)	Q biogás (Nm3/h)	Material
CP01	300	800	<200	Acero inoxidable

Tabla 5.35: Especificaciones técnicas trampa de humedad. Fuente: elaboración propia.



Imagen 5.8: Trampa de humedad. Fuente: Aqualimpia.

En el fondo del tanque se prevé una llave de cierre para vaciar el tanque y realizar tareas de limpieza.

5.10 Unidad de cogeneración

En el presente proyecto se quemará el biogás en una unidad de cogeneración.

5.10.1 Cálculos del generador

Para la determinación del equipo cogenerador a utilizar, resulta necesario evaluar los mismos a partir de sus características, determinando una serie de parámetros y realizando una serie de verificaciones que se explican a continuación.

En primer lugar se exponen los datos referidos a la producción de biogás y sus propiedades y las condiciones de operación del proyecto.

Datos - Cogeneración de Energía			
Parámetro	Descripción	Unidades	Valor
$Q_{Biogás}$	Producción de Biogás	Nm3/día	2148,01
%Metano	Composición de Metano en Biogás	%	62,8
PCI	Poder calorífico Inferior biogás (62,8%)	Kwh/Nm3	6,26
$T_{funcionamiento}$	Horas de Funcionamiento	h/año	8200

Tabla 5.35: Datos necesarios para el cálculo de la cogeneración de energía. Fuente: elaboración propia.

La energía primaria en el biogás se calcula de la siguiente forma:

$$E_{Biogás} = Q_{Biogás} \cdot PCI \text{ (62,8\% Metano)}$$

$$E_{Biogás} = Q_{Biogás} \cdot PCI \text{ (62,8\% Metano)}$$

$$P_{Biogás} = \frac{E_{Biogás}}{24 \frac{h}{día}}$$

Para cada equipo CHP analizado, se requieren los grados de eficiencia eléctrica (n_{elec}) y de eficiencia térmica para la producción de energía calorífica del generador (n_{Term}), los cuales vienen impuestos en las especificaciones técnicas de los mismos.

Con dichas eficiencias se determinan la potencia eléctrica y térmica a instalar de la siguiente manera:

Primero se determina la energía eléctrica producida al día aplicando el correspondiente valor de rendimiento la energía contenida en el biogás:

$$E_{Eléctrica} = n_{elec} \times E_{Biogás}$$

Para la estimación de la potencia a instalar hay que considerar las horas diarias de producción, en nuestro caso la planta opera de manera continua, por lo que se asume 24 horas de operación:

$$P_{Eléctrica} = \frac{E_{Eléctrica}}{24 \frac{h}{día}}$$

Es recomendable que el generador que se instale sea un 20% de mayor potencia que la calculada, por lo tanto la potencia del generador a instalar será de:

$$P_{Eléctrica \text{ a instalar}} = P_{Eléctrica} \times 1,2$$

La energía térmica producida al día, se calcula aplicando el correspondiente valor de rendimiento la energía contenida en el biogás

$$E_{Térmica} = n_{term} \times E_{Biogás}$$

La potencia térmica a instalar será de:

$$P_{Térmica \text{ a instalar}} = \frac{E_{Térmica}}{24 \frac{h}{día}} \times 1,2$$

Para la producción de energía eléctrica y térmica en kWh/año hay que considerar las horas reales de funcionamiento (factor de planta). Se debe restar las horas por mantenimiento y eventuales fallos en el sistema. Generalmente se estima un máximo de 8200 horas anuales de producción.

$$E_{Eléctrica} = P_{Eléctrica \text{ a instalar}} \times T_{funcionamiento}$$

$$E_{Térmica} = P_{Térmica \text{ a instalar}} \times T_{funcionamiento}$$

Requerimientos del grupo de cogeneración

A continuación se va a proceder a seleccionar un grupo de cogeneración para la instalación, para ello han de tenerse en cuenta ciertos puntos fundamentales para una buena selección:

- a) Se deberá seleccionar un motor que tenga un consumo de energía menor que la energía eléctrica generada por la misma.
- b) El motor deberá ser capaz de proporcionar una potencia térmica mayor a la determinada según los cálculos realizados en el dimensionamiento del intercambiador, donde considerábamos el calor necesario para elevar la temperatura del sustrato a la temperatura de trabajo (35°C) y compensar las pérdidas producidas en el digestor.
- c) La potencia eléctrica del generador debe ser superior a la potencia determinada según los cálculos.

5.10.2 Selección del grupo de cogeneración

Para el presente proyecto se ha seleccionado un grupo de cogeneración de la empresa, Schmitt Enertec el cual su instalación y compra se realiza mediante la empresa Zorg Biogas. Los modelos CHP que ofrece esta empresa son plantas de cogeneración compactas con recuperación de calor altamente eficiente y con un diseño innovador que permite una instalación fácil y que ahorra espacio.

En concreto se ha seleccionado el modelo M08 CHP B333. A continuación se exponen sus principales características técnicas los parámetros calculados y las verificaciones realizadas:

Especificaciones Técnicas – M08 CHP B333		
Fabricante	-	R Shmitt Enertec
Modelo ENERGIN	-	M08 CHP B333
Potencia Eléctrica	kW	333
Potencia Térmica	kW	367
Consumo de combustible	kW	802
Consumo Propio	kW	5,6
Eficiencia eléctrica	%	41,5
Eficiencia térmica	%	45,8
Eficiencia global	%	87,3

Tabla 5.36: Especificaciones técnicas del cogenerador de energía seleccionado. Fuente: Schmitt Enertec



Imagen 5.8: CHP modelo M08 CHP B333. Fuente: Schmitt Enertec

A continuación se presenta una tabla resumen con los parámetros obtenidos para este equipo:

Resultados del generador de energía			
Parámetro	Descripción	Unidades	Valor
$E_{Biogás}$	Energía Primaria en el Biogás	Kwh/d	12.984,41
$P_{Biogás}$	Potencia Primaria en el Biogás	KW	541,02
$E_{Eléctrica-día}$	Energía eléctrica generada por día	Kwh/día	5.388,53
$E_{Térmica-día}$	Energía térmica generada por día	Kwh/día	5.946,86
$E_{Eléctrica-año}$	Energía eléctrica generada por año	Mwh/año	1.841,08
$E_{Térmica-año}$	Energía térmica generada por año	Mwh/año	2.031,84
$P_{Eléctrica a instalar}$	Potencia Eléctrica a instalar CHP	KW	269,43
$P_{Térmica a instalar}$	Potencia Térmica a instalar CHP	KW	297,34

Tabla 5.36: Resultados de los cálculos del generador. Fuente: elaboración propia.

A su vez, se verifica que los tres requerimientos expuestos con anterioridad para el equipo se cumplen.

5.11 Tanque de estabilización del digestato

Según lo establecido por los Códigos de Buenas Prácticas Agrarias sobre el almacenamiento de estiércoles, podríamos sugerir que para el digestato, el volumen de almacenaje deberá ser suficiente para mantenerlo entre 1 y 4 meses antes de su distribución. Con la finalidad de reducir los costos de construcción, se ha seleccionado un tiempo de almacenamiento de 30 días.

Para evitar la formación de costras, el tanque de estabilización debe estar provisto de agitadores y no requiere de calefacción ni aislación térmica. En algunos casos el digestato aún puede contener una pequeña parte de materia orgánica degradable, la que puede generar biogás y olores. Por ello, se recomienda la incorporación de un techo hermético para evitar emanaciones, sobre todo en zonas cercanas a áreas pobladas o para proyectos de mediana a gran escala (mayores a 50 kW).

El tanque de almacenamiento dispondrá de una entrada de la mezcla digerida que viene del digestor y debe prever un pozo de bombeo para la extracción de los lodos que se asienten en el fondo del tanque.

5.11.1 Dimensionamiento del tanque de estabilización

$$V_{\text{útil tqe-estab}} = Q \cdot \theta_{\text{estab}}$$

Al igual que en el tanque de alimentación y el digestor, se adopta una relación 2:1 entre la altura con el \emptyset calculado siguiendo la metodología de Deublein y Steinhauser, 2011.

$$\emptyset = 2 h$$

$$V_{\text{Digestor}} = \frac{\pi \emptyset^2}{4} h_{\text{Digestor}} = \frac{\pi \emptyset^3}{8} \rightarrow \emptyset = \sqrt[3]{\frac{8V}{\pi}}$$

Una vez determinado el \emptyset , se adopta un valor que permita una facilitación constructiva y se determina la $h_{\text{útil-estab}}$ con el \emptyset seleccionado mediante las siguientes relaciones:

$$V_{\text{Útil-Digestor}} = \frac{\pi \emptyset^2}{4} h_{\text{Útil-Digestor}} \rightarrow h_{\text{Útil-Digestor}} = \frac{V_{\text{Útil-Digestor}} \times 4}{\pi \emptyset^2}$$

Fijada la $h_{\text{útil-estab}}$ se determina el de la siguiente manera:

$$h_{\text{estab}} = h_{\text{seg}} + h_{\text{útil-estab}}$$

$$V_{\text{útil-estab}} = \frac{\pi \emptyset^2}{4} h_{\text{útil-estab}} \rightarrow \emptyset_{\text{estab}} = \sqrt[2]{\frac{4 V}{\pi h_{\text{útil-estab}}}}$$

Una vez determinado el \emptyset , se adoptó un valor redondeado para facilitar las operaciones constructivas y se determinó la altura útil mediante la siguiente relación:

$$V_{\text{útil-estab}} = \frac{\pi \emptyset^2}{4} h_{\text{útil-estab}} \rightarrow h_{\text{útil-estab}} = \frac{4 V_{\text{útil-estab}}}{\pi \emptyset^2}$$

En la siguiente tabla, se pueden observar los resultados obtenidos:

Tanque de Estabilización		
Parámetro	Unidad	Valor
Q	m ³ /día	78,15
θ_{estab}	días	30,00
$V_{\text{útil tqe-estab}}$	m ³	2344,53
$h_{\text{útil-estab}}$	m	6,75
\emptyset_{estab}	m	21,03
h_{estab}	m	7,25
Dimensiones finales adoptadas		
$h_{\text{estab-adoptado}}$	m	7,25
$\emptyset_{\text{estab-adoptado}}$	m	21,00
$V_{\text{estab-adoptado}}$	m ³	2511,11
Espesor	m	0,3

Tabla 5.37: Resultados y dimensionamiento del tanque de estabilización. Fuente: elaboración propia.

5.11.2 Selección del equipo de agitación

Al igual que en los otros sistemas de agitación, se utilizó un valor mínimo de potencia requerida para la agitación del tanque de estabilización:

$$P_{\text{Agitación}} = 0,00788 \frac{KW}{m^3} \times V_{\text{útil-tanque}} (m^3)$$

Determinación de la potencia del agitador	
$P_{Agitador} (KW)$	18,47

Figura 5.38 Determinación de la potencia del agitador. Fuente: elaboración propia.

De acuerdo a la bibliografía consultada, para tanques de diámetro mayor a 13 metros y menor a 20 metros, se suelen utilizar 2 agitadores los cuales deben distribuirse en diferentes alturas del tanque. Para este proyecto se seleccionó los modelos Flygt 4460 Biogas Mixer los cuales funcionan a bajas velocidades para un empuje máximo con un consumo de energía mínimo. Otra particularidad es que este modelo permite el ajuste de su profundidad y el ángulo, ofreciendo así una configuración más flexible para optimizar la producción de biogás y evitar perturbaciones en el proceso.

En este caso se optó por utilizar 4 unidades equitativamente distribuidas en el reactor, de manera tal que los mismos no operen a su máximo de capacidad en condiciones normales y dada la rotura de uno de los dispositivos el sistema puede suplir la potencia de mezclado requerida. Este modelo de agitadores se instala mediante el sistema “BIS-1 Biogas Support System” cuyas características fueron descritas en la sección 5.4.3 de la memoria de cálculo.

5.12 Diseño Hidráulico de la planta

Para el diseño hidráulico de la planta se han considerados diferentes líneas para el transporte de los fluidos implicados en la producción de biogás (sustrato, digestato, biogás). Además será necesario considerar el transporte del agua de refrigeración desde la unidad de cogeneración al intercambiador de calor.

En la siguiente tabla se procede a la descripción de cada línea. La figura X muestra un esquema de las líneas consideradas.

Líneas de conducción		
Línea	Fluido	Descripción línea
Línea 1: Alimentación digestor	Sustrato	Transporta al sustrato desde el tanque de mezcla hasta el intercambiador de calor y de esté hacia el digestor anaerobio.
Línea 2: Descarga del digestato	Digestato	Transporta al digestato hacia el tanque de Almacenamiento.
Línea 3: Agua de refrigeración	Agua	Transporta el agua de refrigeración del motor de cogeneración hasta el intercambiador de calor.
Línea 4: Biogás	Biogás	Transporta el biogás desde la cubierta del digestor hasta la trampa de humedad y el filtro de H ₂ S y de allí al motor de cogeneración.

Tabla 5.39: Descripción de las líneas de la planta. Fuente: elaboración propia.

5.12.1 Línea 1: Alimentación al digestor

Las tuberías deben dimensionarse hidráulicamente para los volúmenes de carga máxima y considerando todas las pérdidas del sistema. El diámetro que se seleccione para las tuberías

depende del tipo de biomasa que se va a conducir. Además se recomienda que el flujo de circulación a través de las conducciones corresponda a un flujo turbulento totalmente desarrollado, con el objetivo de evitar decantación de sólidos y la consecuente formación de costras.

Las tuberías de alimentación y conducción deben ser de PVC, HDPE, PE, acero galvanizado o acero inoxidable.

5.12.1.1 Selección del material

Para conducir el sustrato desde el tanque de alimentación, previo paso por el intercambiador de calor, hasta su descarga en la parte superior del digestor se han seleccionado conducciones de polietileno de alta densidad (PE 100).

5.12.1.2 Diseño hidráulico de la conducción 1

En este apartado se pretende definir el diámetro de la conducción 1, en base a la velocidad de flujo recomendada.

$$Q = A \cdot v_1 = \frac{\pi \phi_{in}^2}{4} v_1 \rightarrow \phi_{in} = \sqrt{\frac{4 Q}{\pi v_1}}$$

Dónde:

- $Q = \text{Caudal del sustrato} \left(\frac{m^3}{h} \right)$
- $v_1 = \text{velocidad del fluido en la línea de conducción 1} \left(\frac{m}{s} \right)$
- $\phi_{in} = \text{Diámetro interno de la tubería}$

Para hallar diámetro interno de la conducción es necesario conocer la velocidad con la que el fluido circula por su interior. Para ello se recurre a intervalos de velocidades encontrados en diferentes bibliografías. Para el transporte de sustratos de origen agrícola en sistemas de biodigestión se encontraron los siguientes valores:

- En Steainhauser se recomienda un intervalo de velocidad de $0,2 \text{ m/s} < v < 1,5 \text{ m/s}$.

A su vez, se optó por no seleccionar una tubería de diámetro interno inferior a 50 mm para evitar la obstrucción de la cañería. Se ha seleccionado una velocidad de flujo de 0,3 m/s, dado que cumple con la bibliografía consultada. Una vez determinada la velocidad y obtenido el diámetro interno se procede a seleccionar la tubería de polietileno de alta densidad a partir de la figura X, aplicando los siguientes criterios:

- El diámetro interno de la tubería comercial seleccionada debe ser igual o inmediatamente superior a la calculada.
- Las tuberías deberán tener un mínimo de 6 atmósferas de presión (PN 6 atm)

- Fabricados Bajo Normas:		- para conducción de AGUA: DIN 8074 - ISO 4427 - IRAM 13485																			
		- para conducción de GAS: BRITISH GAS - GE N 1-129																			
Presiones Nominales de Trabajo en Kgs/cm ² (bar) - con Factor de Seguridad "C" 1,25:																					
Factor C: 1,25	SDR 41			SDR 33			SDR 26			SDR 21			SDR 17			SDR 13,6			SDR 11		
Tubos en PE 80	—			4.1 bar			5.2 bar			6.3 bar			8.1 bar			10.2 bar			12.5 bar		
Tubos en PE 100	4.1 bar			5.2 bar			6.3 bar			8.1 bar			10.2 bar			12.5 bar			16 bar		
Diámetro	SDR 41			SDR 33			SDR 26			SDR 21			SDR 17			SDR 13,6			SDR 11		
Exteriores	espesor	diámetro	peso	espesor	diámetro	peso	espesor	diámetro	peso	espesor	diámetro	peso	espesor	diámetro	peso	espesor	diámetro	peso	espesor	diámetro	peso
	pared	interno	(Kg/m)	pared	interno	(Kg/m)	pared	interno	(Kg/m)	pared	interno	(Kg/m)	pared	interno	(Kg/m)	pared	interno	(Kg/m)	pared	interno	(Kg/m)
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
20	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
25	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
32	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
40	—	—	—	—	—	—	1.8	35.4	0.227	1.9	36.2	0.239	2.4	35.2	0.295	3.0	34.0	0.356	3.7	32.5	0.430
50	—	—	—	—	—	—	2.0	46.0	0.314	2.4	45.2	0.374	3.0	44.0	0.453	3.8	42.4	0.549	4.6	40.8	0.666
63	—	—	—	2.0	58.0	0.399	2.5	58.0	0.50	3.0	57.0	0.580	3.8	55.4	0.721	4.7	53.6	0.873	5.8	51.8	1.05
75	—	—	—	2.3	70.4	0.551	2.9	69.2	0.60	3.6	67.8	0.828	4.5	66.0	1.02	5.6	63.8	1.24	6.8	61.4	1.47
90	—	—	—	2.6	84.4	0.791	3.5	83.0	0.90	4.3	81.4	1.18	5.4	79.2	1.46	6.7	76.6	1.77	8.2	73.6	2.12
110	—	—	—	3.4	103.2	1.17	4.2	101.6	1.40	5.3	99.4	1.77	6.6	96.8	2.17	8.1	93.8	2.62	10.0	90.0	3.14
125	—	—	—	3.9	117.2	1.51	4.8	115.4	1.80	6.0	113.0	2.27	7.4	110.2	2.76	9.2	106.6	3.37	11.4	102.2	4.08
160	4.0	152.0	2.00	4.9	150.2	2.42	6.2	147.6	2.90	7.7	144.6	3.72	9.5	141.0	4.52	11.8	136.4	5.50	14.6	130.8	6.67
180	4.4	171.2	2.49	5.5	169.0	3.07	6.9	166.2	3.70	8.6	162.8	4.67	10.7	158.6	5.71	13.3	153.4	6.96	16.4	147.2	8.42
200	4.9	190.2	3.05	6.2	187.6	3.84	7.7	184.6	4.60	9.6	180.8	5.78	11.9	176.2	7.05	14.7	170.6	8.56	18.2	163.6	10.40
225	5.5	214.0	3.86	6.9	211.2	4.77	8.6	207.8	5.70	10.8	203.4	7.30	13.4	198.2	8.93	16.6	191.8	10.90	20.5	184.0	13.10
250	6.2	237.6	4.83	7.7	234.6	5.92	9.6	230.8	7.10	11.9	226.2	8.93	14.8	220.4	11.00	18.4	213.2	13.40	22.7	204.6	16.20
280	6.9	266.2	5.98	8.6	262.6	7.40	10.7	258.6	8.90	13.4	253.2	11.30	16.6	246.8	13.70	20.6	238.8	16.80	25.4	229.2	20.30
315	7.7	299.6	7.52	9.7	295.6	9.37	12.1	290.8	11.30	15.0	285.0	14.20	18.7	277.6	17.40	23.2	268.6	21.20	28.6	257.8	25.60
355	8.7	337.6	9.55	10.9	333.2	11.80	13.6	327.8	14.30	16.9	321.2	18.00	21.1	312.8	22.10	26.1	302.8	26.90	32.2	290.6	32.50
400	9.8	380.4	12.1	12.3	375.4	15.10	15.3	369.4	18.10	19.1	361.8	22.80	23.7	352.6	28.00	29.4	341.2	34.10	36.3	327.4	41.30
450	11.0	428.0	15.3	13.8	422.4	19.00	17.2	415.6	22.90	21.5	407.0	28.80	26.7	396.6	35.4	33.1	383.8	43.20	40.9	368.2	52.30
560	13.7	532.6	23.6	17.2	525.6	29.40	21.4	517.2	35.50	26.7	506.6	44.70	33.2	493.6	54.80	41.2	477.6	66.90	50.8	458.4	80.60
630	15.4	599.2	29.9	19.3	591.4	37.10	24.1	581.8	44.90	30.0	570.0	56.40	37.4	555.2	69.40	46.3	537.4	84.60	57.2	516.6	102.0

SDR: es un indicador de gran utilidad, utilizado internacionalmente, que define la relación entre el diámetro exterior y el espesor del tubo

Figura 5.11: Catálogo de tuberías de polietileno. Fuente:

A continuación se presentan los resultados:

Selección de tuberías de conducción – Línea 1						
Diámetro interior de la tubería calculado ϕ_i (mm)	Diámetro interior de la tubería Seleccionado ϕ_i (mm)	Diámetro Nominal seleccionado DN (mm)	v (m/s)	espesor (mm)	Peso (kg/m)	SDR
53,66	58,00	63	0,34	22,50	0,50	26

Tabla 5.40: Selección de la tubería de conducción de la Línea 1. Fuente: elaboración propia.

Se verifica y comprueba que se opera en condiciones de flujo completamente turbulento mediante el número de Reynolds.

5.12.2 Línea 2: Descarga del digestato

Esta línea transportara el digestato desde el digestor anaerobio hasta el tanque de almacenamiento del digestato.

5.12.2.1 Selección del material y diámetro.

Se utilizará la misma tubería seleccionada que en la línea de conducción 1. Se verifica y comprueba que se opera en condiciones de flujo completamente turbulento mediante el número de Reynolds.

5.12.3 Línea 3: Agua refrigeración

5.12.3.1 Selección del material

Para conducir el agua caliente (90°C) desde el sistema de refrigeración del motor- generador hasta el intercambiador de calor se han seleccionado tuberías de acero inoxidable AISI. 316.

Nomenclatura de la geometría de la tubería

Las tuberías se fabrican en dimensiones normalizadas por la American Society for Testing and Materials (ASTM –Asociación Americana para pruebas y Materiales), Tabla A14.4. Una característica importante es que el diámetro nominal (DN) no corresponde con el diámetro externo (DE) ni al diámetro interno (DI). Se mantiene constante el DE para los diferentes espesores de pared (e), por lo que el diseño del tubo se basa en esta característica. Se mide en pulgadas.

El sistema de conducción se ha diseñado en base a la normativa ANSI B31.3 del código ASME.

5.12.3.2 Diseño hidráulico de la conducción 3

Para calcular el espesor mínimo de las tuberías se hace uso de las ecuaciones que facilita el Código ASME B31.1.

$$t = \left(\frac{P_D \phi_o}{2 \cdot (S E + P_D Y)} + C \right) \cdot \left[\frac{1}{1 + \frac{M}{100}} \right]$$

Donde:

- t: espesor mínimo de tubería (m)
- P_D: presión de diseño (psi)
- ϕ_o : diámetro exterior de la tubería (m)
- S: tensión máxima permisible (psi)
- E: eficiencia a la soldadura
- Y: coeficiente que depende de la temperatura de diseño y del material de la tubería
- C: margen de corrosión (m)
- M: tolerancia de fabricación (m)

A continuación se calcula el valor de cada una de los parámetros que intervienen en la ecuación anterior:

Diámetro de la tubería

Al igual que en las líneas 1 y 2, el diámetro de la tubería de conducción 3 se obtiene a partir de la velocidad de flujo de operación. De la bibliografía encontramos que para conducciones metálicas de agua la velocidad recomendada es de $0,5 \text{ m/s} < v < 3 \text{ m/s}$.

Se ha seleccionado una velocidad de flujo de $1,5 \text{ m/s}$. De esa manera se determina el diámetro de la misma manera que en las líneas 1 y 2. Una vez determinada la velocidad y obtenido el diámetro interno se procede a seleccionar la tubería de acero inoxidable a partir de la tabla de dimensiones normalizadas que posea un diámetro nominal comercial inmediatamente superior de alta densidad a partir de la figura X.



diámetro exterior mm	diámetro pulgadas	DN	SCHEDULE 10 S			SCHEDULE 40 S	
			mm	Mate	brillo	mm	mate
13.7	1/4"		1.65	72602185			
21.34	1/2"	15	2.11	72602260	72603050	2.77	72602280
17.15	3/8"		1.65	72602210			
26.67	3/4"	20	2.11	72602320	72603085	2.87	72602340
33.40	1"	25	2.77	72602380	72603120	3.38	72602400
42.16	1"-1/4"	32	2.77	72602420	72603170	3.56	72602425
48.30	1"-1/2"	40	2.77	72602460	72603195	3.68	72602470
60.30	2"	50	2.77	72602480	72603225	3.91	72602490
73.03	2"-1/2"	65	3.05	72602500	72603256	5.16	72602505
88.90	3"	80	3.05	72602530		5.49	72602550
114.30	4"	100	3.05	72602600		6.02	72602620
141.30	5"	125	3.40	72602675		6.5	72602680
168.30	6"	150	3.40	72602730		7.11	72602740
219.08	8"	200	3.76	72602770		8.18	72602775
273.05	10"		4.19	72602790			
323.90	12"		4.57	72602850			

Figura 5.12: Configuraciones de tuberías de Acero inoxidable disponibles. Fuente: elaboración propia.

Presión de diseño (P_D)

La presión de diseño debe ser mayor que la presión de operación. Su valor será el mayor de los dos siguientes: 30 psi o 10% más de la presión de operación.

$$P_D = P_{operación} \times 1,1 = 1atm \times 1,1$$

$$P_D = 14,7 \text{ psi} \times 1,1 = 16,17 \text{ psi}$$

Por lo tanto se toma como presión de diseño 30 psi ya que es mayor que la presión de operación.

Tensión máxima admisible (S)

Con los datos del tipo de material (AISI 316) y la temperatura de operación 194 °F (90°C) se selecciona de la tabla siguiente el valor de la máxima tensión admisible:

$$S = 13300 \text{ psi}$$

Material/°C	-20,9 to 27,78	93,33	148,89	204,44	260,00	315,56	343,33	371,11	398,89	426,67	454,44	482,22	510,00	537,78	565,56	593,33
Material/°F	-20 to 100	200	300	400	500	600	650	700	750	800	850	900	950	1000	1050	1100
A 106 A	12	12	12	12	12	12	12	11,7	10,7	9	---	---	---	---	---	---
A 106 B	15	15	15	15	15	15	15	14,4	13	10,8	---	---	---	---	---	---
A 335 Gr P11	15	15	15	15	15	15	15	15	14,8	14,4	14	13,6	9,3	6,3	4,2	2,8
A 312 TP 316 L	15,7	13,3	11,9	10,8	10	9,4	9,2	9	8,8	8,6	8,4	---	---	---	---	---

Figura 5.13: Tensiones admisibles, s , (kpsi) para materiales ANSI a distintas temperaturas. Fuente: Norma ASME B31.1, apéndices.

Eficiencia de la soldadura (E)

Las tuberías del proyecto serán construidas sin costuras por lo que el valor de la eficiencia de la soldadura es la unidad ($E=1$).

Factor Y

El valor del factor Y se determina en función del tipo de material y la temperatura de operación haciendo uso de la siguiente tabla, para aceros al carbono a menos de 900°F el factor Y toma un valor de 0,4.

Materials	VALUES OF COEFFICIENT Y FOR $t < D/6$					
	Temperature, °C (°F)					
	≤ 482 (900 & Lower)	510 (950)	538 (1000)	566 (1050)	593 (1100)	≥ 621 (1150 & Up)
Ferritic steels	0.4	0.5	0.7	0.7	0.7	0.7
Austenitic steels	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7
Other ductile metals	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4
Cast iron	0.0

Figura 5.14: Valores del coeficiente Y. Fuente: Norma ASME B31.1, apéndices

Margen por corrosión (C)

Se determina asumiendo que el margen por corrosión es función del tiempo de vida de servicio deseado y el desgaste anual estimado. El tiempo de vida deseado se impondrá 25 años y un desgaste anual de 0,005 in (Perry, 2001). Por lo tanto:

$$C = 0,005 \frac{\text{in}}{\text{año}} \times 25 \text{ años}$$

Tolerancia de fabricación (M)

Al tratarse de tuberías sin costuras, la tolerancia en el espesor de pared para todas las tuberías del proceso es de un 12,5%. (Perry, 2001).

$$M = 12,5\%$$

Sustituyendo todos los valores de los parámetros en la ecuación se obtiene el espesor mínimo de tubería y una vez calculado el espesor mínimo requerido se selecciona el valor de espesor de tubería inmediatamente superior al calculado. A continuación se presentan los resultados:

Determinación del espesor mínimo de tubería		
Parámetro	Valor	Unidad
Diámetro interior de la tubería calculado (ϕ_i)	2,03	inch
Diámetro interior de la tubería seleccionada (ϕ_i)	2,07	inch
Diámetro Nominal seleccionado (DN)	2	inch
Diámetro exterior de la tubería seleccionada (ϕ_o)	2,37	inch
Presión de Diseño (P_D)	30	psi
Tensión Máxima admisible (S)	13300	psi
Margen por corrosión (C)	0,125	inch
Tolerancia por fabricación (M)	12,5	%
Espesor mínimo de tubería (t)	0,114	inch

Tabla 5.41: Determinación del espesor mínimo de tubería. Fuente: elaboración propia.

Una vez determinado el espesor mínimo requerido se selecciona el valor de espesor de tubería inmediatamente superior al calculado de la figura X, seleccionando Schedule 40S. Por último, recalculamos la velocidad del fluido por la tubería y comprobamos si nos encontramos en condiciones de flujo completamente desarrollado mediante el número de Reynolds (Re). A continuación se resumen las características de la tubería seleccionada:

Selección de tuberías de conducción – Línea 3					
Diámetro Nominal seleccionado DN (mm)	Diámetro interior de la tubería Seleccionado ϕ_i (mm)	Diámetro exterior de la tubería ϕ_o (mm)	v (m/s)	espesor (mm)	Schedule
50	52,5	60,30	1,58	3,91	40S

Tabla 5.42: Selección de las tuberías de conducción de la línea 3. Fuente: elaboración propia.

5.12.4 Línea 4: Biogás

El biogás es una mezcla corrosiva, por tanto se deben usar tuberías resistentes a la corrosión como tubos de acero inoxidable, galvanizados de acero (HG) y/o de PVC rígido o de caucho. Las plantas de biogás utilizan casi siempre manguera o tubería de polietileno, PVC, debido a que estos materiales no son afectados por la acción del ácido sulfhídrico

Las tuberías de gas deben dimensionarse para acomodar el volumen máximo de gas y a una velocidad de flujo recomendada para gases a baja presión.

5.12.4.1 Selección del material

Al ser el biogás una mezcla corrosiva la primera intención fue la de emplear tuberías de acero inoxidable, pero esta elección encarecería notablemente la instalación, por lo que se han seleccionado también tuberías de polietileno de alta densidad. Estas son resistentes al biogás, y no existirán problemas de deformación ya que la temperatura más alta dada en la instalación es 35 °C.

5.12.4.2 Diseño hidráulico de la conducción de biogás

Para el caso de la línea de biogás, se supone que la temperatura a lo largo de la línea se mantiene constante, así la densidad del biogás no variará y por lo tanto la velocidad del fluido tampoco. Para hallar el diámetro interno de la conducción es necesario conocer la velocidad con la que el fluido circula por su interior.

Para ello se recurre a intervalos de velocidades encontrados en la bibliografía:

- En Stainhauser se establece que la velocidad del biogás no debe superar los 10m/s para presiones superiores a los 16 bar y no debe superar los 5 m/s para presiones inferiores a los 16 bar.

De esa manera, se selecciona una velocidad de flujo de 5m/s para la línea de conducción del biogás. La determinación del diámetro se obtiene a partir de la misma ecuación utilizada en la línea de conducción 1, y se selecciona la tubería que tiene un diámetro interior comercial inmediatamente superior a partir de la figura X. Se verifica y comprueba que se opera en condiciones de flujo completamente turbulento mediante el número de Reynolds. A continuación se presentan los resultados obtenidos:

Selección de tuberías de conducción – Línea 4					
Diámetro interior de la tubería calculado \varnothing_i (mm)	Diámetro interior de la tubería Seleccionado \varnothing_i (mm)	Diámetro Nominal seleccionado DN (mm)	v (m/s)	espesor (mm)	Peso (kg/m)
101,01	103,2	110	3,35	3,40	1,17

Tabla 5.42: Selección de tuberías de conducción línea 4. Fuente: elaboración propia.

A continuación se presenta una tabla resumen de las conducciones:

Resumen de las líneas de conducción.						
Línea	Fluido	Material	Caudal (m ³ /h)	DN (mm)	DI (mm)	v (m/s)
Línea 1: Alimentación digestor	Sustrato (35°C)	PE 100 (SDR 26)	3,26	63	58	0,34
Línea 2: Descarga del digestato	Digestato (35°C)	PE 100 (SDR 26)	3,26	63	58	0,34
Línea 3: Agua de refrigeración	Agua (90°C)	AISI 316 (Sh 40)	16,30	50	52,5	1,59
Línea 4: Biogás	Biogás (35°C)	PE 100 (SDR 33)	100,97	110	103,2	3,35

Tabla 5.43: Resumen de las líneas de conducción. Fuente: elaboración propia.

5.13 Perdidas de carga

A medida que un fluido fluye por un conducto, tubo o algún dispositivo, ocurren pérdidas de energía debidas al rozamiento superficial del fluido sobre las paredes internas de la conducción. Tales pérdidas traen como resultado una disminución de la presión al pasar de un punto a otro en la dirección del flujo. Es muy importante estimar la magnitud de dichas pérdidas, ya que influirá directamente en la potencia necesaria de los equipos de impulsión para mantener un flujo determinado. En una red de tuberías, se distinguen dos tipos de pérdidas de carga:

Pérdidas mayores: las producidas en los tramos rectos de tubería. En el caso de flujo turbulento en una tubería sin cambios fortuitos en la sección transversal, es de práctica común admitir que las pérdidas por fricción son proporcional al cuadrado de la velocidad, la longitud de la conducción e inversamente proporcional al diámetro de la misma. Esto conduce a una forma de la ecuación de Fanning:

$$h_f = 2f \frac{L}{\varnothing} \frac{v^2}{g}$$

Donde:

- **h_f**: pérdida de carga en la conducción (m).
- **f**: factor de fricción de fanning, (adimensional).
- **L**: longitud de la conducción (m).
- **∅**: diámetro interno de la conducción, (m).

- v : velocidad del fluido, (m/s)
- g : aceleración de la gravedad, (9,8 m/s²)

El factor de fricción de Moody es un número adimensional que varía en función de la rugosidad relativa de la tubería y del número de Reynolds según el diagrama de Moody que se puede observar a continuación:

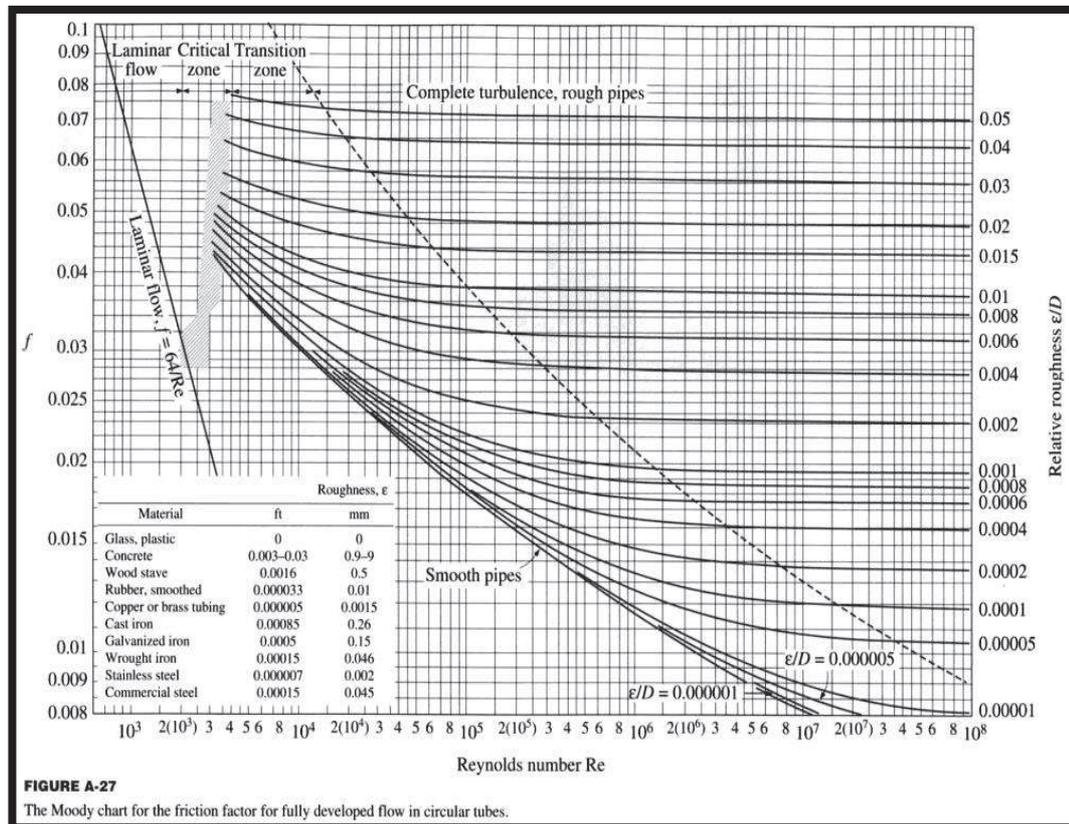


FIGURE A-27
The Moody chart for the friction factor for fully developed flow in circular tubes.

Figura 5.15: Gráfico de Moody. Fuente: Operaciones unitarias en ingeniería química

Para tubos lisos, el factor de fricción de fanning se puede obtener del gráfico de Moody o utilizando la correlación de Blasius:

$$f_f = \frac{0,0791}{Re^{1/4}} \quad \text{cuando } 2 \cdot 10^3 < Re < 10^5$$

Cuando se obtiene del gráfico de Moody, el factor de fricción de Darcy, f_D sigue la siguiente igualdad con el factor de fricción de Fanning:

$$f_D = 4 f_f$$

Para tubos rugosos, el factor de fricción de Fanning se obtiene mediante la correlación de Haaland:

$$\frac{1}{\sqrt{f_f}} = -3,6 \log_{10} \left[\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{e}{3,7\phi} \right)^{10} \right], \quad \text{cuando } 10^3 < Re < 10^8 \quad \text{y} \quad \frac{e}{\phi} < 0,05$$

Pérdidas menores: las producidas en accesorios tales como válvulas, codos, etc. Estas pérdidas energéticas, suelen ser pequeña en comparación con el rozamiento producido en la pared de las conducciones en que están localizados. Sin embargo, la suma de todas las pérdidas menores puede adquirir importancia y suponer incluso una fracción apreciable de la pérdida total.

Para evaluar estas pérdidas menores se puede utilizar el método de la constante o el método de la longitud equivalente (L_{eq}) definiéndose como la longitud de tramo recto de tubería que produciría las mismas pérdidas de carga que el accesorio.

$$h_{f-acc} = K_{acc} \frac{v^2}{2g} \quad \text{o} \quad h_{f-acc} = 4 f_f \frac{L_{eq}}{\phi} \frac{v^2}{2g}$$

Para ambos casos, se hará uso de los siguientes ábacos:

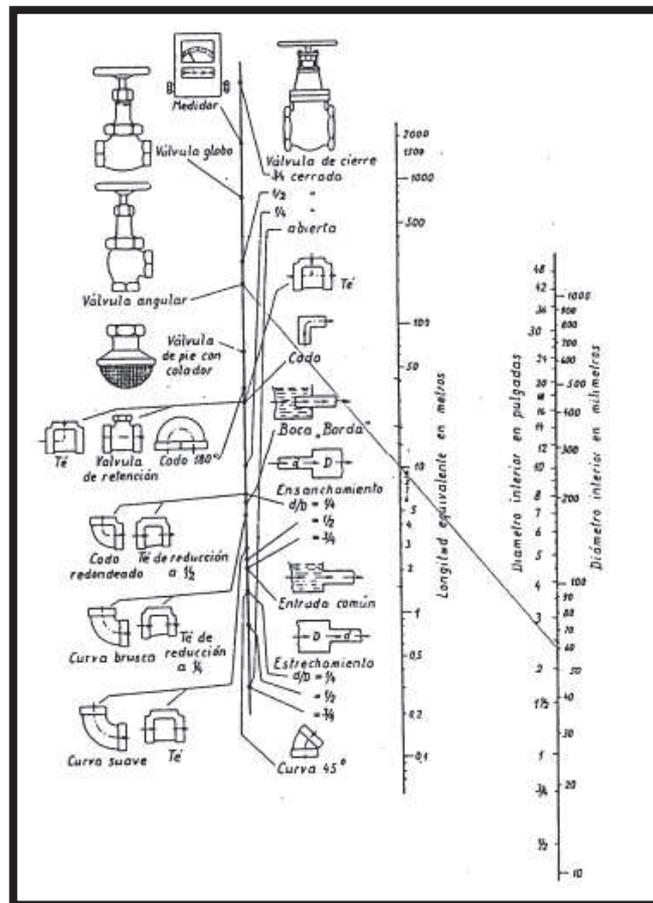


Figura 5.16: Ábaco para el cálculo de pérdidas de carga por accesorios. Fuente: Operaciones unitarias en ingeniería química

En el caso de conducción de gases (flujo compresible) hay que distinguir el patrón de flujo que tiene lugar, adiabático o isotérmico.

Se considerará que el flujo de gas se da en condiciones isotérmicas, es decir, se considera que la temperatura del gas a la entrada de la conducción es igual a la temperatura en la salida del proceso y por lo tanto, no se producirán cambios significativos en la densidad del fluido.

La ecuación general para el cálculo de pérdidas de presión en tuberías que albergan gases que fluyen en condiciones isotérmicas es la siguiente:

$$\frac{M}{2RT} = (P_2^2 - P_1^2) + G^2 \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) + (4f) \frac{G^2 L}{2 \emptyset}$$

Donde:

- **M**: peso molecular del gas, (kg/mol).
- **R**: constante universal de gases (J/mol·K)
- **T**: temperatura del gas (K)
- **G**: velocidad másica del gas (kg/m²·s)
- **f**: factor de fricción de Fanning
- **L**: longitud de la conducción (m)
- **D**: diámetro interno de la conducción, m.
- **P₁, P₂**: presión a la entrada y salida de la tubería, respectivamente (Pa)

Para el caso en los que la velocidad de flujo es inferior a 35 m/s, la anterior ecuación se simplifica a la llamada ecuación de Weymouth.

$$(P_1^2 - P_2^2) = \frac{RT}{M} (4f) \frac{G^2 L}{2 \emptyset}$$

Puesto que la velocidad de flujo de los gases en el presente proyecto es inferior a 35 m/s se utilizará la ecuación de Weymouth para cuantificar las pérdidas de carga.

5.13.1 Pérdidas de carga en la línea 1

La línea 1 transportará el sustrato del tanque de homogeneización hasta el digestor previo paso por el intercambiador. Por lo tanto se evaluarán en este apartado las pérdidas producidas en el tramo recto de tubería, las producidas en el intercambiador de calor y las pérdidas de carga por accesorios.

$$h_{f,\text{línea 1}} = h_{f,\text{tubo recto}} + h_{f,IC \text{ tubo}} + h_{f,acc}$$

Los datos hidráulicos de la conducción se resumen a continuación:

Propiedades de la conducción de la línea 1								
Línea	Fluido	Material	$Q \left(\frac{m^3}{h} \right)$	$v \left(\frac{m}{s} \right)$	ϕ_i (mm)	$\delta \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	$\mu \left(\frac{kg}{m \cdot s} \right)$	Re
Línea 1: Alimentación Digestor	Sustrato (35°C)	Polietileno de alta densidad	3,26	0,342	58	994,3	7,20E-04	32056

Tabla 5.44: Propiedades de la conducción de la línea 1. Fuente: elaboración propia.

El factor de rozamiento puede ser obtenido gráficamente mediante la gráfica de Moody a partir del valor de Reynolds para tubos lisos. En este caso:

$$f_f = 0,015$$

Para obtener la pérdida de carga generada por los tramos rectos de tubería en la línea 1 se aplicó la ecuación de Fanning y se muestran los resultados a continuación:

Determinación de la pérdida de carga – tubo rectos – Línea 1					
f_f	L (m)	ϕ_i (mm)	$v \left(\frac{m}{s} \right)$	$g \left(\frac{m}{s^2} \right)$	$h_{f,tubo\ recto}$ (m)
5,91E-03	15,28	58	0,34	9,81	0,037

Tabla 5.45: Pérdida de carga en tramo de tubos rectos, línea 1. Fuente: elaboración propia.

5.13.1.1 Pérdidas de carga en el intercambiador de calor (tubo interior)

En este apartado se evaluarán las pérdidas de carga producidas por el fluido que circula por el interior del tubo (fluido frío: sustrato). Para hallar la pérdida de carga en el interior del tubo se utiliza la ecuación de Fanning:

$$h_f = \frac{\Delta P}{\delta g} = 2f \cdot \frac{(L + L_{eq})}{\phi_i} \frac{v^2}{g}$$

Siendo:

- f: Factor de fricción
- G: Velocidad másica del sustrato.
- L: Longitud del tubo.
- D_i : Diámetro interior del tubo.
- ρ : Densidad media del sustrato.

Algunos términos se calcularon a lo largo del apartado de diseño del intercambiador, se expondrá una tabla con los valores de los mismos.

Parámetros de diseño – Intercambiador de Calor		
Parámetro	Unidad	Fluido Frío
\dot{m}_c	kg/s	0,903
G	kg/m ² s	739,80
Re	-	31.160,63

ϕ_{eq}	mm	39,43
δ_{media}	kg/m ³	998,7
L_{Tubo}	m	21
Nro de Horquillas	-	7

Tabla 5.44: Datos para la determinación de la pérdida de carga en el IC. Fuente: elaboración propia.

Se desconocen el factor de fricción y la L_{eq} de los accesorios (7 codos de 180°).

El factor de fricción f , se determina a partir del diagrama de Moody. La rugosidad absoluta (ϵ) para aceros inoxidables es de 0,002mm, por lo tanto la rugosidad relativa será:

$$\frac{\epsilon}{\phi_i} = \frac{0,002mm}{39,43mm} = 5,07 \cdot 10^{-5}$$

Utilizando la correlación de Haaland para tubos rugosos, se obtiene que:

$$f_f = 0,0223$$

En cuanto a la L_{eq} , se hace uso del ábaco antes mencionado, donde se obtiene el valor de L_{eq} en función del diámetro interior. Para un $\phi_i = 39,43mm$ y codo de 180° se obtiene una $L_{eq} = 2m$. Dado que son 7 codos de 180°, la $L_{eq} = 14m$.

Sustituyendo todos los valores en la primera ecuación obtenemos el resultado de la pérdida de carga.

Determinación pérdida de carga – Intercambiador de calor – Línea 1						
f_f	L_{recto} (m)	L_{eq-Acc} (m)	ϕ_{int} (mm)	v ($\frac{m}{s}$)	g ($\frac{m}{s^2}$)	$h_{f,IC}$ (m)
5,80E-03	21	14	37,94	0,74	9,81	0,599

Tabla 5.45: Pérdida de carga en el intercambiador de calor, línea de conducción 1. Fuente: elaboración propia.

5.13.1.2 Pérdidas de carga en la línea por accesorios

En la siguiente tabla quedan resumidos los accesorios utilizados en la línea de conducción y sus correspondientes longitudes equivalentes y constantes.

Accesorios - Línea 1				
Accesorio	Cantidad	ϕ_{int} (mm)	L_{eq-Acc} (m)	L_{eq-Acc} (m)
Curva Brusca	4	58,00	1,2	4,8
Valv. Retención	2		8	16
Valv. Compuerta	1		19	19
Total				39,8

Tabla 5.46: Accesorios utilizados en la línea 1. Fuente: elaboración propia.

Luego se determina la pérdida de carga por los accesorios:

Determinación de la pérdida de carga – Accesorios – Línea 1					
f_f	L_{eq} (m)	ϕ_i (mm)	v ($\frac{m}{s}$)	g ($\frac{m}{s^2}$)	$h_{f,Acc}$ (m)
5,91E-03	39,8	58	0,34	9,81	0,097

Tabla 5.47: Pérdida de carga por accesorios, Línea 1. Fuente: elaboración propia.

5.13.1.3 Pérdidas de carga total en la línea 1

Finalmente se determina la pérdida de carga total de la línea 1 como la sumatoria de todas las pérdidas de carga:

Pérdida de carga total – Línea 1			
$h_{f,tubo\ recto}$ (m)	$h_{f,IC\ tubo}$ (m)	$h_{f,acc}$ (m)	$h_{f,línea\ 1}$ (m)
0,037	0,590	0,097	0,725

Tabla 5.48: Pérdida de carga total, línea 1. Fuente: elaboración propia.

5.13.2 Pérdidas en la Línea 2: Descarga del digestato

La línea 2 transportará el digestato desde el digestor hasta el tanque de almacenamiento. Por lo tanto se evaluarán en este apartado las pérdidas producidas en el tramo recto de tubería y las pérdidas de carga por accesorios.

$$h_{f,línea\ 2} = h_{f,tubo\ recto} + h_{f,acc}$$

Los datos hidráulicos de la conducción se resumen a continuación:

Propiedades de la conducción de la línea 2								
Línea	Fluido	Material	Q ($\frac{m^3}{h}$)	v ($\frac{m}{s}$)	ϕ_i (mm)	δ ($\frac{kg}{m^3}$)	μ ($\frac{kg}{m \cdot s}$)	Re
Línea 2: Descarga del digestato	Digestato (35°C)	Polietileno de alta densidad	3,26	0,342	58	994,3	7,20E-04	32.056

Tabla 5.49: Propiedades de la conducción de la línea 2. Fuente: elaboración propia.

5.13.2.1 Pérdida de carga en el tramo recto de tubería

Para obtener la pérdida de carga generada por los tramos rectos de tubería en la línea 2 se aplicó la ecuación de Fanning y se muestran los resultados a continuación:

Determinación de la pérdida de carga – tubo rectos – Línea 2					
f_f	L (m)	ϕ_i (mm)	v ($\frac{m}{s}$)	g ($\frac{m}{s^2}$)	$h_{f,tubo\ recto}$ (m)
5,91E-03	11,92	58	0,34	9,81	0,029

Tabla 5.50: Determinación de pérdida de carga en tubos rectos, línea 2. Fuente: elaboración propia.

5.13.2.2 Pérdida de carga en la línea 2 por accesorios

En la siguiente tabla quedan resumidos los accesorios y sus correspondientes longitudes equivalentes:

Accesorios - Línea 2				
Accesorio	Cantidad	D (mm)	Leq (m)	Leq (m) total
Curva Brusca	1	58,00	1,2	1,2
Codo redondeado	1		1,6	1,6
Valv. Compuerta	3		19	57
Total				59,8

Tabla 5.51: Accesorios utilizados en la línea 2. Fuente: elaboración propia.

Luego se determina la pérdida de carga por los accesorios:

Determinación de la pérdida de carga – Accesorios – Línea 2					
f_f	$L_{eq} (m)$	$\phi_i (mm)$	$v \left(\frac{m}{s}\right)$	$g \left(\frac{m}{s^2}\right)$	$h_{f,Acc} (m)$
5,91E-03	59,8	58	0,34	9,81	0,146

Tabla 5.52: Pérdida de carga por accesorios en la línea 2. Fuente: elaboración propia.

5.13.2.3 Pérdidas de carga total en la línea 2

Finalmente se determina la pérdida de carga total de la línea 1 como la sumatoria de todas las pérdidas de carga:

Pérdida de carga total – Línea 2		
$h_{f,tubo\ recto} (m)$	$h_{f,acc} (m)$	$h_{f,línea\ 2} (m)$
0,029	0,146	0,175

Tabla 5.53: Perdida de carga total, Línea 2. Fuente: elaboración propia.

5.13.3 Pérdidas en la Línea 3: Agua de refrigeración

La línea 3 transportará el agua caliente procedente de la refrigeración del motor. Por lo tanto se evaluarán en este apartado las pérdidas producidas en el tramo recto de tubería, las producidas en el intercambiador de calor y las pérdidas de carga por accesorios.

$$h_{f,línea\ 3} = h_{f,tubo\ recto} + h_{f,IC\ tubo} + h_{f,acc}$$

Los datos hidráulicos de la conducción se resumen a continuación:

Propiedades de la conducción de la línea 3								
Línea	Fluido	Material	$Q \left(\frac{m^3}{h}\right)$	$v \left(\frac{m}{s}\right)$	$\phi_i (mm)$	$\delta \left(\frac{kg}{m^3}\right)$	$\mu \left(\frac{kg}{m.s}\right)$	Re
Línea 3: Agua de refrigeración	Agua (87°C)	Acero Inoxidable	3,25	0,770	38,6	968,8	3,54E-04	158591

Tabla 5.54: Propiedades de la conducción de la línea 3. Fuente: elaboración propia.

5.13.3.1 Pérdida de carga en el tramo recto de tubería

De nuevo, para el caso de flujo turbulento en una tubería sin cambios fortuitos en la sección transversal volvemos a hacer uso de la ecuación de Fanning. La rugosidad absoluta (ϵ) para aceros inoxidables es de 0,002mm, por lo tanto la rugosidad relativa será:

$$\frac{\varepsilon}{\phi_i} = \frac{0,002mm}{52,5mm} = 3,81 \cdot 10^{-5}$$

El valor de f (factor de rozamiento) puede ser calculado mediante la correlación de Halland.

$$f_f = 3,84 \cdot 10^{-3}$$

Utilizando la ecuación de fanning, se obtuvo la pérdida de carga para la conducción por tuberías:

Determinación de la pérdida de carga – tubo rectos – Línea 3					
f_f	$L (m)$	$\phi_i (mm)$	$v \left(\frac{m}{s}\right)$	$g \left(\frac{m}{s^2}\right)$	$h_{f,tubo\ recto} (m)$
3,84E-03	32	52,5	1,59	9,81	1,201

Tabla 5.55: Determinación de la pérdida de carga en tubos rectos, línea 3. Fuente: elaboración propia.

5.13.3.2 Pérdidas de carga en el intercambiador de calor (sección anular)

En este apartado se evaluarán las pérdidas de carga producidas por el fluido que circula por la sección anular del intercambiador de doble tubo (fluido caliente: agua refrigeración motor-generator).

Para hallar la pérdida de carga en el tubo exterior del intercambiador se utiliza la ecuación de Fanning, pero con el diámetro equivalente, D_{eq} .

Se desconocen el factor de fricción y la L_{eq} de los accesorios (7 codos de 180°). El resto de los términos se calculó en el apartado diseño del intercambiador de calor, se expondrá una tabla con los valores de los mismos.

Parámetro	Unidad	Fluido Caliente
\dot{m}_C	kg/s	4,401
G	kg/m ² s	1.800,34
Re	-	140.884,75
ϕ_{eq}	mm	27,75
δ_{media}	kg/m ³	971,90
L_{Tubo}	m	21
Nro de Horquillas	-	7

Tabla 5.56: Propiedades fluido caliente en el intercambiador de calor. Fuente: elaboración propia.

El factor de fricción f, se determina a partir del diagrama de Moody. La rugosidad absoluta (ε) para aceros inoxidables es de 0,002mm, por lo tanto la rugosidad relativa será:

$$\frac{\varepsilon}{\phi_{eq}} = \frac{0,002mm}{27,75mm} = 7,21 \cdot 10^{-5}$$

El valor de f (factor de rozamiento) se calculó mediante la correlación de Halland.

$$f_f = 4,25 \cdot 10^{-3}$$

En cuanto a la L_{eq} , se hace uso del ábaco antes mencionado, donde se obtiene el valor de L_{eq} en función del diámetro interior. Para un $\phi_{eq} = 27,75\text{mm}$ y codo de 180° se obtiene una $L_{eq} = 1,4\text{m}$. Dado que son 7 codos de 180° , la $L_{eq} = 9,8\text{m}$.

Los resultados se resumen en la tabla a continuación:

Determinación pérdida de carga – Intercambiador de calor – Línea 3						
f_f	L_{recto} (m)	L_{eq-Acc} (m)	ϕ_{eq} (mm)	v $\left(\frac{m}{s}\right)$	g $\left(\frac{m}{s^2}\right)$	$h_{f,IC}$ (m)
4,25E-03	21	9,8	27,75	1,73	9,81	2,871

Tabla 5.57: Pérdida de carga en el intercambiador de calor, línea 3. Fuente: elaboración propia.

5.13.3.3 Pérdidas de carga en la línea por accesorios

En la siguiente tabla quedan resumidos los accesorios y sus correspondientes longitudes equivalentes:

Accesorios - Línea 3				
Accesorio	Cantidad	D (mm)	Leq (m)	Leq (m) total
Curva Brusca	8	52,50	1,6	12,8
Valv. De retención	2		10	20
Valvula de esfera	2		20	40
Total				72,8

Tabla 5.58: Accesorios utilizados en la línea 3. Fuente: elaboración propia.

Usando la ecuación de Fannig para el cálculo de la pérdida de carga:

Determinación de la pérdida de carga – Accesorios – Línea 3					
f_f	L_{eq} (m)	ϕ_i (mm)	v $\left(\frac{m}{s}\right)$	g $\left(\frac{m}{s^2}\right)$	$h_{f,Acc}$ (m)
3,84E-03	72,8	52,5	1,59	9,81	2,732

Tabla 5.59: Pérdida de carga por accesorios en la línea 3. Fuente: elaboración propia.

5.13.3.4 Pérdidas de carga total en la línea 3 (agua calefacción)

Finalmente se determina la pérdida de carga total de la línea 3 como la sumatoria de todas las pérdidas de carga:

Pérdida de carga total – Línea 3			
$h_{f,tubo\ recto}$ (m)	$h_{f,IC\ tubo}$ (m)	$h_{f,acc}$ (m)	$h_{f,línea\ 3}$ (m)
1,201	2,871	2,732	6,803

Tabla 5.60: Pérdida de carga total en la línea 3. Fuente: elaboración propia.

5.13.4 Pérdidas en la Línea 4: Línea de biogás

La línea 4 transportará el biogás desde la cubierta del digestor hasta la trampa de humedad y el filtro de H_2S y de allí a la unidad de CHP. Por lo tanto se evaluarán en este apartado las pérdidas

producidas en el tramo recto de tubería del digestor a la trampa de humedad, las pérdidas producidas en la trampa de humedad y el filtro y las pérdidas de carga producidas en el tramo recto desde la salida del filtro hasta la unidad de CHP.

$$h_{f,\text{línea 4}} = h_{f,\text{tubo recto}} + h_{f,\text{acc}} + h_{f,\text{TH}} + h_{f,\text{H2S}}$$

Los datos hidráulicos de la conducción se resumen a continuación:

Propiedades de la conducción, línea 4.								
Línea	Fluido	Material	$Q \left(\frac{m^3}{h} \right)$	$v \left(\frac{m}{s} \right)$	$\phi_i \text{ (mm)}$	$\delta \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	$\mu \left(\frac{kg}{m \cdot s} \right)$	Re
Línea 4: Biogás	Biogás (35°C)	Polietileno de alta densidad	100,97	3,353	103,2	1,049	1,21E-05	31.314

Tabla: 5.61: Propiedades de la conducción de la línea 4.

5.13.4.1 Pérdida de carga en el tramo recto de tubería

Los tramos rectos de tubería se encuentran entre las diferentes unidades de purificación del biogás. Para analizar las misas se hace uso de la ecuación de Weymouth.

$$(P_1^2 - P_2^2) = \frac{RT}{M} (4f) \frac{G^2 L}{2 \phi}$$

Una vez conocidos todos los valores despejamos de la ecuación de Weymouth simplificada la presión a la salida de la conducción y procedemos a su cálculo:

$$P_2 = \left(P_1^2 - \frac{RT}{M} (4f) \frac{G^2 L}{2 \phi} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Se analizarán primero las pérdidas de cargas en el tramo desde el digestor hasta la trampa de humedad.

La presión 1 se determina de la siguiente manera:

$$P_1 = P_{atm} + P_{Biogás \text{ Gasómetro}} = 1atm + 15mbar = 102825$$

En la siguiente tabla se pueden observar los valores utilizados y el resultado obtenido:

Pérdida de carga tramo 1 - Línea 4		
Parámetro	Unidad	Valor
$M_{Biogás}$	kg/mol	0,026
R	J/mol°K	8,314
T	°K	308
G	kg/m2s	3,83
f	-	5,77E-03
L	m	12,23
ϕ	m	0,1032
P_1	Pa	103640
P_2	Pa	103620,91
ΔP_{tramo1}	Pa	19,09

Tabla 5.62: Determinación de la pérdida de carga en el tramo 1, línea 4.

5.13.4.2 Pérdidas de carga en la trampa de humedad

En este apartado se evaluarán las pérdidas de carga producidas por el biogás en la trampa de humedad. Se considerará la trampa como una expansión y contracción en el sistema. De manera tal que la pérdida de carga total considerada en la trampa de humedad será:

$$\Delta P_{TH} = \Delta P_{exp} + \Delta P_{contr}$$

Expansión brusca:

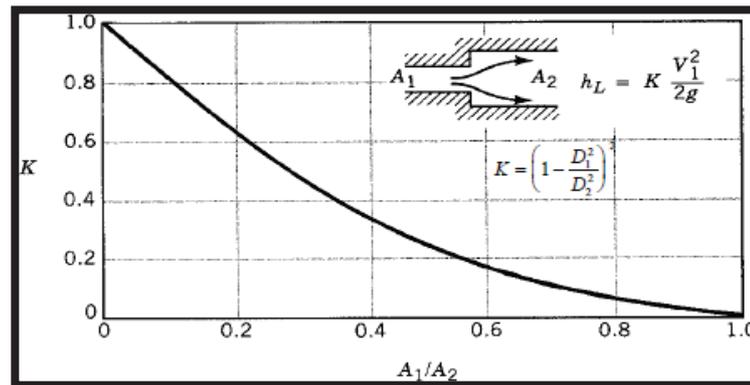


Figura 5.17: Coeficiente de pérdida (K) para expansión brusca. (Munson B. R. et al., 1994)

La pérdida de presión en una expansión brusca se calcula con la siguiente ecuación:

$$\Delta P_{exp} = P_2 - P_1 = K_{exp} \frac{G_1^2}{2 \delta} = \left(1 - \frac{D_1^2}{D_2^2}\right)^2 \cdot \frac{G_1^2}{2 \delta}$$

Dónde:

- ΔP_{exp} : Pérdida de presión por expansión.
- K_{exp} : Coeficiente de pérdida por expansión
- G_1 : Velocidad másica del biogás en la sección 1
- δ : densidad del biogás

Se considera que $D_2^2 \gg D_1^2$ por lo que $\frac{D_1^2}{D_2^2} \cong 0$ y por lo tanto $K_{exp} = 1$.

Contracción brusca:

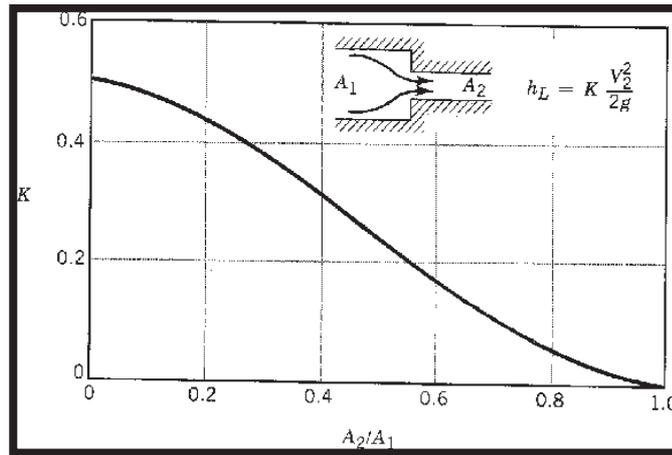


Figura 5.18: Coeficiente de pérdida (K) para contracción brusca. Fuente: (Munson B. R. et al., 1994)

La pérdida de presión en una contracción brusca se calcula con la siguiente ecuación:

$$\Delta P_{Contr.} = P_2 - P_1 = K_{contr.} \frac{G_1^2}{2 \delta}$$

Considerando que $D_1^2 \gg D_2^2 \rightarrow A_1 \gg A_2$, entonces observando la figura x, se puede observar que $K_{contr.} \approx 0,5$

A continuación se muestra en la siguiente tabla los parámetros utilizados y los resultados obtenidos:

Pérdida de carga TH - Línea 4		
Parámetro	Unidad	Valor
$\delta_{Biogás (35^\circ C)}$	kg/m ³	1,18
G	kg/m ² s	3,83
K_{exp}	-	1
$K_{contr.}$	-	0,5
ΔP_{exp}	Pa	6,20
$\Delta P_{Contr.}$	Pa	3,10
ΔP_{TH}	Pa	9,31

Tabla 5.63: Pérdida de carga en la trampa de humedad. Línea 4

5.13.4.3 Pérdidas de carga en filtro de H₂S

En este apartado se evaluarán las pérdidas de carga producidas por el biogás en el filtro de H₂S. Las pérdidas de carga en el filtro se estimarán como la suma de la pérdida de carga en el lecho sólido de partículas más las pérdidas de carga debida a la entrada (expansión brusca) y a la salida del filtro (contracción brusca).

Para cuantificar la pérdida de carga en un lecho de partículas se utiliza la ecuación de Ergun:

$$\Delta P_{Lecho} = (P_1 - P_2) = \left(\frac{150}{Re_p} + 1,75 \right) \frac{G^2 L}{\delta \phi_p} \frac{1 - \varepsilon}{\varepsilon}$$

Donde:

- P_1 y P_2 : presiones a la entra y salida del lecho respectivamente
- G : velocidad superficial másica del gas
- δ : densidad media del fluido a través del lecho
- L : Longitud del lecho de partículas
- ϕ_p : diámetro equivalente de partículas que constituyen el lecho
- ε : porosidad del lecho
- Re_p : número de Reynolds para lechos empacados

A continuación, se procede al cálculo de cada uno de los parámetros que intervienen en la ecuación.

Características de las partículas		
Parámetro	Unidad	Valor
Diámetro del cilindro	mm	4
Longitud del cilindro	mm	10
Cantidad de óxido férrico	kg	419,44
Densidad de partículas	kg/m ³	1370
Densidad a granel	kg/m ³	850

Tabla 5.64: Características de las partículas de óxido férrico. Fuente: elaboración propia.

La fracción vacía de un lecho empacado se define como:

$$\varepsilon = \frac{\text{Volumen de huecos en el lecho}}{\text{Volumen total del lecho}} = \frac{Vol_{Lecho} - Vol_{Particulas}}{Vol_{Lecho}}$$

El diámetro equivalente de las partículas, ϕ_p para un lecho empacado de partículas que no son esféricas, se define como:

$$\phi_p = \frac{6}{a_s} \qquad a_s = \frac{a_p}{V_p}$$

Donde a_s , es la superficie específica de una partícula, o superficie por unidad de volumen de relleno. Para lechos empacados, Ergun define el número de Reynolds:

$$Re_p = \frac{\phi_p v \delta}{(1 - \varepsilon)\mu}$$

Una vez conocidos todos los valores de la ecuación se calcula la pérdida de presión en el lecho, supondremos en principio, que la pérdida de presión a través del lecho es pequeña y no afecta sensiblemente a la densidad del gas:

Los parámetros obtenidos y los resultados se pueden observar en la tabla a continuación:

Resultados Pérdida de carga - Lecho		
Parámetro	Unidad	Valor
ε	-	0,38
a_s	1/m	1200
ϕ_p	m	0,005
Re_p	-	76,92
G	kg/m ² s	0,12
ΔP_{Lecho}	Pa	181,05

Tabla 5.65: Pérdida de carga en el filtro de H₂S. Fuente: elaboración propia.

5.13.4.4 Pérdida de carga en el tramo recto de tubería (filtro H₂S->unidad CHP)

La pérdida de carga en el tramo recto de tubería desde el filtro de ácido sulfhídrico a la unidad de cogeneración se obtiene de la misma manera que en la sección 5.13.4.1. Mediante la ecuación de Weymouth simplificada para obtener la presión a la salida de la conducción:

$$P_{salida} = \left(P_{entrada}^2 - \frac{RT}{M} (4f) \frac{G^2 L}{2 \emptyset} \right)^{\frac{1}{2}}$$

En este caso se define la P_1 de la siguiente manera:

$$P_{entrada} = P_1 - \Delta P_{tramo1} - \Delta P_{TH} - \Delta P_{Lecho}$$

A continuación se presenta una tabla con los resultados obtenidos:

Pérdida de carga tramo 2 - Línea 4		
Parámetro	Unidad	Valor
$M_{Biogás}$	kg/mol	0,026
R	J/mol°K	8,314
T	°K	308
G	kg/m2s	3,83
f	-	5,77E-03
L	m	15,38
\emptyset	m	0,1032
P_1	Pa	103431
P_2	Pa	103407
ΔP_{tramo2}	Pa	24,05

Tabla 5.66: Pérdida de carga en el tramo 2. Línea 4. Fuente: elaboración propia.

5.13.4.5 Pérdidas de carga total en la línea 4 (biogás)

Sumando todas las pérdidas se obtiene que:

Pérdida de Carga total – Línea 4				
ΔP_{tramo1}	ΔP_{TH}	ΔP_{Lecho}	ΔP_{tramo2}	ΔP_{Total}
19,09	9,31	181,05	24,05	233,49

Tabla 5.67: Pérdida de carga total, línea 4. Fuente: elaboración propia.

5.14 Cálculo y selección de equipos de conducción

En esta sección se procede al cálculo de la bomba de alimentación del sustrato, de la bomba del agua caliente para el intercambiador y del soplador necesario para la línea de biogás. Las técnicas de cálculo de bombas y compresores difieren. Para bombas se utilizará el balance de energía mecánica o ecuación de Bernoulli, para compresores se utiliza el balance de energía térmica.

5.14.1 Diseño de las bombas hidráulicas.

Las bombas (B-01) estarán sumergidas en el tanque de alimentación, bombeará el sustrato hasta el digestor, previo paso por el intercambiador de calor. La bomba (B-02), estará conectada al sistema de refrigeración del motor generador y se encargará de aportar al intercambiador de tubos concéntricos el agua de refrigeración del motor. Para ambas bombas, se realizan las siguientes determinaciones que permiten la selección de los equipos de conducción.

5.14.1.1 Cálculo del caudal de impulsión

La bomba de alimentación deberá suministrar un caudal que vendrá dado por la siguiente expresión:

$$Q_B = \frac{Q}{n h}$$

Donde:

- Q_B : Caudal de la bomba $\left(\frac{m^3}{h}\right)$
- Q : Caudal diario a tratar $\left(\frac{m^3}{día}\right)$
- n : número de bombas a utilizar
- h : horas de funcionamiento por día $\left(\frac{hs}{día}\right)$

Cálculo del caudal de impulsión			
$Q \left(\frac{m^3}{día}\right)$	n	$h \left(\frac{hs}{día}\right)$	$Q_B \left(\frac{m^3}{h}\right)$
78,15	1	24	3,26

Tabla 1.68: Cálculo del caudal de impulsión. Fuente: elaboración propia

5.14.2 Cálculo de la altura manométrica

La altura manométrica es uno de los términos que se usa habitualmente cuando se manejan bombas, y se define como la presión efectiva que debe vencer la bomba para elevar el fluido desde su nivel más bajo hasta el punto de elevación más alto, venciendo la diferencia de altura existente, la diferencia de presiones entre el punto de succión y el punto de descarga y las pérdidas de carga, debido a la propia conducción y los accesorios, que se producen en la línea.

El cálculo se realiza aplicando la ecuación de *Bernouilli* para un fluido incompresible entre los puntos de succión y descarga.

$$\frac{P_1}{\delta g} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + H_B = \frac{P_2}{\delta g} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 + h_f$$

El subíndice 1 hace referencia al punto de succión de la bomba y el subíndice 2 al punto de descarga.

Entonces:

- P_1 : Presión del fluido en el punto de aspiración de la bomba.
- P_2 : Presión del fluido en el punto de descarga de la bomba
- δ : Densidad del sustrato a la temperatura media entre la aspiración y la descarga.
- v_1 : Velocidad en el punto 1
- v_2 : Velocidad en el punto 2
- Z_1 : Altura a la que se encuentra el punto de succión de la bomba
- Z_2 : Altura a la que se encuentra el punto de descarga de la bomba
- h_f : pérdidas de carga que se producen en la línea.
- H_B : Altura manométrica

Por lo tanto, despejando de la ecuación de Bernoulli, la expresión de la altura manométrica que debe suministrar la bomba viene dado por la siguiente expresión:

$$H_B = \frac{P_2 - P_1}{\delta g} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + Z_2 - Z_1 + h_f$$

Para cada bomba, se realizaron diversas consideraciones que se explicarán a continuación:

Cálculo de potencia

La determinación de la potencia hidráulica que debe suministrar la bomba viene dada por la siguiente expresión:

$$P_{H-B} = \dot{m} g H_B$$

Donde:

- P_{H-B} : Potencia hidráulica de la bomba (W)
- \dot{m} : Caudal másico impulsado por la bomba $\left(\frac{\text{kg}}{\text{s}}\right)$
- g : Aceleración de la gravedad
- H_B : altura manométrica

De la definición del rendimiento de la bomba obtenemos la potencia eléctrica consumida por el motor de la bomba:

$$P_{C-M} = \frac{P_{H-B}}{n_{bomba}}$$

Cálculo del NPSH

La altura neta positiva de aspiración (en inglés, NPSH Net Positive Suction Head) es un parámetro que define la diferencia entre la presión del líquido en el eje impulsor y su presión de vapor a la temperatura que se realiza el bombeo.

Se consideran dos tipos de NPSH:

- **NPSH requerido ($NPSH_r$):** representa la energía necesaria para llenar la parte de aspiración de la misma y vencer las pérdidas por rozamientos y aumento de velocidad desde la conexión de aspiración hasta el punto donde se incrementa la energía. Es, por tanto, un valor que depende del diseño constructivo de la bomba y que debe suministrar el fabricante de la misma.
- **NPSH disponible ($NPSH_d$):** es la diferencia entre la presión a la entrada de la bomba y la tensión de vapor del fluido a la temperatura de funcionamiento, medidas ambas en metros de columna de líquido. Lógicamente siempre deberá cumplirse que la $NPSH_{dis}$ sea mayor o igual que la $NPSH_r$. Por otro lado la $NPSH_{dis}$ siempre habrá de ser positiva y lo mayor posible, ya que de este modo se evitará que la presión a la entrada de la bomba descienda por debajo de la presión de vapor del fluido en las condiciones de temperatura existentes en dicho punto, lo que provocaría la aparición de burbujas de vapor, con el consiguiente peligro de que la bomba entre en cavitación lo que reduce su carga y eficacia al tiempo que daña el material de la misma, reduciendo seriamente la vida útil de la bomba.

Para cuantificar los conceptos mencionados se aplicará la ecuación de Bernoulli a las diferentes secciones que aparecen en el siguiente esquema:

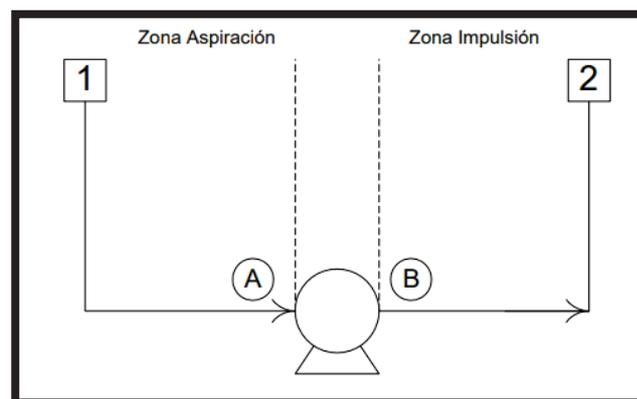


Figura 5.19: Zona de aspiración e impulsión en la impulsión de un fluido a través de una bomba. Fuente:

La zona de aspiración es la comprendida entre el tanque o reserva desde donde se bombeará el líquido y la bomba. Por su parte, el tramo situado a la salida de la bomba es lo que se conoce como línea o zona de impulsión. La energía que la bomba confiere al fluido se mide en términos de presión y es lo que se conoce como carga de la bomba.

Si aplicamos la ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 y A (zona de aspiración), y que al tratarse de un fluido incompresible y considerando una tubería de sección constante, la ecuación de continuidad determina que $v_1 = v_A$, resulta que:

$$\frac{P_A - P_1}{\rho g} + h_f + (Z_A - Z_1) = 0 \rightarrow \frac{P_A}{\rho g} = \frac{P_1}{\rho g} - h_f - (Z_A - Z_1)$$

Si a la expresión anterior le restamos la presión de vapor tendremos la Carga Neta Positiva de Aspiración Disponible (NPSH_{dis}):

$$NPSH_{Dis} = \frac{P_A - P_{vap}}{\rho g} = \frac{P_1 - P_{vap}}{\rho g} - h_f - (Z_A - Z_1)$$

Para evitar la cavitación NPSH_{dis} ha de ser positiva y con un valor lo más alto posible.

Para la determinación de la NPSH_{requerida}, se establece un coeficiente de seguridad de 0,5m de manera tal que queda definida de la siguiente manera:

$$NPSH_{Req} + 0,5m < (NPSH_{Dis})$$

Diseño de la aspiración

En esta sección se expondrán algunas recomendaciones para la zona de aspiración de la bomba con objeto de maximizar sus prestaciones. En general, y como regla de buena práctica se recomienda que:

- Limitar en lo posible en el tramo de aspiración la presencia de codos, cambios de dirección, válvulas y accesorios;
- Realizar la impulsión hacia arriba que facilite la salida del aire;
- Colocar uniones flexibles para evitar la propagación de vibraciones;
- Disponer de válvula de retención o válvula de pie en la tubería de aspiración para evitar su vaciado cuando se detenga la bomba.

Un importante aspecto es evitar a toda costa la formación de turbulencias y torbellinos cercanos a la aspiración de la bomba, dado que pueden desencadenar la entrada de burbujas de aire por la aspiración.

Para asegurar que esto se cumpla se recomienda respetar las profundidades mínimas, indicadas en la tabla siguiente, a la que debe estar sumergida la boca de entrada de la tubería de

aspiración respecto a la superficie del agua, según la velocidad que toma el agua por el conducto de aspiración.

A continuación se presentan los resultados obtenidos:

Datos para la selección de la bomba comercial					
Bomba	Cantidad de bombas	Qbomba	HB	PC-M ind	ANPAd
		m ³ /h	m	W	m
(B-01)	1	3,26	9,72	78,91	12,89
(B-02)	1	16,3	6,80	362,58	5,74

Tabla 5.69: Parámetros obtenidos para la selección de las bombas comerciales. Fuente: elaboración propia.

5.14.2 Selección de las bombas comerciales

Para la selección del modelo adecuado de bomba (una vez establecido el tipo de ésta) se recurrirá a las llamadas curvas características de la bomba, aportadas por el fabricante de las mismas. Se necesitan tres curvas diferentes:

- Las de caudal y carga de la bomba, llamadas curvas QH
- Las de potencia del motor necesario, kW
- Las de Carga Positiva Neta de Aspiración Requerida (NPSHr)

5.14.2.1 Selección de Bomba (B-01)

El sistema de bombeo (B-01) deberá impulsar un caudal constante de 3,26 m³/h a una altura manométrica de 9,72m y considerando una eficiencia aproximada del 81%, deberá tener al menos una potencia de 78,91 W.

Para este servicio se ha decidido utilizar una bomba sumergible modelo SEG.40.09.2.1.502 de la marca Grundfos. Las bombas de la gama SEG de Grundfos están diseñadas para bombear purines generados en granjas, así como en diversas aplicaciones industriales. La bomba incorpora un sistema triturador que tritura los sólidos destruibles, convirtiéndolos en fragmentos de menor tamaño y permitiendo su impulsión a través de tuberías de diámetros relativamente pequeños. A continuación se muestra la curva característica del modelo seleccionado:

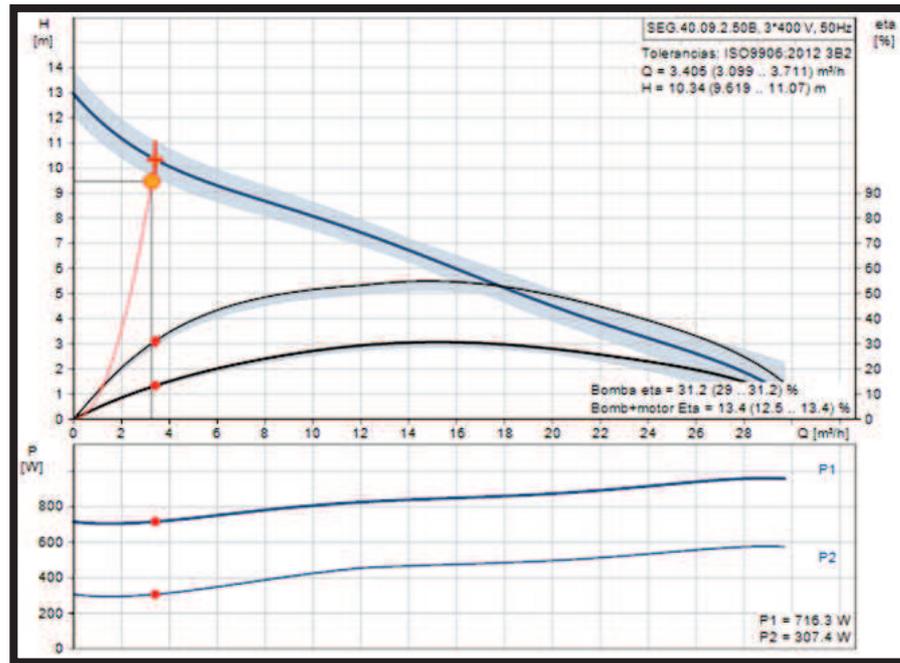


Figura 5.20: Curva Característica bomba sumergible Grundfos SEG.40.09.2.1.502. Fuente: Grundfos

Se determinó que para las condiciones de operación, el modelo de bomba seleccionado cumple con los criterios expuestos en el diseño de las mismas. La información detallada se puede apreciar en las especificaciones técnicas del producto contenidas en el anexo.

5.14.1.4 Selección de la Bomba (B-02)

La bomba deberá impulsar un caudal constante de 16,30 m³/h de agua a una temperatura media de 80°C, a una altura manométrica de unos 6,80 m; considerando una eficiencia aproximada del 81%, deberá tener al menos una potencia de 362,58 W.

Para este servicio se ha seleccionado una bomba centrífuga en línea modelo GRUNDFOS TP 50-90/4. La curva característica de la bomba es la siguiente:

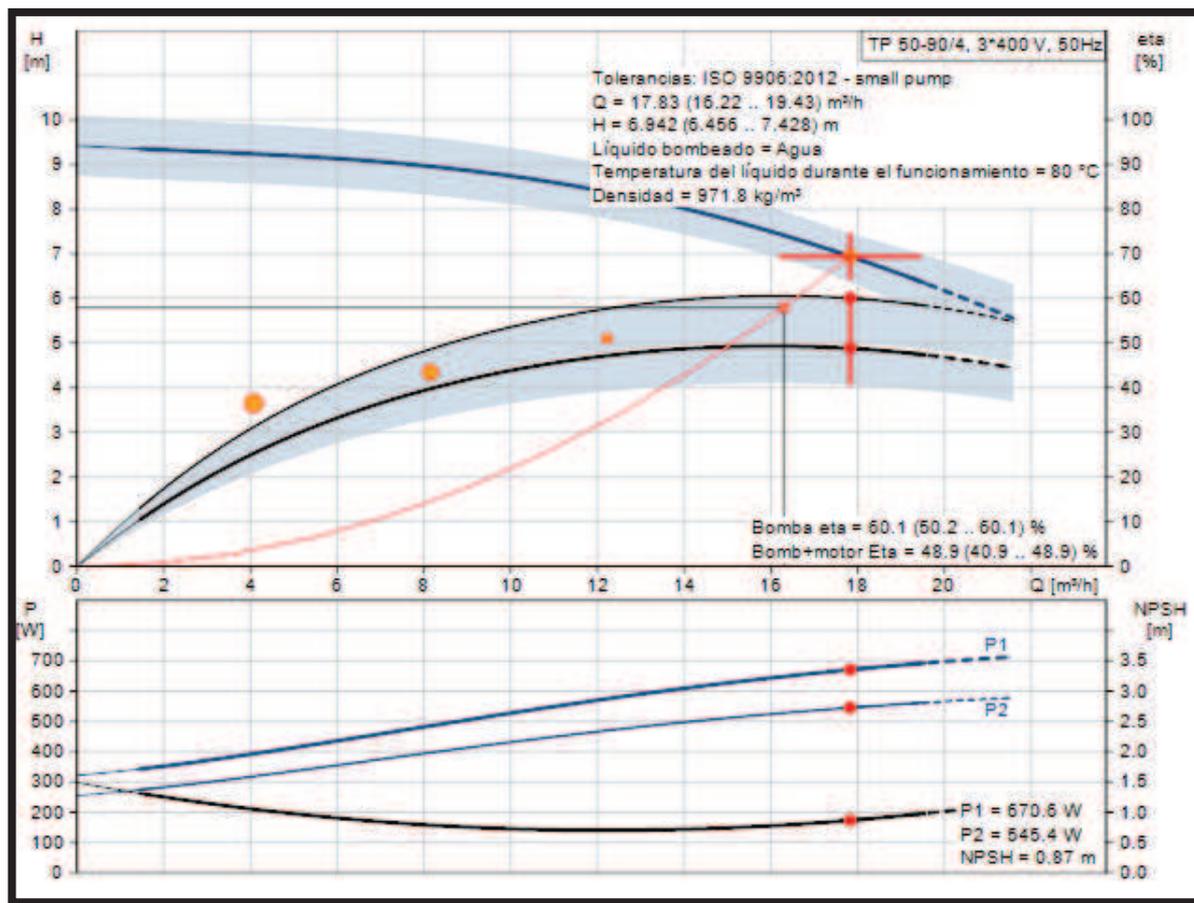


Figura 5.21: Curva característica de las bombas monobloc Grundfos TP 40-180.

Se determinó que para las condiciones de operación, el modelo de bomba seleccionado cumple con los criterios expuestos en el diseño de las mismas. La información detallada se puede apreciar en las especificaciones técnicas del producto contenidas en el anexo.

5.14.3 Diseño y cálculo del soplador

El soplador impulsará el biogás desde la cubierta del digestor hacia la unidad de CHP. Deberá comprimir el biogás a una presión tal que éste pueda fluir fácilmente por la línea, superando las pérdidas de carga producidas en el sistema de tratamiento del biogás y además aportarle la presión requerida por la unidad de ciclo combinado.

La presión a la salida del compresor deberá ser por tanto, la presión del biogás requerida por la unidad de CHP, la cual para nuestro equipo seleccionado resulta entre 220 mbar y 550 mbar, más las pérdidas totales de presión producidas en la línea (14,05 mbar).

$$P_{salida} = P_{CHP} + P_{pérdidas}$$

De esta manera, se consideró para la realización de cálculos la obtención de 3 valores de presión de salida, considerando el valor mínimo de presión requerido por el CHP, el valor máximo y el valor medio.

La carga necesaria del soplador se calcula mediante la ecuación para compresión isotérmica:

$$h_A = \frac{RT}{Mg} \ln\left(\frac{P_2}{P_1}\right)$$

Teniendo estos datos es posible calcular la potencia necesaria del soplador mediante la siguiente expresión:

$$Potencia = \frac{h_A g m_{Biogas}}{n}$$

Donde:

- h_A : carga del soplador (m)
- g : aceleración de la gravedad (9,81 m/s²)
- m_{Biogas} : caudal másico de biogás (kg/s)
- n : Rendimiento del soplador (Se asume 81%)

A continuación, se exponen los resultados obtenidos.

Determinación de Presión de Salida y Altura de carga								Cálculo de la potencia a entregar - Soplador		
Valores	Pchp	AP pérdidas	P salida	P1	P2	AP Necesario Soplador	ha	m	n	PC-M
	Pa	Pa	Pa	Pa	Pa	mbar	m	kg/seg	%	W
Min	22.000	233,49	22.233	103.640	124.373	207,3	1.830,89	0,03	81	710,77
Max	55.000		55.233		157.373	537,3	4.193,55			1.627,99
Medio	38.500		38.733		140.873	372,3	3.081,56			1.196,30

Tabla 5.20: Resultados del Soplador. Fuente: elaboración propia

5.14.4 Selección del soplador comercial

El soplador deberá impulsar un caudal constante de 97,50 m³/h desde una presión de 15 mbar hasta una presión de salida mínima de 222,37 mbar y máxima de 552,37 mbar, aportando un ΔP comprendido entre 207 y 537 mbar.

Para este servicio se ha seleccionado la Serie TD – Range GOR de los sopladores de la marca “FPZ Blower Technology” que proporciona diferentes modelos especializados en la impulsión de biogás. En concreto se ha seleccionada un soplador de canal lateral modelo K05. Este tipo de sopladores aumentan la presión del gas aspirado gracias a la fuerza centrífuga proporcionada por el impulsor.

El modelo seleccionado, permite aportar la presión necesaria calculada para el caudal de operación seleccionado. A continuación se exponen las tablas de performance del modelo y los gráficos de operación.



Imagen 5.8: Soplador de canal lateral, serie TD, modelo K05. Fuente: FPZ Blower Technology

P _n [kW]	Frequency [Hz]	Δp _{max} [mbar]		Q _{max} [m ³ /h]	Leq ¹ [dB(A)]	Weight [kg]	H ¹ [mm]	Current Consumption (Y/Δ)		Cosφ [-]	Speed [rpm]
		Suction	Compression					[A]			
								IE2 ²	Range		
3	50	350	350	215	70.6	44.5	475	6.27 / 10.8	6.88-6.36 / 11.9-11.0	0.82	2920
3.5	60	300	300	259	72.6	44.5	475	6.23 / 10.8	7.29-6.23 / 12.6-10.8	0.84	3515
4	50	400	475	215	70.6	45.5	495	8.12 / 14.05	8.80-8.26 / 15.2-14.3	0.82	2910
4.8	60	400	425	259	72.6	45.5	495	8.10 / 14.03	9.37-8.10 / 16.2-14.0	0.84	3480

Figura 5.22: Tabla de performance del soplador serie TD, modelo K05. Fuente: FPZ Blower Technology

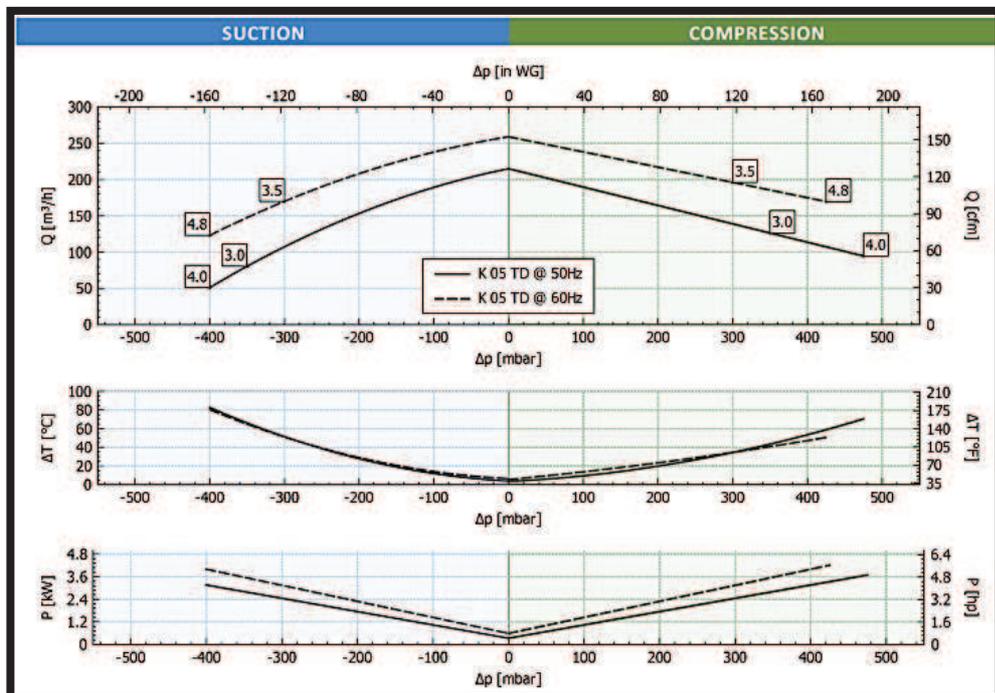


Figura 5.23: Gráficos de operación del soplador serie TD, modelo K05. Fuente: FPZ Blower Technology

Por último, se expone la presión aportada por el equipo al caudal de operación y la potencia consumida.

Operación del soplador seleccionado		
Q biogás (m3/h)	AP (mbar)	P (Kw)
97,50	440	3,6

Tabla 5.71: Parámetros de operación del soplador seleccionado. Fuente: elaboración propia.

5.14.5 Selección de antorcha

Para la selección de la antorcha se debe verificar que opere para el caudal de biogás de operación. Con ello, se selecciona la antorcha y diámetro de la tubería de acuerdo a las capacidades comerciales disponibles.

Modelo	Tubería de gas	Altura mm	Caudal mínimo Nm ³ /h	Caudal máximo Nm ³ /h
	Ø DN			
FAII 50 MP	50	3850	20	80
FAII 100 MP	85	4100	80	150
FAII 200 MP	80	4340	150	250
FAII 300 MP	100	5050	250	350

Figura 5.24: Características técnicas de los modelos disponibles de antorchas de la empresa ZORG Biogas. Fuente: Zorg

Se seleccionó el modelo Antorcha de gas cerrada FAII100MP, la cual puede operar para un caudal de biogás entre 80-150Nm³/h, por lo que se adecua para nuestro proyecto. El mismo será adquirido a través de la empresa Zorg Biogas.

6. Cómputo y Presupuesto

En este punto se va a profundizar en el aspecto económico de la instalación de la planta de biogás. En primer lugar se estimará un presupuesto de la instalación completa. Se estudiarán los distintos costos e ingresos para determinar los beneficios del proyecto y por último se realizará un análisis de la rentabilidad del mismo mediante la utilización de diversos indicadores económicos.

6.1 Inversión inicial

Debido a que el diseño y la tecnología empleada para una planta de biogás dependen fuertemente de las características de los sustratos a emplear y de las condiciones de su localización (disponibilidad de espacio, clima, etc.), es muy difícil entregar valores aproximados para los costos de inversión totales en este tipo de instalaciones.

En general, los costos de inversión de una planta de biogás pueden dividirse en tres grupos, dependiendo de su naturaleza:

- inversiones relacionadas con las obras civiles;
- inversiones de equipos y materiales – mercado nacional;
- inversiones de equipos – mercado internacional.

Las obras civiles corresponden fundamentalmente a la construcción de tanques o estanques, sala de máquinas y oficinas, así como a las labores de movimientos de tierra e instalación de faena. Sus costos suelen representar entre un 30% y un 50% de la inversión total de una planta de biogás, valor que depende de los tipos de material utilizados, así como de la disponibilidad de espacio, del layout proyectado y el tipo de tecnología elegida, entre otros aspectos.

El precio de los equipos y materiales que típicamente se encuentran en el mercado nacional está generalmente dado por las características del mercado interno, y no por los precios internacionales. Este grupo se compone de bombas, equipos eléctricos simples, materiales como tuberías de acero inoxidable o HDPE, PVC, materiales para aislación térmica, etc. Además, se consideran aquí los costos de conexión a la red y los de planificación. En términos generales, este tipo de inversiones puede fluctuar entre un 10% y un 25% del total de la inversión.

En contrario, el precio del equipamiento especializado o altamente especializado de fabricación extranjera está regido por la demanda internacional. En este grupo se incluyen los equipos de generación aptos para el uso con biogás (grupos generadores o cogeneradores), los

agitadores, instrumentos de medición, equipos de control y automatización, etc. Su costo suele ser entre un 30% y un 45% de la inversión total en una planta de biogás.

En éste apartado se evalúa el coste económico que supone toda la instalación de la planta de biogás. Se consideran tanto los costos directos, correspondientes a la compra de equipos, materiales y mano de obra necesaria para la instalación y construcción de la misma, como los costos indirectos asociados. Se desglosa parte a parte en la que se indica la descripción del elemento, su precio unitario, la unidad en la que se mide y su costo.

Equipos Electromecánicos y materiales							
1. Tanque de Homogenización (T-01)							
Código Item	Descripción	Cantidad	Unidad	Precio (USD/unid)	Precio (\$/unid)	Total (USD)	Total (\$)
T01-1	Hormigón en masa	25,81	m3	40		1.032,20	
T01-2	Hormigon Armado Sulforesistente en losas	25,81	m3	60		1.548,30	
T01-3	Hormigón Armado Sulforesistente en muros	28,83	m3	60		1.730,01	
T01-4	Agitador sumergible Flyght 4220 (Equipo + Instalación)	4	unid	930		3.720,00	
T01-5	Bomba sumergible EF GRUNDFOS (Equipo + Instalación)	2	unid	760		1.520,00	
Subtotal T-01						9.550,51	
2. Sistema de Calefacción (IC)							
IC-01	Intercambiador de calor HRS Heat Exchangers (equipo e instalación)	1	unidad	13363		13363	
IC-02	Bomba de agua caliente TP GRUNDFOS (equipo e instalación)	1	m3	1100		1100	
Subtotal IC						14463	
3. Digestor anaeróbico (DIG)							
3.1 Reactor anaeróbico (T-02)							
T02-01	Hormigon Sulforesistente en losas	60,32	m3	60		3.619,11	
T02-02	Hormigón Sulforesistente en muros	131,88	m3	60		7.912,79	
T02-03	Aislamiento de poliuretano	64,07	m3	10,75		6.88,71	
T02-04	Chapa plegada acero inoxidable 1,5mm galvanizada	439,60	m2	59,99		26.371,58	
T02-05	Membrana HDPE Aislamiento fondo	201,06	m2	15		3.015,93	
T02-06	Agitador sumergible Flyght 4460 (Equipo + Sistema soporte + Instalación)	4	unid	1027		4.108	
3.2 Gasómetro de doble membrana (G)							
G-01	Gasómetro de doble membrana EPDM SATTLER	1	unid			21.000	
Subtotal DIG						66.716,13	
4. Sistema de purificación del Biogás (FH2S)							
4.1 Filtro de H2S							
FH2S-01	Filtro de H2S Acero Inoxidable	1	unid	15.588		15.588	
FH2S-02	Trampa de humedad	1	unid	10.325		10.325	

FH2S-03	Antorcha de Seguridad	1	unid	5.000		5.000	
FH2S-04	Soplador de Biogás	2	unid	1.757		3.514	
FH2S-05	Válvula de control y seguridad	1	unid	2.500		2.500	
Subtotal FH2S						36.927	
5. Unidad de Cogeneración (CHP)							
5.1 Equipos electromecánicos							
CHP-01	Motor CHP	1	unid	173.521		173.521	
Subtotal CHP						173.521	
6. Tanque de almacenamiento (T-03)							
T-03-01	Hormigón en masa	85,06	m3	40		3.402,34	
T-03-02	Hormigón Sulforesistente en losas	85,06	m3	60		5.103,52	
T-03-03	Hormigón Sulforesistente en muros	162,88	m3	60		9.772,99	
T-03-04	Agitador sumergible Flyght 4460 (Equipo + Sistema soporte + Instalación)	4	unid	1.027		4.108	
Subtotal T-03						22.386,86	
7. Conducciones							
7.1 Conducción - Línea 1 (DN=63)							
	Tubería PE 100 (DN=63mm)	16,5	m		474		7.821
	Curva Brusca	4	unid		150		600
	Valv. Retención	2	unid		2.690		5.380
	Valv. Compuerta	1	unid		10.000		10.000
7.2 Conducción - Línea 2 (DN=63)							
	Tubería PE 100 (DN=63mm)	15,00	m		474,00		7.110
	Curva Brusca	1	unid		150		150
	Codo redondeado	1	unid		150		150
	Valv. Compuerta	1	unid		10.000		10.000
7.1 Conducción - Línea 3 (DN=50)							
	Tubería de Acero Inoxidable AISI 316 DN 50	10	m		8.400		84.000
	Curva Brusca	5	unid		150		750
	Valv. De retención	2	unid		12.347		24.694
	Valvula de esfera	2	unid		1.500		3.000
							0
7.1 Conducción - Línea 4 (DN=110)							
	Tubería PE 100 (DN=110mm)	30	m		1.250		37.500
Subtotal Conducciones							191.155
TOTAL EQUIPOS ELECTROMECAÑICOS Y MATERIALES						514.719	191.155
TOTAL EQUIPOS ELECTROMECAÑICOS Y MATERIALES EN USD							515.878,01

Tabla 6.1: Costo de inversión en equipos y materiales. Fuente: elaboración propia.

Obras Civiles	
Descripción	Costo Total (USD)
Proyecto, Dirección y Administración de obra	30.000
Costos equipamiento	50.000
Instalación Eléctrica Instrumental	9.000
Transporte, fletes y Seguros	6.000
Montajes y tuberías	25.000
Nivelación y adecuación del terreno	1.160
Total OBRAS CIVILES	121.160

Tabla 6.2: Costos en Obras Civiles. Fuente: elaboración propia.

La inversión inicial la cual consta de la sumatoria de la inversión en obras civiles y la inversión en materiales y equipos es de 745220USD considerando una tasa de cambio del dólar a 165 pesos.

Inversión Inicial	
Descripción	Costo Total (USD)
Obras Civiles	121.160
Equipos Electromecánicos y Materiales	515.878
Total	637.038

Tabla 6.3: Costo de la inversión inicial total.

6.2 Costos de operación

Los aspectos más importantes a considerar respecto a los costos de operación corresponden a:

- Energía utilizada por la planta;
- Personal;
- Disposición de residuos;
- Insumos de operación.

Energía utilizada por la planta

En este caso en particular, la planta de biogás cogenerará energía eléctrica y térmica, parte de la cual será auto consumida para abastecer a los equipos e instalaciones de la misma. De esa manera, el auto consumo de energía será deducido de la energía disponible para comerciar, pero no será considerado como un costo de operación.

Personal

Los requerimientos de personal dependen del grado de automatización de la planta. Las principales labores son: recepción de sustrato, control y supervisión, carga y despacho del digestato y tareas administrativas. El empleo generado en este tipo de instalaciones es bajo. Flotats (2008) estima una persona por debajo de 200 kW, y se va incrementando una persona más a tiempo completo por cada 200 kW adicionales de potencia. De esta manera se puede indicar que para plantas centralizadas el número de personas oscila entre 2 y 4 personas. En este proyecto se contempla la necesidad del siguiente personal:

- Jefe de planta
- Operario de mantenimiento
- Técnico de laboratorio

Para estimar los costos se utilizaron valores obtenidos en plantas de biogás de la empresa IFESS con características similares. Se adoptó un valor en gastos de personal y operación de 35000 USD/año.

Disposición de residuos

El digestato en este proyecto puede ser utilizado como mejorador de suelo y abono líquido. Sin embargo, en caso que no se cumplan las condiciones necesarias para su uso en fertilización, debe disponerse en conformidad con la legislación sanitaria. En tal caso, será necesario consultar a empresas de residuos en la zona del proyecto, dado que los costos de disposición muestran una variabilidad local. Sin embargo, a fines de contabilizar los costos de operación, no será tenido en cuenta.

Insumos de operación

En este proyecto, existen dos insumos principales que serán utilizados. Los mismos son el silaje de maíz utilizado como co-sustrato en la digestión y el óxido férrico en el proceso de desulfuración del biogás.

Insumos de operación		
Costos de Silaje de maíz residual		
Silaje de maíz necesario para el biodigestor	tn/año	3.169,46
Costo Silaje de maíz	USD/tn	1,21
Costo Silaje de maíz	USD	3.841,77
Costo del pellet de óxido férrico		
óxido férrico necesario para el filtro de H ₂ S	tn/año	1,26
Costo del óxido férrico	Usd/tn	629,99
Costo total del óxido férrico	USD/año	792,73

Costo total	USD/año	4.634,50
-------------	---------	----------

Tabla 6.4: Costos por insumos de operación. Fuente: elaboración propia.

De esta manera, los costos de operación considerados en este proyecto se resumen en la tabla X:

Costos de operación		
Insumos de operación	USD/año	4.634,50
Gastos en personal	USD/año	35.000
Total	Usd/año	39.634,50

Tabla 6.5: Costos de operación. Fuente: elaboración propia.

6.3 Costos de reparación y mantenimiento

Los costos de reparación y mantenimiento son los que se generan para garantizar el buen desempeño de las operaciones y procesos de la planta de biogás y asegurar que las instalaciones sean operadas y mantenidas eficientemente. Estos costos se concentran fundamentalmente en la mantención de los equipos especializados de la planta de biogás.

Los costos de mantenimiento y reparación se pueden estimar en función de un porcentaje anual de la inversión del equipo. Sin embargo, vale aclarar que en ciertos equipos como el intercambiador de calor o el cogenerador de energía se realizan contratos con servicio de mantenimiento incorporado en este proyecto. Los mismos fueron obtenidos a partir de la bibliografía consultada (Steinhouser & Doublein). Se diferencian los costos de trabajos concretos, Se utiliza la siguiente metodología:

$$Costo_{Mantenimiento} = \%_{mant.reparación} \times Costo_{equipo}$$

Los resultados se pueden observar a continuación:

Costos de mantenimiento y reparación Anuales			
Descripción	Costo total (USD)	%	Costo Mantenimiento (USD)
Obra Civil (Digestores, tanques de alimentación y descarga)	64.197,50	3	1.925,92
Equipos electromecánicos: (Bombas, soplores, filtro de H ₂ S, etc)	51.483,00	3	1.544,49
Conducciones (Tuberías y accesorios)	1.062,46	3	31,87
Membranas de cubierta	21.000	1	210,00
Total			3.712,29

Tabla 6.6: Costos de mantenimiento y reparación anuales. Fuente: elaboración propia.

6.4 Costos de amortización

Para estimar los costos por la despreciación de los equipos y las instalaciones de la planta, se utilizó un método de amortización lineal. El mismo considera un costo de depreciación anual

constante en función de la vida útil del equipo. En los casos en lo que no se cuente con el valor residual, se considerará de valor nulo.

$$Costo_{Amortización} = \frac{Valor\ del\ equipo - Valor\ residual}{Vida\ útil\ del\ equipo}$$

Los costos variables por amortización se pueden observar en la siguiente tabla:

Costos por amortizaciones			
Descripción	Costo (USD)	Vida útil	Amortización anual
Agitación (A-01)	3.720,00	15	248,0
Bomba (B-01)	1.520,00	15	101,3
Intercambiador de Calor (IC)	13.363	15	890,9
Bomba (B-02)	1.100	15	73,3
Agitación (A-02)	4.108	15	273,9
Agitación (A-03)	4.108	15	273,9
Gasómetro (G)	21.000	15	1.400,0
Válvula de control y Seguridad (S)	2.500	20	125,0
Antorcha de Seguridad (S)	5.000	20	250,0
Trampa de Humedad (TH)	10.325	15	688,3
Filtro de H2S (H2S)	15.588	25	623,5
Soplador	3.514	15	234,3
CHP	173.521	35	4.957,7

Tabla 6.7: Costos por amortización de equipos electromecánicos. Fuente: elaboración propia.

6.5 Ingresos

En esta sección se cuantificarán los ingresos generados en la empresa en forma anual. Existen diferentes posibles fuentes de ingreso (venta o ahorros generados por autoconsumo) asociados a un proyecto de biogás, que corresponden a:

- ingresos por energía y potencia eléctrica;
- ingresos por energía térmica de cogeneración;
- ingresos por sustitución de otros combustibles;
- ingresos por digestato como abono;
- ingresos por venta de bonos de carbono;
- ingresos por concepto de tratamiento y disposición de residuos.

Si bien muchos de los conceptos descritos anteriormente son fuentes potenciales de ingreso en el proyecto, para la evaluación económica del mismo se tuvo en cuenta únicamente los ingresos por energía y potencia eléctrica. El digestato no será contemplado en el análisis económico dado que se deben realizar análisis de su composición para determinar su comercialización como potencial fertilizante.

6.5.1 Ingreso por energía y potencia eléctrica

Para determinar la cantidad de energía inyectada a la red, se estimó la misma a partir de la siguiente ecuación:

$$E_{Eléctrica-Red} = E_{Eléctrica-Producida} - E_{Eléctrica-Consumida}$$

Para poder estimar la energía eléctrica inyectada a la red en forma anual se debe restar a la energía generada por el grupo cogenerador de la planta de biogás, la energía consumida por los equipos de la misma. En la siguiente tabla se detalla el consumo de energía eléctrica que conlleva cada equipo de la planta. Para el cálculo se considerará que estos equipos funcionarán 24 horas al día, 342 días al año, considerando las paradas para labores de mantenimiento y limpieza, aunque en la realidad puede resultar un valor menor. El consumo en kWh se obtiene de la siguiente manera:

$$\text{Consumo} \left(\frac{kWh}{\text{año}} \right) = \text{Consumo} (kW) * 24 \frac{h}{\text{día}} * 342 \frac{\text{días}}{\text{año}}$$

Potencia Consumida por la planta			
Parámetro	Descripción	Unidades	Valor
Potencia consumida	Agitador A-01	kW	1,23
Potencia consumida	Bomba B-01	kW	0,08
Potencia consumida	Bomba IC B-02	kW	0,67
Potencia consumida	Agitador A-02	kW	11,08
Potencia consumida	Agitador A-03	kW	11,08
Potencia consumida	Soplador	kW	3,6
Potencia Consumida Total		kW	24,15
Energía Consumida Total		kWh	198.188,14

Tabla 6.8: Potencia y energía eléctrica consumida por la planta. Fuente: elaboración propia.

Si realizamos un balance de energía a la planta:

Balance de Energía anual Total		
Parámetro	Unidades	Valor
Energía eléctrica generada por año	Mwh/año	1841,08
Energía eléctrica consumida por año	Mwh/año	198,19
Energía eléctrica inyectada a la red por año	Mwh/año	1642,89
Precio por kwh generado	USD/kwh	0,11
Ingresos por generación de electricidad	USD/año	180.718,25

Tabla 6.9: Cálculo del ingreso anual por la generación de energía eléctrica.

Se estima un ingreso anual por generación de energía eléctrica de 180718,25 USD/año.

6.6 Análisis de la rentabilidad

Con el fin de estudiar la viabilidad económica del proyecto, se van a analizar los siguientes parámetros: el VAN (Valor Actual Neto), la TIR (Tasa Interna de Retorno) y el tiempo de recuperación de la inversión. El estudio se lleva a cabo para un periodo de 25 años, suponiendo que los ingresos provenientes de la inyección de electricidad a la red se mantienen constantes a lo largo de este periodo al igual que los costos de operación. Para este análisis se consideró un valor del dólar constante de 165 pesos.

- Valor Actual Neto

El valor actual neto también conocido como valor actualizado neto, cuyo acrónimo es VAN, es un procedimiento que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros, originados por una inversión. La metodología consiste en descontar al momento actual, es decir, actualizar mediante una tasa, todos los flujos de caja futuros del proyecto. A este valor se le resta la inversión inicial, de tal modo que el valor obtenido es el valor actual neto del proyecto. La tasa que se aplica es la tasa de descuento (r), y en este caso, ya que el proyecto tiene una vida útil de 25 años, la estimamos con un valor del 3% anual. Por lo tanto:

$$VAN = -C_0 + \sum_{i=1}^{25} \frac{C_i}{(1+r)^i}$$

- Tasa Interna de Retorno (TIR)

Se define como la tasa de descuento a la que el proyecto posee un VAN igual a cero. Por lo tanto la TIR se puede calcular igualando a cero la ecuación anterior. Es un indicador de la rentabilidad de un proyecto, a mayor TIR, mayor rentabilidad.

$$0 = -C_0 + \sum_{i=1}^{25} \frac{C_i}{(1+TIR)^i}$$

- Tiempo de recuperación de la inversión

Es un indicador que expresa el tiempo que se tarda en recuperar la inversión y corresponde al momento en el que el valor actual neto es superior al valor de la inversión inicial.

6.6.1 Flujo de Caja

A continuación se adjunta el flujo de caja del proyecto por un período de 35 años, considerando una tasa de descuento del 3% anual en dólares correspondiente a la tasa de interés

nominal anual en dólares prestado en un plazo fijo anual en el Banco Nación. El resultado mostró una tasa interna de retorno del 16% y un período de recuperación de la inversión en el año 13.

Flujo de Caja								
AÑOS	Ingresos	Costos de operación	Costos de mantenimiento y reparación	Costos de amortización	Costos de Inversión	Costo total	Beneficio Neto Anual	VAN (r=3%)
Año 0	0	0	0	0	637.038	637.038	-637.038	-637.038
Año 1	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	-513.519
Año 2	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	-393.597
Año 3	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	-277.168
Año 4	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	-164.130
Año 5	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	-543.85
Año 6	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	52.164
Año 7	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	155.610
Año 8	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	256.042
Año 9	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	353.550
Año 10	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	448.217
Año 11	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	540.127
Año 12	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	629.360
Año 13	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	715.994
Año 14	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	800.105
Año 15	180.718	39.634	3.719	10.140	62.758	116.251	64.467	841.484
Año 16	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	920.766
Año 17	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	997.739
Año 18	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	1.072.470
Año 19	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	1.145.025
Año 20	180.718	39.634	3.719	10.140	7.500	60.993	119.725	1.211.314
Año 21	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	1.279.704
Año 22	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	1.346.101
Año 23	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	1.410.565
Año 24	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	1.473.151
Año 25	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	1.526.470
Año 26	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	1.585.463
Año 27	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	1.642.739
Año 28	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	1.698.346
Año 29	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	1.752.333
Año 30	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	1.804.748
Año 31	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	1.855.637
Año 32	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	1.905.043
Año 33	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	1.953.010
Año 34	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	1.999.580
Año 35	180.718	39.634	3.719	10.140	0	53.493	127.225	2.044.794
TIR	16,01%							
PRI	Año 13							

Tabla 6.10: Flujo de caja y análisis de rentabilidad del proyecto. Fuente: elaboración propia.

7. Evaluación de Impacto Ambiental

7.1 Resumen Ejecutivo

En cumplimiento de la legislación vigente y normativa aplicable en la materia, se ha confeccionado la presente evaluación de impacto ambiental para el proyecto de “Planta de Biodigestión en la granja Híbridos Argentinos S.A” que se construirá en el mismo predio comprendido en el partido de Zárate, Provincia de Buenos Aires. El predio cuenta con un único acceso localizado en el km 11.5 de la ruta nacional 193 y cuenta con una superficie de 48 hectáreas.

La planta de biogás posee una vida útil de 35 años y permitirá el tratamiento de 49,21 m³/día de purines porcinos los cuales serán homogenizados con 8,68tn/día de silaje de maíz y calefaccionados a una temperatura de 37°C, las cuales a través de un proceso de biodigestión anaeróbica permiten la obtención de 78,15m³/día de biodigerido para ser aplicado en el suelo, y el funcionamiento de un cogenerador de energía eléctrica y térmica por combustión interna de 333kW.

El proyecto se separa en 3 etapas. La primera etapa es la de construcción dónde se realizarán los movimientos de la obra civil de las instalaciones e infraestructura necesaria del proyecto. La segunda etapa está conformada por la operación de la planta la cual consta de 6 actividades principales las cuales son: recepción, descarga y homogenización de residuos, digestión anaeróbica y generación de biogás, purificación del biogás, cogeneración de energía, transporte y almacenamiento de biodigestato y aplicación de biofertilizante. Finalmente, la tercera etapa consiste en la etapa de abandono o cierre la cual consiste en el desarmado del equipo y las instalaciones de la planta, y la recomposición del área mediante la revegetación con forraje del predio.

Para la caracterización climática del área específica del predio se utilizó los datos de la estación Estación Experimental Agropecuaria San Pedro, del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). El clima es de tipo subtropical y húmedo, las precipitaciones medias anuales son de aproximadamente 920 mm, la temperatura media anual varía entre 16 y 18°C y los vientos dominantes son del Nordeste (33%) y del Sudeste (que provocan la llamada “Sudestada”) con una frecuencia del 22% y los del Este un 11%.

El predio se encuentra dentro de la provincia geológica denominada “Llanura Chaco Pampeana” y más específicamente en la unidad geomorfológica “Pampa Ondulada”. El área de estudio se ubica dentro de la cuenca del Río Paraná, la cual posee un rumbo general hacia el SE con

su cauce principal ubicado a aproximadamente 6 km al NE del Predio, en el delta del Paraná. En cuanto a la hidrología subterránea, el emplazamiento se localiza sobre el acuífero Pampeano.

El área de confluencia del Proyecto en estudio pertenece a la Región Neotropical y dentro de ella al Dominio Chaqueño, Provincia Pampeana, Distrito Pampeano Oriental. Se caracteriza por la predominancia de sabanas con gramíneas que pueden alcanzar 1 m de altura, hierbas y arbustos; bosques xéricos similares a los de la provincia del Chaco pero empobrecidos, sabanas de tipo inundables y bosques en galería a lo largo de los ríos.

En cuanto al medio biológico, tanto la fauna como la flora se vieron intensamente afectados por la actividad de la agricultura y la acción antrópica. La comunidad florística original se encuentra conformada por *Piptochaetium montevidense*, *Stipa neesiana* y *Bothriochloa lagurioides* y existen reservas naturales en la zona como la Reserva Natural Otamendi.

En cuanto al medio socioeconómico, en el partido de Zárate la principal actividad económica es la industria manufacturera (58%), seguido por los servicios inmobiliarios, empresariales y de alquiler representa el 8 %. La población de Zárate es de aproximadamente 114.269 habitantes y una densidad poblacional aproximada es de 95.1 hab/Km². El área de influencia directa e indirecta del proyecto se estableció de 10km y 20km de radio respectivamente utilizando como centro el emplazamiento del biodigestor en la planta de biogás.

A partir de la interpretación de la matriz de impacto ambiental se desprende que en la etapa de construcción y cierre no se observan impactos ambientales críticos, aunque se observa que los factores ambientales más afectados son los correspondientes al medio físico, principalmente la calidad del aire por la emisión de polvo, material particulado, gases y vapores generada por el movimiento de suelo intenso.

En el caso de la etapa de construcción, se observan impactos negativos sobre el medio biológico debido al movimiento de vehículos livianos generando asfixia en la flora, aplastamiento y contaminación por derrames de aceites, grasas y combustibles. En el caso de la etapa de cierre, el impacto sobre el medio biológico resulta positivo debido a la revegetación del área afectada con forraje autóctono.

En cuanto a la etapa de operación los principales impactos negativos son debido a las emisiones de gases emitidos por la maquinaria utilizada que luego se acumularán en la atmósfera afectando principalmente la calidad del aire. Por otro lado, se generan impactos positivos sobre el suelo, debido a la aplicación del biodigerido como fertilizante, entre ellos se puede mencionar el

aumento de la microbiología, nutrientes y materia orgánica de los suelos de cultivo por aplicación de biofertilizante.

Del análisis de riesgos se concluyó que no existen riesgos inaceptables en el proyecto, aunque se evidencia riesgo condicional con obligatoriedad de corrección en lo que concierne a los peligros mecánicos y por exposición al biogás.

Se confeccionó un plan de gestión ambiental compuesto del plan de mitigación ambiental, plan de monitoreo ambiental y el plan de contingencias ambientales el cual establece los procedimientos a llevar a cabo en caso de incendios, evacuaciones médicas y accidentes vehiculares. Entre las principales medidas de mitigación ambiental se puede destacar la puesta en punto de los motores de los vehículos de construcción para evitar afecciones sobre el medio biológico y físico. En el plan de monitoreo ambiental se realizarán mediciones de parámetros de calidad sobre el suelo y el aire de acuerdo a cada normativa respectiva.

Se concluye que el proyecto será sostenible en cuanto a la equidad social, viabilidad económica y protección ecológica. En ese sentido, se dará un énfasis al seguimiento o monitoreo de todas las acciones señaladas en las distintas áreas del proyecto, para que el plan de Gestión Ambiental propuesto del proyecto sea eficaz y eficiente.

7.2 Introducción

El presente documento tiene por objeto recopilar y valorar todas las variables ambientales afectadas por las actuaciones proyectadas con el fin de detectar y minimizar los impactos que produciría la ejecución de las obras contenidas en el proyecto de “Planta de Biodigestión en la granja Híbrido Argentinos S.A” en el partido de Zárate, Buenos Aires. El objetivo global del presente estudio es común con cualquier evaluación de impacto y se basa en aportar los criterios que permitan el diseño de la obra objeto de análisis en condiciones que produzcan un mínimo impacto sobre el entorno de acuerdo con el marco normativo de aplicación.

Este documento recoge las principales características del proyecto, así como las posibles alternativas propuestas y valoración medioambiental de las mismas, un breve análisis de los impactos y una serie de medidas de adecuación ambiental del proyecto a fin de favorecer su integración en el entorno, y un avance del seguimiento ambiental a realizar.

7.3 Descripción del proyecto

El proyecto consiste en la construcción de una planta de Biogás para la generación de energía eléctrica utilizando los residuos porcinos generados en la granja porcina “Híbridos Argentinos S.A”. La misma planea tratar la totalidad de los residuos generados en la granja la que consiste de

49,21 m³/día y generar. Los mismos son colectados por pisos enrejillados y conducidos a una fosa de almacenamiento las cuales serán tratadas por la planta de biogás.

La planta de biogás está compuesta por cinco áreas diferentes con diferentes propósitos para llevar a cabo la generación de energía eléctrica

7.3.1. Nombre del proyecto

El proyecto se denomina: "Planta de Biodigestión en la granja Híbrido Argentinos S.A", ubicada en el partido de Zárate (Ruta 193 - Km 11.5.)

7.3.2. Acceso al sitio del proyecto

El predio cuenta con un único acceso localizado en el km 11.5 de la ruta nacional 193. La Ruta Nacional 193 es una carretera Argentina asfaltada, al noreste de la provincia de Buenos Aires, que une la ciudad de Zárate, en el partido homónimo, con el pueblo de Solís, en el partido de San Andrés de Giles. Su recorrido es de 31 km en la dirección noreste a sudoeste, numerados de kilómetro 4 a 35. Comienza en el puente sobre la Ruta Nacional 9 en la ciudad de Zárate y finaliza en el empalme con la Ruta Nacional 8, en Solís. Hacia el noreste de la intersección con la Ruta 9 continúa como Ruta Nacional 12.

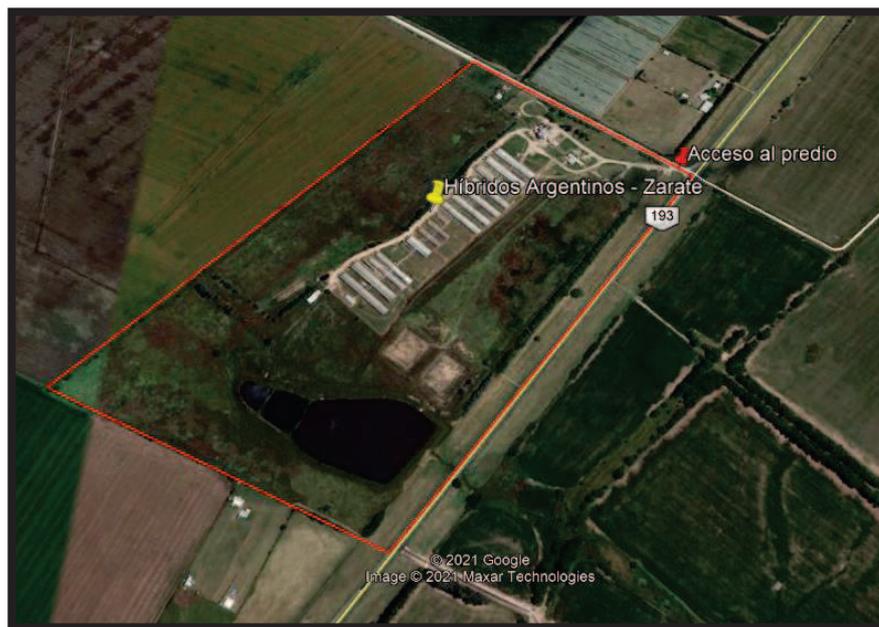


Imagen 7.1: Acceso a la granja de Híbridos Argentinos S.A. Fuente: elaboración propia.

7.3.3 Proyecto

El proyecto se dividió en 3 etapas bien definidas en función del tiempo, de la vida útil del proyecto y de las actividades realizadas en cada una de ellas. Las etapas son: etapa de construcción, etapa de operación y etapa de cierre del proyecto.

7.3.3.1 Etapa de construcción

Esta etapa comprende la construcción de las obras civiles, la fabricación o la adquisición de los equipos y/o materiales industriales necesarios y el montaje completo de los mismos en obra. Entre las principales actividades podemos mencionar las siguientes:

- **C.1 Transporte de obrador y materiales.** Esta etapa compete a que el planificador de la obra constructiva se encarga de la contratación de los trabajadores y también de la obtención de los equipos, materiales y maquinaria para la ejecución de las obras civiles del proyecto.
- **C.2 Obrador y Campamento.** Consiste en el montaje, instalación y operación de la infraestructura necesaria para el alojamiento temporal del personal y equipo que ejecuta las labores de construcción, depósito de materiales y oficina administrativa.
- **C.3 Movimiento de Suelos.** Se denominan movimientos de suelo a aquellos trabajos que se relacionan con la modificación del relieve de un terreno.
 - **Desbroce.** Lo primero que se realiza cuando uno se enfrenta a un terreno es la limpieza o desmoche de tierras. El mismo consiste en un movimiento de tierras de muy escasa profundidad y gran superficie a partir del cual se quita la capa vegetal, orgánica, no estable.
 - **Nivelación.** Luego se procede a la nivelación realizada por la ejecución de desmontes y terraplenes. El desmonte consiste en rebajar el nivel del terreno por extracción de las tierras; el terraplén en aportes de tierras para elevar el nivel. En general se suele retirar de un lugar para colocar en otro.
 - **Excavaciones.** Las excavaciones son movimientos de tierra cuya profundidad, en relación con la superficie o la anchura, es más importante.
- **C.4 Obra civil:** referido a la construcción de toda la infraestructura requerida para la planta de biogás tal como la construcción de los tanques, sistemas de purificación del biogás, gasímetro, etc...

- **C.5 Instalación de equipos electromecánicos y sistemas de transporte:** Referido a la instalación completa de los sistemas de agitación, el intercambiador de calor, el grupo cogenerador, las bombas y los sistemas de tubería utilizados en el proyecto.
- **C.6 Acopio y transporte de materiales y escombros.** Esta etapa hace referencia a la recolección tanto de material de construcción como los escombros encontrados en los procesos anteriores para ser almacenados y transportados para luego ser utilizados.
- **C.7 Desmantelamiento del Obrador.** Consiste en el desmontaje, desinstalación y transporte de la infraestructura necesaria para el alojamiento temporal del personal y equipo que ejecuta las labores de construcción, depósito de materiales y oficina administrativa.

7.3.3.2 Etapa de operación

En la etapa de operación, se consideran todas las actividades involucradas en la planta de biogás descritas en la sección 4.6.5 “Descripción de la planta de Biogás” de la memoria descriptiva.

- O.1 Recepción, descarga y homogenización de residuos
- O.2 Digestión anaeróbica y generación de biogás
- O.3 Purificación del biogás.
- O.4 Cogeneración de energía
- O.5 Transporte y almacenamiento de biodigestato
- O.6 Aplicación de biofertilizante

7.3.3.3 Etapa de Abandono o Cierre

En caso de no realizar una reinversión para seguir utilizando la planta una vez finalizada su vida útil, se propone una el cierre total de la planta y la recomposición del área afectada. Las actividades que comprenden dicha etapa son las siguientes:

- **A.1 Desmontaje de equipos e instalaciones:** Implica el desmontaje completo y desinstalación de las unidades que componen la planta de biogás y los equipos electromecánicos comprendiendo cualquier tipo de infraestructura que sea requerida.
- **A.2 Recomposición del área:** Limpieza del área, acondicionamiento del suelo y cobertura con forraje típico del área presente.

7.4 Caracterización Ambiental del área de influencia

En el presente apartado se busca definir el Área de Influencia del Proyecto, la cual comprende el ámbito territorial compuesto por elementos del medio físico, elementos bióticos y elementos antrópicos en sus diferentes formas; los cuales se podrían ver afectados en forma positiva o negativa por la Construcción, la Operación y el cierre del Proyecto.

7.4.1 Área de Influencia del proyecto

- **Área de Influencia Directa (AID):** es aquella en la que se producen impactos -tanto directos, como indirectos- debidos a las actividades propias del Proyecto, ya sea que estén asociadas a su Etapa de Construcción, de Operación, de Abandono o en caso de producirse alguna contingencia.
- **Área de Influencia Indirecta (All):** es aquella en la que se producen impactos debidos a las actividades inducidas por el Proyecto o como consecuencia de su influencia sobre el medio manifestándose a partir de eventos sinérgicos en el mismo.

En el caso del Proyecto en estudio se estableció el Área de Influencia Directa (AID) en una extensión de 10 km de radio respecto del emplazamiento del Proyecto debido a la influencia que generan algunos de los aspectos más representativos del mismo, como ser el aumento de tránsito vehicular, la afectación sobre el paisaje y la calidad del aire. Asimismo se considera el impacto directo positivo que generará la fertilización del campo y campos vecinos con el bioestabilizado. Esta zona incluye toda el área de la granja Híbridos Argentinos S.A y los tramos de la Ruta Provincial N° 193 más cercanos a la misma.

Se considera que el Área de Influencia Indirecta (All) en relación al Proyecto en estudio tiene un alcance regional, ya que abarca la localidad de Zárate y las localidades aledañas que podrían verse afectadas de forma indirecta por el Proyecto (fuentes de trabajo, origen y transporte de suelos). Por todo lo antedicho, se establece el All en una extensión de 20 km de radio respecto del emplazamiento del Proyecto.

En la figura a continuación se representan el AID y se observan las localidades cercanas que conforman el All del Proyecto.

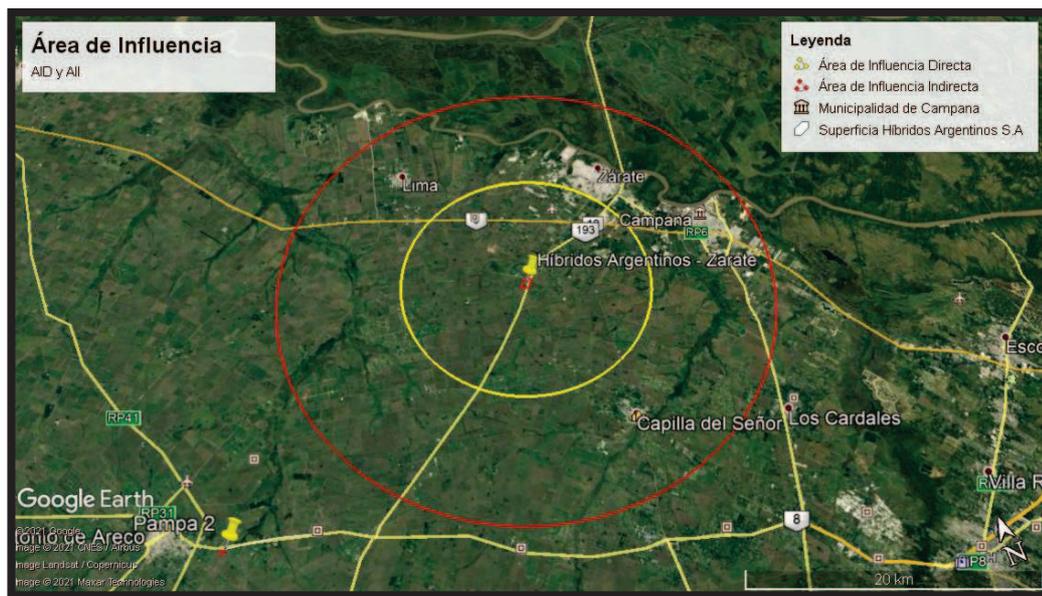


Imagen 7.2: Área de influencia directa e indirecta del proyecto. Fuente: elaboración propia.

7.4.2 Línea de base física

7.4.2.1 Meteorología

El clima en la región es “subtropical y húmedo” ya que las precipitaciones medias anuales son de aproximadamente 920 mm, con un máximo en marzo y un mínimo de mayo a julio. El balance hídrico no presenta déficit. La humedad atmosférica es elevada todo el año en razón de la presencia del río y de los múltiples pantanos y estanques de agua dando lugar a una particular atenuación de las amplitudes térmicas. La temperatura media anual varía entre 16 y 18°C. La media de la estación cálida oscila entre 22,5 y 23°C mientras que la de la estación fría lo hace entre 11°C y 16°C. Las heladas, que pueden producirse de mayo a septiembre, no afectan al sector más de una decena de días al año.

Los vientos dominantes, según datos de la Estación Meteorológica del INTA Delta, son del Nordeste (33%), del Sudeste (que provocan la llamada “Sudestada”) con una frecuencia del 22% y los del Este un 11%”.

Con el fin de detallar las condiciones climáticas del área en estudio se utilizaron los datos registrados en el período 2010-2017, en la Estación Experimental Agropecuaria San Pedro, del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), ubicada aproximadamente 80 km al NW del Predio en evaluación para aquellos parámetros que se encontraban disponibles, caso contrario se utilizaron los datos del periodo 1965-2010.

7.4.2.2 Precipitaciones

De los datos expuestos a continuación, puede observarse que las precipitaciones mensuales máximas se dan en febrero y las mínimas en julio (con valores de 118,95 mm y 31,07 mm respectivamente).

Mes	Precipitación Pluviométrica (mm)	Precipitación Cronológica (mm)	Precipitación Máxima 30 minutos (mm)
Enero	80,07	75,93	33,88
Febrero	118,95	124,41	49,54
Marzo	79,81	81,76	44,09
Abril	83,45	82,05	33,26
Mayo	44,95	52,76	19,57
Junio	39,16	39,23	17,19
Julio	31,07	31,24	10,22
Agosto	91,13	91,11	30,11
Septiembre	92,56	92,65	25,19
Octubre	111,28	108,74	37,66
Noviembre	90,18	92,71	31,76
Diciembre	102,21	100,82	47,54

Tabla 7.1: Precipitaciones Mensuales 2010 – 2017, estación INTA, San Pedro. Fuente: INTA

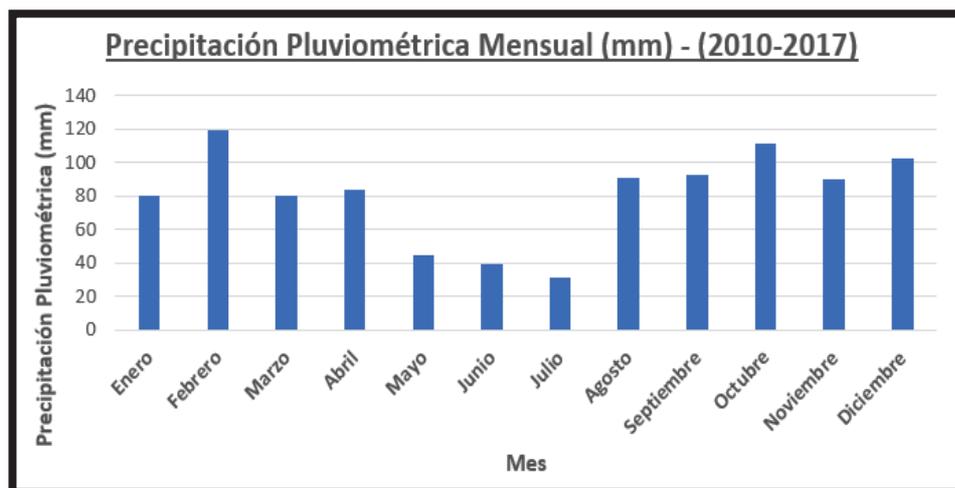


Figura 7.1: Precipitaciones Pluviométrica Mensual 2010 – 2017, estación INTA, San Pedro. Fuente: INTA

7.4.2.3 Temperaturas

De acuerdo con el registro de temperaturas para el período 2010-2017, los máximos valores promedio se registraron en el mes de enero (32,41°C) y los mínimos en junio (5,61°C).

Mes	Temperatura Media (°C)	Temperatura Máxima (°C)	Temperatura Mínima (°C)
Enero	24,96	32,41	18,79
Febrero	23,61	30,80	17,89
Marzo	20,89	28,45	15,03
Abril	18,17	24,96	12,69
Mayo	14,20	20,39	9,47
Junio	10,91	17,87	5,61
Julio	10,85	17,33	5,94
Agosto	12,74	19,11	7,45
Septiembre	14,51	21,18	8,95
Octubre	17,42	24,24	11,72
Noviembre	20,83	28,27	14,19
Diciembre	23,80	31,30	16,97

Tabla 7.2: Temperaturas Mensuales 2010 – 2017 (INTA – San Pedro). Fuente: INTA

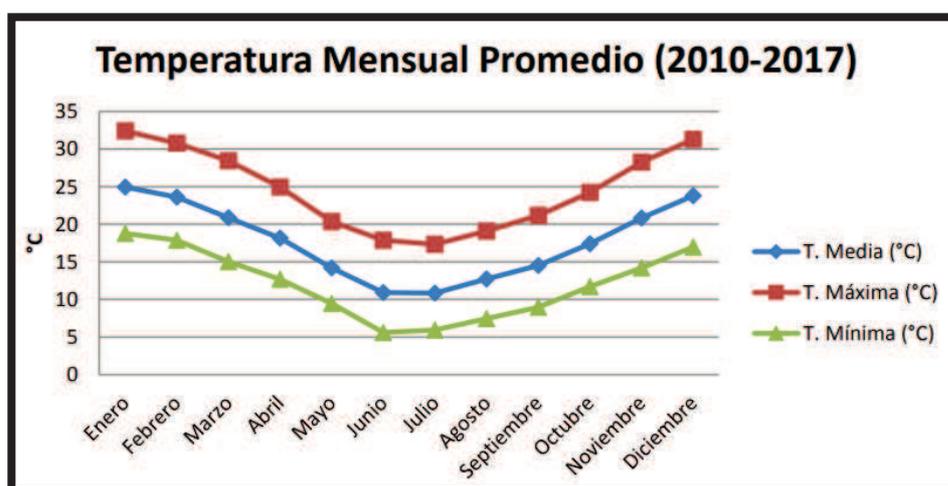


Figura 6.2: Temperatura media mensual, período 2010-2017, INTA San Pedro. Fuente: INTA

7.4.2.3 Humedad

Los valores de humedad media varían entre 81,49% en el mes de julio y 65,84% en diciembre, con un promedio anual para el período que ronda el 74,95%.

Mes	Humedad Media (%)
Enero	66,08
Febrero	72,35
Marzo	77,32
Abril	76,70
Mayo	79,47
Junio	80,74
Julio	81,49
Agosto	80,47
Septiembre	76,02
Octubre	75,22
Noviembre	67,67
Diciembre	65,84

Tabla 7.3: Humedad relativa mensual 2010 – 2017 (INTA – San Pedro). Fuente: INTA

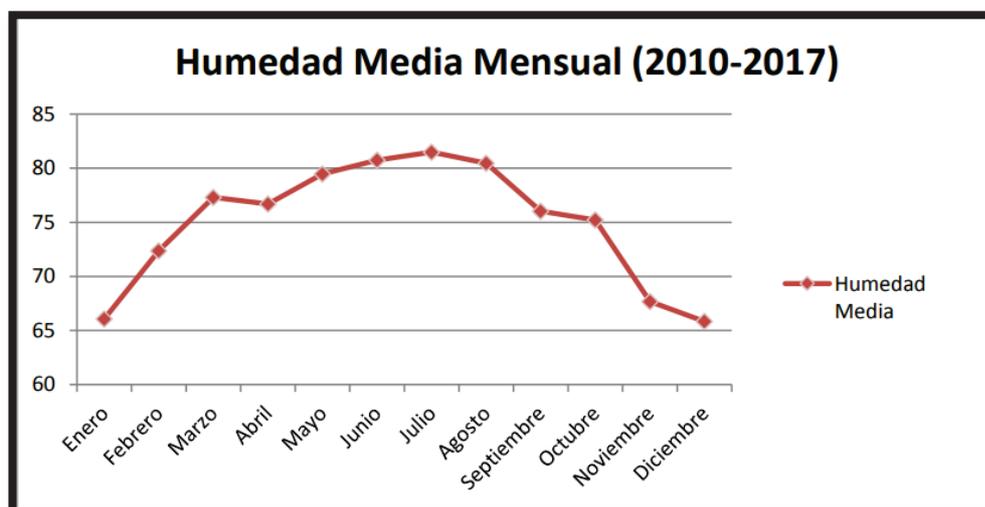


Figura 7.3: Humedad media mensual, período 2010-2017, INTA San Pedro. Fuente: INTA

7.4.2.4 Presión Atmosférica

En la siguiente Tabla se presentan los valores medios (P), máximos (Pmáx) y mínimos (Pmín), mensuales y anuales, de la presión atmosférica registrados a nivel de la estación. Los valores máximos mensuales presentan un pico de 1041,0 hPa (agosto), mientras que entre los valores mínimos, el menor valor registrado es de 980,1 hPa (enero, febrero, mayo y junio). Los valores medios mensuales de la presión atmosférica a nivel de la estación presentan un máximo de 1022,3 hPa (mayo) y un mínimo de 1014,4 hPa (diciembre). El valor medio anual es de 1019,6 hPa.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEPT	OCT	NOV	DIC
Presión atmosférica media [hPa]	1015,3	1018,2	1019,4	1018,5	1022,3	1020,1	1021,4	1020,7	1020,7	1017,5	1017,1	1014,4
Presión atmosférica máxima [hPa]	1028,7	1033,4	1031,2	1032,8	1033,0	1035,5	1037,8	1041,0	1037,5	1033,7	1030,8	1027,4
Presión atmosférica mínima [hPa]	980,1	980,1	1003,3	1001,3	980,1	980,1	980,2	999,2	1022,2	939,9	996,2	997,0

Tabla 7.4: Presión atmosférica a nivel del mar - Período 1965-2010. INTA-San Pedro. Fuente: INTA

7.4.2.5 Vientos

En términos generales, las precipitaciones son originadas por masas de aire húmedo procedentes del Noroeste y Norte, y por la masa de origen polar proveniente del Sur-Suroeste. La masa tropical se origina en el anticiclón subtropical semipermanente del Atlántico Sur, que origina corrientes de aire de características marítimas con alta humedad. La masa polar se origina en el Océano Pacífico y mantiene dos trayectorias:

- La corriente del Oeste, que penetra por la cordillera del norte patagónico y en el territorio nacional gira hacia el Noreste.
- La corriente del Sudoeste, que penetra por la cordillera sur patagónica y en el territorio nacional gira hacia el Norte.

Los vientos son de intensidad baja a media, con un valor promedio anual de 9,4 km/h, no existiendo una marcada diferencia a lo largo del año. Las máximas intensidades se registran entre los meses de septiembre y octubre, con velocidades medias mensuales promedio de 10,7 km/h, mientras que las mínimas corresponden al período marzo a abril, con valores medios de 8,2 km/h. Del análisis de los vientos a lo largo del año para el período 1965-2005, surge que los más frecuentes provienen de los cuadrantes Norte y Este, con frecuencias de 290 repeticiones promedio a lo largo del año, en tanto se registran vientos provenientes del Sur con frecuencias de 188 repeticiones. Los menores registros de frecuencia corresponden al cuadrante Noroeste y Sudoeste.

En cuanto a período de calmas anuales se registra una frecuencia de 169 días. Combinando las dos variables analizadas se puede concluir que los meses de septiembre y octubre presentan los vientos de mayor velocidad, siendo los sectores de mayor ingreso los cuadrantes Norte y Este, con velocidades medias de 10,7 km/h.

Dirección	N	NE	E	SE	S	SW	S	NW	Calma
Enero	337	96	349	48	188	36	91	34	174
Febrero	273	119	344	60	155	41	58	29	193
Marzo	273	158	391	95	206	50	72	24	185
Abril	320	133	288	72	203	77	112	28	207
Mayo	373	118	238	69	208	87	98	43	237
Junio	273	121	201	78	207	74	142	40	205
Julio	293	135	196	103	246	90	116	40	205
Agosto	266	122	217	89	238	73	86	19	144
Septiembre	267	110	283	103	194	54	63	27	112
Octubre	199	114	317	97	156	66	92	27	113
Noviembre	282	128	332	80	140	60	69	24	112
Diciembre	334	135	321	66	126	57	66	31	151
Anual	290	124	290	80	188	64	89	30	169

Tabla 7.5: Frecuencia de repetición de vientos por cuadrante – Valores promedio Período 1965-2010 (INTA San Pedro). Fuente: INTA

7.4.2.5. Calidad del aire

No hay estudios previos respecto a la calidad del aire de las áreas de influencia.

7.4.2.6. Medición de ruido

Al no tenerse datos sobre medición de ruidos de fondo se propone la utilización de la Norma IRAM 4062, la cual propone para el cálculo del ruido de fondo la utilización de una ecuación que involucra la sumatoria de:

- el nivel básico (L_b),
- el término de corrección por tipo de zona (K_z),
- el término de corrección por ubicación en el espacio a ser evaluado (K_u)
- el término de corrección por horario (K_h).

$$L_c = L_b + K_z + K_u + K_h \text{ (dBA)}$$

Considerando por norma un nivel básico de 40dBA, un término de corrección por zona correspondiente a zona rural:-5dBA, el término de corrección por ubicación como exterior 5dBA y el horario según corresponda el que se analice da como resultado la Tabla 2.

Período	Ruido de fondo (dBA)
Días hábiles: de 8 h a 20 h Sábados: de 8 h a 14 h	45
Días hábiles: de 6 h a 8 h y de 20 h a 22 h Sábados: de 14 h a 22 h Domingos y días feriados: de 6 h a 22 h	40
Noche: de 22 h a 6 h	35

Tabla 7.6: Niveles de ruido de fondo para la zona de ubicación del proyecto según el horario

7.4.2.7 Geomorfología

El predio se encuentra dentro de la provincia geológica denominada “Llanura Chaco Pampeana” y más específicamente en la unidad geomorfológica “Pampa Ondulada”. Esta unidad se caracteriza por ser una extensa llanura de sedimentos eólicos labrada por múltiples cursos subparalelos de rumbo SW-NE que desembocan en los ríos Paraná y De La Plata, los cuales le confieren el característico relieve ondulado. A menos de 5 km del predio se encuentra la unidad Delta del Paraná la cual representa el actual avance deltáico de los sedimentos transportados por el río Paraná hacia el estuario De La Plata como consecuencia del descenso del nivel del mar.

La pendiente natural del terreno a escala regional inclina suavemente hacia el NE, donde se encuentra la actual planicie de inundación del río Paraná, con pendientes de 1-3 %.

7.4.2.8 Edafología

Los suelos en la zona de estudio tienen buen desarrollo en profundidad, debido al clima de la región donde se observan buenos regímenes hídricos, presentando moderado a elevado contenido de materia orgánica y abundante cobertura vegetal, de tipo arbustiva. Aquí dominan los procesos de acumulación por sobre los de erosión, permitiendo la preservación de los horizontes.

Superficialmente los suelos están cubiertos por limos (transportados y acumulados en pequeños cuerpos de agua) y arcillas (movilizadas por el viento). La composición de los suelos es principalmente arcillosa y limoarcillosa, con contenidos menores de arena. La capa fértil posee una coloración relativamente más oscura a la que suprayace y un mayor contenido en nutrientes para el crecimiento de la vegetación. Presenta un espesor promedio de 35 cm (en los sectores sin alteración), con moderado contenido de raíces en la capa fértil y escasa presencia de fracciones gruesas dentro del perfil de suelo.

Los suelos del área de estudio se clasifican según la “Carta de Suelos de la Provincia de Buenos Aires” elaborada por el INTA a escala 1:50.000, bajo el Orden Molisol, Suborden Udol, Gran Grupo Argiudol, Sub Grupo Vértico. Estos suelos se caracterizan como suelos muy productivos con

horizonte A profundo, con transición a un potente B de 50-70 cm de espesor, con más de 50 % de arcilla y características vérticas.

Específicamente en la zona de estudio el suelo corresponde a la serie SOLIS. El mismo, es un suelo oscuro, pesado y profundo, de aptitud agrícola, que se encuentra en un paisaje de planicies levemente inclinadas en posición de planos de la Subregión Pampa Ondulada alta, moderadamente bien drenado, desarrollado sobre sedimentos loésicos, de texturas franco limosas, no alcalino, no salino con pendientes de 0-0,5 %.

7.4.2.9 Hidrología Superficial

El área de estudio se ubica dentro de la cuenca del Río Paraná, la cual posee un rumbo general hacia el SE con su cauce principal ubicado a aproximadamente 6 km al NE del Predio, en el delta del Paraná. Este sistema tiene asociadas en la zona analizada a las subcuencas del Río Luján y los arroyos De La Cruz y Pesquería, los cuales presentan un rumbo NE con diseños típicamente subdendríticos. Es sobre esta última subcuenca que se haya la totalidad del predio en estudio.

El arroyo Pesquería tiene sus nacientes en la localidad de Chenaut, perteneciente al partido de Exaltación De La Cruz. Este arroyo posee un rumbo general NE con su desembocadura en el río Paraná, donde se une con las bocas del río Luján y el arroyo De La Cruz.

El curso principal del arroyo es de carácter permanente, aunque presenta múltiples tributarios de carácter temporario a lo largo de todo su trayecto, que colecta la escorrentía superficial proveniente del Norte, transportándola hacia el arroyo Pesquería al Sur.

Cabe mencionar que este cauce se encuentra morfológicamente alterado, tanto por la actividad extractiva desarrollada décadas atrás dentro del Predio como por las actividades agrícolas e industriales desarrolladas al Norte del mismo (hacia la Ruta Provincial N° 193).

7.4.2.10 Hidrología Subterránea

En virtud de las similitudes litológicas e hidrogeológicas de las Formaciones Ensenada y Buenos Aires, se las agrupa dentro del Pampeano o sedimentos Pampeanos, que hidráulicamente se comportan como un acuífero de baja a media productividad, componiendo en su sección saturada el Acuífero Pampeano (AUGE, 1990). El Acuífero Pampeano se recarga por infiltración directa de la lluvia y además de sus propias características hidrogeológicas, se destaca por constituir la fuente de recarga del Acuífero Puelche, mediante el proceso de filtración vertical descendente (AUGE, 1986).

El agua contenida dentro del acuífero pampeano en general es químicamente apta para consumo humano, con salinidades que normalmente se ubican por debajo de 1 g/l. En lo referente a su composición, predomina el tipo bicarbonatado cálcico y sódico. En las vaguadas de las cuencas

hidrográficas principales (Matanza, Reconquista, Luján), el Pampeano falta debido a que fue erosionado fluvialmente durante la última glaciación y luego cubierto por el Postpampeano durante la desglaciación posterior.

7.4.3 Línea de base del medio biológico

El área de confluencia del Proyecto en estudio pertenece a la Región Neotropical y dentro de ella al Dominio Chaqueño, Provincia Pampeana, Distrito Pampeano Oriental. La provincia Pampeana ocupa las llanuras del Este de la República Argentina entre los grados 31 y 39 de latitud Sur. Cubre el Sur de Entre Ríos, Santa Fé y Córdoba, casi toda Buenos Aires y el Este de La Pampa. Limita al Norte, Oeste y Sur con la Provincia del Espinal, al Este y Sudeste con el Océano Atlántico. Se caracteriza por presentar llanuras horizontales o muy poco onduladas con algunas serranías de poca altura (hasta 1200 m).

La Provincia Pampeana se caracteriza por la predominancia de sabanas con gramíneas que pueden alcanzar 1 m de altura, hierbas y arbustos; bosques xéricos similares a los de la provincia del Chaco pero empobrecidos, sabanas de tipo inundables y bosques en galería a lo largo de los ríos. El distrito Pampeano se extiende por el Norte y Este de Buenos Aires, hasta Tandil y Mar Del Plata. Su límite austral lo forman las cadenas de sierras que nacen en el cabo Corrientes y llegan hasta el Oeste de Olavarría.

7.4.3.1 Flora

La comunidad florística original se encuentra conformada por *Piptochaetium montevidense*, *Stipa neesiana* y *Bothriochloa lagurioides*, aunque suelen presentarse como áreas relictuales ya que han sido muy afectados por la ganadería y la agricultura. También se encuentran *Aristida murina*, *Stipa papposa*, *Piptochaetium bicolor*, *Briza brizoides*, *Melica brasiliana*, *Danthonia montevidensis*, *Stipa charruena*, *Poe bonariensis*, *Agrostis montevidensis*, etc. Existen numerosas especies exóticas introducidas como los tréboles de carretilla (*Medicago polymorpha*, *Medicago minima*), el cardo (*Cardus acanthoides*), el cardo de castilla (*Cynara cardunculus*), la avena silvestre (*Avena barbata*), *Hypochoeris radicata*, *Poe annua*, *Briza minor*, entre otras.

En los cursos de los ríos y arroyos se observa presencia de monte semixerófilo, el pajonal asociado a vegetación acuática y la selva en galería. Existen algunos bosques de algarrobo en las inmediaciones de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires con relictos en las barrancas próximas a Lima, a Zárate y a Campana.

Las únicas especies arbóreas autóctonas, son las provenientes de otras zonas fitogeográficas cercanas, introducidas por la explotación ganadera o arrastradas por los ríos. Entre estas especies

se pueden mencionar el tala (*Celtis tala*), espinillos (*Acacia caven*), ombúes (*Phytolacca dioica*), sauce criollo (*Salix humboldtiana*) y cina-cina (*Parkinsonia aculeata*).

7.4.3.2 Fauna

El predio en estudio se encuentra ubicado al Noreste de la provincia de Buenos Aires, próximo a la ciudad de Zárate. Según el esquema propuesto por RINGUELET (1961) se encuentra dentro de la Subregión Guayano-brasileña, Dominio Pampásico. La zona ribereña del Río Paraná y del Río de la Plata es considerada una intrusión subtropical con una fauna especial que proviene del Norte, por lo cual estos sectores contienen especies pertenecientes al Dominio Subtropical, Distrito Mesopotámico meridional.

La fauna autóctona ha sufrido a lo largo del tiempo una intensa modificación de sus ambientes por la acción antrópica y muchas especies características, especialmente los grandes animales, han desaparecido de la región.

- Ictiofauna

En cuanto a la fauna ictícola, el área en análisis constituye un engranaje entre la fauna de peces del Delta del Río Paraná, con más de 180 especies (LIOTTA et al, 1995/96) y la cuenca del Río Salado, con 44 especies (ALMIRÓN et al, 1992) incluyendo especies de penetración marina, como las lisas. Entre éstas se encuentran el bagre (*Pimelodus maculatus*), el pejerrey (*Odontesthes bonariensis*), el boga (*Leporinus obtusidens*), el surubí (*Pseudoplatystoma coruscans*) y la tararira (*Hoplias malabaricus*).

- Herpetofauna (anfibios y reptiles)

El área en estudio se encuentra comprendida en el sector de la provincia con mayor riqueza de anfibios (GALLARDO, 1974). En ese sentido, en la Reserva Natural Otamendi fueron relevadas 21 especies nativas de anfibios y 16 especies de reptiles.

- Anfibios

Los anfibios se hallan asociados humedales representados por lo general por pastizales inundados, lagunas temporarias y las lagunas semi-permanentes o permanentes los cuales son vitales para la reproducción. Las especies más comunes para la provincia de BUENOS AIRES se distribuyen entre las familias Bufonidae, Ceratophryidae, Hylidae, Cycloramphidae, Leiuperidae y Leptodactylidae. Pueden registrarse diversas especies como el sapo común (*Rhinella arenarum*), sapito del jardín (*Rhinella fernandezae*), escuerzo Común (*Ceratophrys ornata*), escuercito (*Odontophrynus americanus*), ranita trepadora (*Dendropsophus nanus*), *Dendropsophus sanborni*, ranita de zarzal (*Hypsiboas pulchellus*), rana boyadora (*Pseudis minuta*), ranita trepadora hocicuda

(*Scinax squalirostris*), *Scinax* sp, *Pseudopaludicola falcipes* X X ranita silvadora enana (*Physalaemus fernandezae*) y varias ranas de género *Leptodactylus*. De las especies citadas *Ceratophrys ornata* ha sido calificado bajo la categoría de casi amenazada por UICN. El principal problema que afrontas los anfibios en la actualidad son la pérdida de hábitat (debido al desarrollo agrícola y el desarrollo de la vivienda), la contaminación del agua y del suelo debido a la agricultura, la industria y los asentamientos humanos.

- Reptiles

Los pastizales y ambientes acuáticos entre los que se incluyen arroyos, lagunas y canales son ambientes de importancia para los reptiles. Si bien el sector en estudio se encuentra altamente modificado por la acción antrópica coincide con la distribución natural de diversas especies que pueden llegar a registrarse de manera casual. Entre las tortugas (testudines) pueden registrarse en los sectores de humedal *Trachemys* sp (exóticas), tortuga de laguna (*Phrynops hilarii*) y tortuga cuello de serpiente (*Hydromedusa tectifera*). Entre los Squamata, los representantes de la familia Teiidae pueden encontrarse ejemplares de *Teius* sp y lagarto overo (*Tupinambis merianae*) estos últimos de registro común. Pueden observarse amphisbaenidae como la culebrita ciega (*Amphisbaena darwini heterozonata*). Además de varias especies de culebras como (*Clelia rustica*), (*Helicops leopardinus*), (*Helicops infrataeniatus*), (*Lygophis anomalus*), varias *Liophis* sp, (*Philodryas patagoniensis*), culebra de dos líneas (*Phalotris bilineatus*), (*Philodryas aestivus*), (*Tomodon ocellatus*) y *Thamnodynastes* sp. Entre los viperidae la yayará común (*Rhinocerophis alternatus*) perteneciente a la subfamilia Crotalinae y es considerada de importancia medica debido a la toxicidad de su veneno (GIAMBELLUCA, 2001).

- Aves

La Región Pampeana contiene diversos tipos de pastizales con características salinas, inundables, pajonales de cortadera y de junco, además se sectores arbolados. Las zonas ribereñas presentan selvas en galería y sectores inundables. Es por tal motivo existe una diversidad ornitológica de importancia. Entre las especies más representativas se pueden hallar tinamiformes como (*Nothura maculosa*), varios podicipediformes como el macá común (*Rollandia rolland*) y el macá pico grueso (*Podiceps occipitalis*), (*Tachybaptus dominicus*).

- Mamíferos

Los pastizales pampeanos presentan actualmente una fuerte modificación producto de la intervención antrópica. El desarrollo de los agrosistemas produjo una fuerte presión sobre la mastofauna bonaerense. Entre los mamíferos observados actualmente se encuentran el peludo

(Chaetophractus villosus), los cuises (Cavia sp), la comadreja overa (Didelphis albiventris), el zorro pampeano (Pseudolopex gymnocercus), el murciélago blancuzco (Lasiurus cinereus), la laucha de campo (Calomys laucha), la laucha manchada (Calomys musculinus), el coipo o falsa nutria (Myocastor coipus), la vizcacha (Lagostomus maximus), el carpincho (Hydrochaeris hydrochaeris), la mulita (Dasyopus hybridus), el venado de las pampas (Ozotocerus bezoarticus), el ciervo de los pantanos (Blasteroerus dichotomus) y el puma (Puma concolor).

7.4.3.3 Áreas Naturales Protegidas

A continuación, se enumeran las áreas protegidas existentes en el entorno del sitio de implantación del proyecto.

- RESERVA NATURAL DE USO MÚLTIPLE ISLA BOTIJA. Creada por el Decreto provincial N° 5.421/58 y ratificada por la Ley N° 14.179 del año 2010, esta reserva cuenta con una superficie de 1.000 ha y el objetivo de su creación es el de conservar la flora y fauna del lugar y los ambientes de albardón y pajonales representativos, además de contribuir a la investigación y fines educativos.
- RESERVA NATURAL DE USO MÚLTIPLE RÍO LUJÁN. Creada en el año 1996 por la Ley N° 11.801, abarca una superficie de 1000 ha en el partido de CAMPANA y es administrada por el poder ejecutivo provincial. Su creación tiene como objetivo la conservación de ambientes deltaicos con especies de importancia como la palmera pindó y el ciervo de los pantanos.
- RESERVA DE BIÓSFERA DELTA DEL PARANÁ. Ubicada en el partido de SAN FERNANDO, provincia de BUENOS AIRES, a 34°8' latitud sur y 58°36' longitud oeste, sobre un predio fiscal provincial, cuenta con una superficie de 88.624 ha. Fue creada por el Decreto Municipal N° 1303/00 y es administrada por el poder ejecutivo local.
- RESERVA NATURAL OTAMENDI. Creada por el Decreto Nacional N° 2149/90 y administrada por la Administración de Parques Nacionales, esta reserva cuenta con una superficie de 2.632 ha y su creación plantea como objetivo específico la protección de la fauna y flora del lugar y de la diversidad de ambientes que contiene (selva ribereña, bosques de la barranca, pastizales pampeanos, humedales). Está ubicada en el partido de CAMPANA a 34°14' latitud Sur y 58°53' longitud Oeste.

7.4.4 Línea de base socioeconómica

A efectos de realizar el análisis sociodemográfico, se tomó como base la información obtenida a través del Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas del INDEC del año 2001 y los datos

provisionales del Censo 2010. El partido de Zárate, que posee una superficie de 1.202 km², cuenta con dos sectores claramente identificables. Uno de ellos, denominado sector continental, se caracteriza por su condición de costa sobre el río Paraná De Las Palmas. El otro, denominado sector insular, es un territorio aluvional sometido a inundaciones periódicas que forma parte del Delta Del Paraná y abarca el 46% de la superficie del partido.

7.4.4.1 Población

Con una población aproximada de 130.000 habitantes y a 90 km de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, el Partido de Zárate está compuesto por la ciudad de Zárate, cabecera del Municipio y las localidades de Lima, Escalada e Islas Talavera y Botija (reserva natural). Según los datos reflejados por el Censo Nacional de del año 2010, la población de Zárate en el año 2010 era de 114.269 habitantes (datos del año 2010 del INDEC). La densidad poblacional aproximada es de 95.1 hab/Km². Del análisis de la variación intercensal, surge que en 2010 había un 12,8% más de habitantes que en el año 2001. Zárate es uno de los principales centros nacionales de concentración de nuevos emprendimientos industriales y empresarios. La puesta en marcha del MERCOSUR no ha hecho más que afirmar la condición de Zárate como puente de entrada de dicha asociatividad internacional, de próspero presente y futuro. Esto es producto de su ubicación geográfica privilegiada y vías de comunicación terrestre y fluvial.

En cuanto al partido de CAMPANA, el 80% de la población del reside en la localidad cabecera, en el presente más íntimamente ligada a las actividades industriales que a las del ámbito rural. El dato demográfico en CAMPANA se actualiza cada 10 años por INDEC (Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas). La población de CAMPANA en el año 2010 era de 94.461 habitantes. La densidad Poblacional es de 96.2 hab/km².

7.4.4.2 Vivienda

El número total de hogares relevados en 2010 fue de 36.528 unidades. El 80 % de las viviendas presentan buenas condiciones de habitabilidad, mientras que el 20 % restante se consideran viviendas deficitarias y un 15,1 % corresponden a hogares con necesidades básicas insatisfechas. El 4,5% de los hogares censados presentan un grado de hacinamiento crítico.

7.4.4.3 Educación

De acuerdo con los datos de la Dirección General de Cultura y Educación de la provincia de Buenos Aires, en el partido de Zárate existe un total de 152 establecimientos educacionales, 111 correspondientes a establecimientos estatales y, el resto, al ámbito privado.

De acuerdo a los datos aportados por el Censo 2001, el 98,07 % de los mayores de 10 años se encuentran alfabetizados y sólo el 3 % de la población de más de 15 años no ha recibido instrucción. En relación al nivel primario, el 31 % completó sus estudios. El 23 % de la población posee secundario incompleto y el 17 % secundario completo. Sólo un 13 % de la población económicamente activa accedió a educación superior, ya sea terciaria y/o universitaria, haya o no completado sus estudios, mientras que el 30 % posee secundario completo.

7.4.4.4 Salud

Según la información publicada por el Ministerio de Salud de la provincia de Buenos Aires, el partido de Zárate cuenta con 31 centros de salud, entre los cuales se destacan:

- el Hospital Zonal General de Agudos Descentralizado de ZÁRATE VIRGEN DEL CARMEN;
- 24 Salas de primeros auxilios;
- el Centro Integrador Comunitario de Zárate;
- la Unidad Sanitaria de LIMA, Dr. ALEOTTI;
- el Centro de Rehabilitación del Lisiado Zárate;
- la Unidad Sanitaria de COVEPAN EUSEBIO RETA;
- la Unidad Sanitaria SAN MARTÍN DE PORRES; el Centro Médico ATUCHA.

7.4.4.5 Actividades económicas de la zona

En el Partido de Zárate, según los datos de la Dirección Provincial de Estadísticas del Ministerio de Economía de la provincia de BUENOS AIRES, la principal actividad económica del partido es la industria manufacturera, alcanzando un 58,5 % del sector económico. El rubro de servicios inmobiliarios, empresariales y de alquiler representa el 8 %, seguido por el transporte, almacenamiento y comunicaciones con un 6,8 % y la agricultura con el 4,1 % de la actividad económica total del partido.

- Actividad agropecuaria.

En la zona comprendida por el partido de Zárate y alrededores, conforme información suministrada por la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación de la Nación, del promedio de la producción agraria de los últimos diez años, los cultivos que ocupan la mayor superficie son la soja, con 21.231 ha equivalentes al 17,66 % de la superficie del partido, y el maíz en segundo lugar, con 1.988 ha cosechadas. En cuanto a la actividad ganadera, el ganado más importante es el vacuno, dado que el grueso se destina a la producción de leche.

- Actividad industrial.

El partido de Zárate es uno de los polos industriales más relevantes dentro de la provincia de Buenos Aires. Cuenta con un parque industrial estratégico, teniendo en cuenta la ubicación que posee, ya que se encuentra en uno de los extremos del puente Zárate-brazo largo, que une las provincias de Buenos Aires y Entre Ríos, y comunica la región pampeana con la mesopotámica, y desde allí con Uruguay y Brasil. Entre las principales industrias del partido se pueden mencionar:

- Industria automotriz. En las cercanías de Zárate, sobre la Ruta Nacional 12 km 81, a aproximadamente 12 km al Sudeste del Parque Logístico Industrial, se encuentra una Planta de producción de vehículos y autopartes de la firma Toyota inaugurada en 1997, que tiene una capacidad de producción de 69.000 unidades al año.
- Industria papelerera. Se destaca la firma PAPELERA DEL PLATA S.A., ubicada en Camino de la Costa Brava, con una capacidad de producción de 100.000 tn/año, y CELULOSA CAMPANA S.A., sobre el Camino Viejo a ATUCHA, también dedicada a la producción de papel tisú.
- Industria Cervecera. La Cervecería y Maltería QUILMES es una de las empresas más importantes de bebidas de la ARGENTINA. Elabora cervezas, gaseosas, aguas minerales, jugos e isotónicos, con una capacidad de producción de 4.200.000 hls/año, o 432.959.690 botellas.
- Generación de Energía Eléctrica. En la localidad de Lima se ubican las centrales nucleares ATUCHA I, que opera desde el año 1974 y ATUCHA II que opera desde 2011. En el mismo predio se encuentran en fase de construcción el prototipo CAREM 25, de diseño nacional.
- Planta de tratamiento de residuos especiales: Dentro del sector industrial de Zárate se localiza la empresa HERA AILINCO, dedicada al tratamiento por incineración, físico químico y disposición final de residuos especiales. También se ubica la planta EITTOR, dedicada a la recuperación de aceites lubricantes.

7.4.4.6 Infraestructura de servicios

- Agua Potable.

La prestación del servicio público de suministro de agua potable en jurisdicción del partido se encuentra a cargo de la firma AGUAS DE ZÁRATE S.A., a través de 42 pozos de extracción del recurso hídrico subterráneo, en este caso, acuífero Puelche, con un sistema de desinfección con estaciones de cloración a boca de pozo. De acuerdo a la información censal, el servicio de agua por red alcanza al 85 % de los hogares del partido de Zárate. El servicio de provisión de pozo con bomba

a motor se encuentra muy poco extendido (2,8 %), mientras que el resto de los hogares cuentan con sistemas individuales de abastecimiento considerados deficientes (bomba manual, pozo, aljibe, etc.).

- Desagües Cloacales.

La prestación del servicio público de desagües cloacales en jurisdicción del partido se encuentra a cargo de la firma AGUAS DE ZÁRATE S.A. La cobertura es menor que la del agua, ya que sólo el 58 % de los hogares poseen servicio de red de cloacas, en tanto que el 42 % restante debe recurrir a otros sistemas de evacuación de efluentes. El servicio no cuenta con planta de tratamiento, por lo que se realiza el vertido crudo al cauce del río PARANÁ DE LAS PALMAS a través de una cloaca máxima, en una zona descampada pero muy cercana al núcleo urbano, contaminando las costas del río en la zona inmediata.

- Energía Eléctrica.

El partido de Zárate cuenta con la COOPERATIVA DE ELECTRICIDAD Y SERVICIOS ANEXOS LIMITADA que tiene a su cargo la distribución de energía eléctrica a todo el partido bajo los términos establecidos por ordenanza municipal, siendo responsable exclusiva del suministro a una cartera de aproximadamente 32.000 usuarios, entre residenciales, comerciales, industriales, rurales y grandes consumidores. Cabe destacar que, del total de la energía eléctrica distribuida, el 30 % corresponde a consumo domiciliario y el restante 70 % a las industrias del partido.

La Cooperativa es agente del mercado eléctrico mayorista, y gracias al tipo de contrato celebrado con la firma CAMMESA, la provisión de energía es de carácter ininterrumpible, asegurando así el suministro a los usuarios. La red se alimenta desde dos estaciones transformadoras, propiedad de la transportista TRANSBA y un sistema completo de transformación y distribución propiedad de la cooperativa, a saber:

- Estación Transformadora ZÁRATE
- Estación Transformadora LAS PALMAS
- Cinco líneas de 132 KV
- Seis salidas de 36 KV
- Cinco salidas de 13,2 KV
- 686 subestaciones transformadoras de 13,2 KV

- Gas Natural:

El servicio de distribución de gas natural se encuentra a cargo de la empresa GAS NATURAL BAN S.A.

- Gestión de Residuos Sólidos Urbanos.

AGROTÉCNICA FUEGUINA S.A.C.I.F se adjudicó el Servicio de Recolección de Residuos Sólidos Urbanos (RSU) en marzo de 2013; presentándose como la única empresa oferente.

7.5 Identificación y evaluación de impactos ambientales

7.5.1 Metodología Empleada

En el presente Apartado se realizará una identificación y evaluación de los impactos ambientales que pueden ocurrir sobre los componentes del sistema ambiental receptor, derivados de la construcción, operación, mantenimiento y desafectación del Biodigestor de la granja Híbridos Argentinos S.A a realizarse en la localidad de Zárate, en la Provincia de Buenos Aires.

La evaluación de los impactos ambientales surge del cruce entre los aspectos ambientales (acciones generadoras de efectos) y los elementos receptores, mediante un tratamiento analítico y discusión y a través de una “Matriz de Impactos Ambientales”. Los aspectos ambientales generadores de potenciales impactos se dividen según las tres etapas del proyecto:

- Etapa de construcción.
- Etapa de operación y mantenimiento.
- Etapa de abandono o cierre.

A estas acciones se han agregado las provocadas por hechos anormales o contingencias. Estas son originadas como consecuencia de hechos no previstos e indeseados, ya sea que puedan producirse dentro de la realización del Proyecto o debido a condiciones externas al mismo (fenómenos atmosféricos, incendios de campos, etc.). Los factores ambientales receptores de los posibles impactos del proyecto, según el medio afectado son:

- MEDIO NATURAL
 - Componente biótico y perceptual: flora, fauna y paisaje.
 - Componente físico: aguas subterráneas, aguas superficiales, aire, suelo superficial, subsuelo.
- MEDIO ANTRÓPICO
 - Sociocultural: infraestructura, usos del suelo, salud y seguridad.
 - Económico: generación de empleos.

La calificación de esta matriz se ha realizado considerando las medidas mitigatorias propuestas, el plan de contingencias ambientales y las medidas generales de buenas prácticas.

7.5.2 Matriz de evaluación de impactos ambientales

Consiste en una herramienta de carácter cualitativo, que se basa en ubicar en filas las diferentes acciones generadoras de impactos, agrupadas en las etapas: acondicionamiento del área, emplazamiento de instalaciones y obra de canalización del cause; operación y mantenimiento y abandono. En columnas, los factores del medio, elementos receptores en el orden en que fueron expuestos anteriormente. Para todas las etapas, los impactos se califican según su signo (positivo, negativo, neutro), intensidad (mínima o nula, baja, moderada, buena/óptima o severa/crítica), extensión (puntual, difusa), persistencia (permanente, transitorio), entre otras variables, que se detallan de acuerdo al siguiente algoritmo:

$$I = +/- (3i + 2EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + MC)$$

Dónde:

- **Signo:** (+ beneficioso, - perjudicial); en función del tipo de alteración que sufre el factor ambiental afectado. Puede ser positiva o negativa, dependiendo si aumenta o disminuye la calidad ambiental, respectivamente.
- **Intensidad (i):** determina el nivel de gravedad del impacto ambiental producido por las actividades sobre los factores. Puede ser baja, media o alta.
- **Extensión (EX):** se califica en función de la magnitud de la superficie que cubre el impacto ambiental. Puede ser puntual, si el impacto no rebasa los límites de la locación, local si esta de
- **Momento (MO):** determinado en función del lapso de tiempo que toma la aparición del impacto. Su rango de calificación se ha determinado en largo plazo, mediano plazo e inmediato.
- **Persistencia (PE):** se califica en función del tiempo que permanece presente el impacto. Su rango de calificación se ha determinado en fugaz, temporal y permanente.
- **Acumulación (AC):** calificada por la permanencia e incremento de la intensidad del impacto en el tiempo. Se divide en simple y acumulativa.
- **Reversibilidad (RV):** calificada por la capacidad natural de recuperación de la calidad ambiental de cada factor. Se divide en reversible a corto plazo, largo plazo e irreversible.
- **Sinergismo (SI):** se produce cuando el efecto conjunto de la presencia simultánea de varios agentes, supone una incidencia ambiental mayor que el efecto suma de las incidencias individuales, contempladas aisladamente. Igualmente, se incluye en este tipo, aquel efecto cuyo modo de acción induce en el tiempo la aparición de otros nuevos.

- **Efecto (EF):** función del tipo de incidencia del impacto sobre el factor. Existen dos tipos: indirecto y directo.
- **Periodicidad (PR):** determinada en función de la frecuencia de aparición del impacto. Está dividida en irregular, periódica y continuo.
- **Recuperabilidad (MC):** calificada por la capacidad natural de recuperación de la calidad ambiental de cada factor. Se divide en reversible a corto plazo, largo plazo e irreversible.
- **Importancia (I):** valor que se obtendrá en base a la aplicación de la ecuación.

Cada uno de los términos de este algoritmo se evalúa en conjunto con el grupo de especialistas, según la siguiente Tabla orientativa:

Signo		Intensidad (i)	
Beneficioso	+	Baja	1
Perjudicial	-	Media	2
Neutro	0	Alta	4
		Muy alta	8
		Total	12
Extensión (EX)		Momento (MO)	
Puntual	1	Largo plazo	1
Parcial	2	Medio plazo	2
Extenso	4	Inmediato	4
Total	8	Critico	(+4)
Critica	(+8)		
Persistencia (PE)		Reversibilidad (RV)	
Fugaz	1	Corto plazo	1
Temporal	2	Medio plazo	2
Permanente	4	Irreversible	4
Sinergia (SI)		Acumulación (AC)	
Sin sinergismo	1	Simple	1
Sinérgico	2	Acumulativo	4
Muy sinérgico	4		
Efecto (EF)		Periodicidad (PR)	
Indirecto	1	Irregular	1
Directo	4	Periódico	2
		Continuo	4
Recuperabilidad (MC)			
Recuperable inmediato	1	Mitigable	4
Recuperable	2	Irrecuperable	8

Figura 7.4: Calificación y valoración de impactos. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, de acuerdo al valor obtenido, el impacto se lo califica dentro de los siguientes rangos de importancia:

Variables	Clasificación	Desde	Hasta
Signo / Intensidad	Neutro	0	
	(+) Bajo	1	24
	(+) Moderado	25	49
	(+) Bueno / Relevante	≥50	
	(-) Bajo	-24	-1
	(-) Moderado	-49	-25
	(-) Severo / Crítico	≤-50	

Figura 7.5: Calificación y valoración de impactos ambientales. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se expone la matriz de impactos ambientales confeccionada para el presente proyecto. La misma puede visualizarse con mayor detalle en el anexo del proyecto.

PROYECTO		Matriz de Impacto Ambiental																			
Planta de Biogás - Híbridos Argentinos S.A		MEDIO NATURAL							MEDIO ANTRÓPICO							IMPORTANCIA RELATIVA POR ACTIVIDAD					
ETAPAS	Acciones susceptibles de provocar impactos	BIÓTICO Y PERCEPTUAL				FÍSICO			SOCIOCULTURAL			ECONÓMICO									
		FLORA	FALUNA	PAISAJE	IMPORTANCIA RELATIVA	AGUA SUBTERRANEA	AGUA SUPERFICIAL	AIRE	SUELO SUPERFICIAL	SUBSUELO	IMPORTANCIA RELATIVA	IMPORTANCIA RELATIVA	INFRAESTRUCTURA	SALUD/SEGURIDAD	USOS DEL SUELO		IMPORTANCIA RELATIVA	GENERACIÓN DE EMPLEO	CAPACITACIÓN LABORAL	IMPORTANCIA RELATIVA	IMPORTANCIA RELATIVA TOTAL
Etapas de Construcción	Transporte de obrador y materiales	-18	-13	-25	-18,7	0	0	0	0	0	0	-7,0	0	-19	-14	-11,0	16	0	8	-3,4	-5,6
	Obrador y Campamento	-16	-17	-25	-19,3	0	0	0	0	0	0	-7,3	0	-19	-17	-12,0	19	0	9,5	-3,4	-5,8
	Movimiento de Suelos	-41	-27	-25	-31,0	0	0	-17	0	0	-3,4	-13,8	0	-19	-20	-13,0	16	0	8	-4,6	-10,2
	Obra civil	-23	-14	-25	-20,7	0	0	-14	0	0	-2,8	-9,5	0	-19	-14	-11,0	16	16	16	-0,2	-5,9
	equipos electromecánicos y sistemas de transporte	0	-16	-16	-10,7	0	0	0	0	0	0	-4,0	0	-19	-14	-11,0	13	19	16	-0,2	-2,5
	Acopio y transporte de materiales y escombros	-16	-13	-19	-16,0	0	0	-11	0	0	-2,2	-7,4	0	-16	-14	-10,0	13	0	6,5	-3,4	-5,8
Etapas de Operación	Desmantelamiento del Obrador	-16	-16	-16	-16,0	0	0	-11	0	0	-2,2	-7,4	0	-19	-17	-12,0	16	0	8	-4	-6,1
	Recepción, descarga y homogenización de residuos	0	0	0	0,0	0	0	-15	-18	0	-6,6	-4,1	0	-16	0	-5,3	16	13	14,5	2,6	-1,5
	Digestión anaeróbica y generación de biogás	0	0	0	0,0	0	0	-35	0	0	-7	-4,4	0	-26	0	-8,7	0	16	8	-2	-3,5
	Purificación del biogás.	0	0	0	0,0	0	0	-35	0	0	-7	-4,4	0	-26	0	-8,7	0	16	8	-2	-3,5
	Cogeneración de energía	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	-20	0	-6,7	0	25	12,5	1	0,4
	Transporte y almacenamiento de biodigestato	0	0	0	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0	-16	0	-5,3	0	19	9,5	0,6	0,2
Etapas de Cierre	Aplicación de biofertilizante	27	16	0	14,3	33	31	0	28	19	22,2	19,3	0	0	25	8,3	13	16	14,5	10,8	16,0
	Desmontaje de equipos e instalaciones	-18	-17	-25	-20,0	-13	-16	0	-23	-17	-13,8	-16,1	0	0	0	0,0	16	0	8	3,2	-8,7
	Recomposición del área	43	30	29	34,0	0	0	25	37	25	17,4	23,6	0	0	0	0,0	23	0	11,5	4,6	16,3

Tabla 7.7: Matriz de Impactos Ambientales. Fuente: elaboración propia

7.5.3 Descripción de impactos ambientales

A partir de la interpretación de la matriz de Impacto Ambiental que es parte integral de la presente Evaluación de Impacto Ambiental, se desprenden los siguientes impactos ambientales potenciales, correspondientes a las distintas fases del Proyecto:

7.5.3.1 Impactos ambientales en la etapa de construcción

No se observan impactos ambientales críticos o severos en la etapa de construcción, sin embargo, se observa que los factores ambientales más afectados son los correspondientes al medio biológico, es decir, la flora, la fauna y el paisaje. A su vez, se generan impactos positivos en el medio antrópico. A continuación, se describen los impactos de mayor importancia.

La emisión de polvo, material particulado, gases y vapores generada por el movimiento de suelo intenso y las emisiones de gases de combustión de los equipos a utilizar en las actividades de construcción (preparación inicial del sitio / montaje de área operativa / montaje de Equipos e instalaciones auxiliares), así como el movimiento de vehículos livianos, puede provocar la asfixia de la vegetación baja existente en los alrededores del predio del proyecto. Los impactos sobre la flora derivados de la eliminación y degradación de la cobertura vegetal como resultado de la emisión de polvo, material particulado, gases y vapores, o aplastamiento de los individuos son considerados bajos.

Asimismo, las pérdidas de aceite, grasas, combustibles y lubricantes debido al movimiento vehicular pueden afectar la vegetación existente en el área del predio, zonas adyacentes o del camino de acceso al mismo. La generación y disposición de residuos asimilables a domiciliarios e industriales no especiales en esta etapa se considera como un impacto bajo sobre la flora, ya que los mismos serán almacenados durante la etapa de obra.

El retiro total de la cobertura vegetal debido al desarrollo del proyecto provocará un impacto negativo indirecto, de extensión parcial y de duración permanente sobre la fauna que se sirve de ésta para alimentación y cobijo. En cuanto a la ocurrencia de eventos no previstos como explosión y/o incendio, se podría generar un impacto de magnitud moderada sobre la flora dada la magnitud y extensión que podrían presentar si el fuego se propagase hacia los predios linderos y cercanos.

La obra en sí (presencia de vehículos, equipos, maquinaria pesada, entre otros) podrá causar una disminución de la calidad visual y estética del paisaje, principalmente considerando su paso por los caminos de acceso.

El material particulado a generarse durante la etapa de construcción, correspondiente al polvo proveniente del suelo, principalmente asociado a la circulación de vehicular por el camino de acceso,

que disminuirá la visibilidad, siendo éste un impacto de persistencia fugaz y baja intensidad, el cual podrá afectar el paisaje existente.

Las actividades desarrolladas durante la etapa constructiva vinculadas al empleo de vehículos, equipos y maquinaria, conllevará a la emisión de ruido y vibraciones, gases, vapores y material particulado de diverso origen, lo cual podrá provocar daños en la salud del personal afectado a la obra y aumentar el riesgo de accidentes. Este impacto se considera bajo y aceptable siempre y cuando se cumpla con el correcto empleo de los elementos de protección personal pertinentes a cada operación. A pesar de que el material particulado emitido es inerte, su peligrosidad está asociada principalmente al riesgo de inhalación por parte de las personas.

Por último, cabe destacar que como impacto positivo se presenta un aumento temporal en la generación de empleo y de la capacitación del personal para la construcción de la obra y los sistemas de transporte del biogás y el biodigerido.

7.5.3.2. Impactos ambientales en la etapa de operación

Observando la matriz de impactos ambientales, se observa que los principales factores ambientales afectados negativamente son la calidad del aire en el medio físico, y la salud y seguridad en el medio socioeconómico.

La calidad del aire se ve afectada por las emisiones de gases emitidos por la maquinaria utilizada que luego se acumularán en la atmósfera.

- Contaminación por gases de efecto invernadero emitidos por la quema de biogás excedente, gases que luego se acumularan en la atmósfera.

En cuanto a la ocurrencia de eventos no previstos (contingencias), el único caso en que se podría generar un impacto, de magnitud moderada, sobre el aire lo confiere una explosión y/o incendio, dada la magnitud y extensión que podrían presentar.

En cuanto a la aplicación del biofertilizante sobre el suelo, éste trae una serie de impactos positivos sobre diferentes factores. Los mismos se enumeran a continuación:

- Aumento de la microbiología de los suelos de cultivo por aplicación de biofertilizante.
- Aumento del contenido de nutrientes de los suelos de cultivo por aplicación de biofertilizante.
- Aumento del contenido de materia orgánica de los suelos de cultivo por aplicación de biofertilizante.
- Mejora de la estructura de los suelos de cultivo por aplicación de biofertilizante.
- Aumento de la higiene y seguridad por aplicación de biofertilizante inocuo.

7.5.3.3 Impactos ambientales en la fase de abandono

Al finalizar la vida útil del proyecto, corresponderá realizar el desarmado de las instalaciones y la recomposición general del área. La clausura de la planta de biogás implicará la revegetación e integración paisajista al entorno mediante la siembra de especies herbáceas locales o forrajeras, lo cual generará un impacto positivo sobre el paisaje, la flora, la calidad del aire y el agua superficial ya que minimizará la voladura de residuos livianos y material particulado e impedirá los arrastres de material fino a la red hidrográfica e indirectamente sobre la fauna y la población aledaña.

En el caso del desmontaje de equipos e instalaciones auxiliares, los impactos a generar serán análogos a los descritos para las tareas de montaje de equipos durante la etapa constructiva dada la similitud de las operaciones a llevar a cabo en ambas etapas: manipuleo de cañerías (corte, retiro de cañerías), desafectación de instalaciones complementarias, empleo de equipos, maquinarias y vehículos; con los consecuentes aspectos ambientales asociados: emisión de calor, vibraciones, ruido, gases, vapores y material particulado de diverso origen; generación de residuos de todo tipo debido a tareas de limpieza.

Durante el desmontaje de los equipos y sus instalaciones complementarias) es posible que ocurran derrames y/o pérdidas que podrán impactar sobre el agua superficial, el suelo y subsuelo y posteriormente el agua subterránea, sin embargo considerando que se acatarán rápidamente las Medidas de Mitigación propuestas, el impacto se considera bajo a moderado.

7.6 Análisis de riesgos

Con el fin de prevenir accidentes, los peligros en las plantas de biogás deben identificarse, evaluarse y minimizarse sistemáticamente. Una herramienta generalmente utilizada en la prevención de riesgo en la industria que permite llevar a cabo este análisis es la matriz de riesgos, en la cual se muestran, en forma de tabla, las probabilidades de que ocurra un evento no deseado (el riesgo) en relación con las consecuencias de ese evento.

7.6.1 Identificación de peligros

Las plantas de biogás son sistemas de ingeniería de procesos complejos en las cuales puede producirse toda una serie de peligros diferentes. Básicamente, los peligros pueden dividirse en peligros para la salud humana y peligros para el medio ambiente.

7.6.1.1 Peligros para el medio ambiente.

El medio ambiente solamente está expuesto al peligro si se produce una fuga de biogás a la atmósfera o los materiales de trabajo de la planta (p. ej. sustrato de digestión, efluentes de ensilaje,

aceites o combustibles) penetran en medios acuáticos vecinos. Un accidente de este tipo puede ser causado por fallos estructurales o errores operativos. Los peligros para el medio ambiente que se derivan de las plantas de biogás se pueden dividir en emisiones gaseosas al aire y vertidos en el suelo y el agua.

- Emisiones gaseosas

Una de las principales ventajas medioambientales que presenta la tecnología del biogás es que se evitan las emisiones incontroladas de gases de efecto invernadero procedentes del almacenamiento de materiales orgánicos. Sin embargo, también se produce metano —un gas de efecto invernadero especialmente potente— mediante el proceso de digestión anaeróbica que tiene lugar en las plantas de biogás.

El tanque de almacenamiento de digestato constituye una de las principales fuentes de emisiones de metano, especialmente si no cuenta con una cubierta hermética al gas. La unidad CHP también presenta algún peligro, pero en menor grado. Otros componentes de la planta suelen ser relativamente herméticos al gas, pero pueden producirse fugas de gas en las piezas que conectan el sistema de almacenamiento de gas con los pozos del digestor y el predigestor.

Durante la combustión del biogás se generan varios productos de combustión como óxidos de nitrógeno, dióxido de azufre, monóxido de carbono, etc. Las emisiones de estos productos deberían regularse en el marco de las disposiciones nacionales respectivas.

- Vertidos en el suelo y el agua

Las cantidades de líquidos procesados y almacenados en las plantas de biogás oscilan entre cerca de cien y varios miles de metros cúbicos, los tanques individuales suelen albergar varios miles de metros cúbicos. El contenido de los tanques no debería poder verterse al entorno, ni en el marco del funcionamiento normal ni en caso de accidente. Es más probable que los impactos medioambientales se originen en la carga orgánica y de nutrientes. Si un tanque tiene una fuga, por ejemplo, se vierten al entorno grandes cantidades de líquidos contaminados orgánicamente. Si se vierten en el entorno grandes cantidades de sustrato, existe un riesgo considerable de eutrofización de los medios acuáticos.

7.6.1.2. Peligros para la salud humana

Dadas las potenciales fuentes de peligro existentes en una planta de biogás, es imposible descartar completamente peligros para la salud de los operadores, empleados y terceras partes. Dichos peligros para la salud humana se pueden dividir en cuatro categorías:

- Peligros por sustancias peligrosas.

Son sustancias, materiales o mezclas que presentan determinadas propiedades peligrosas. Las sustancias peligrosas que con especial probabilidad se pueden encontrar en las plantas de biogás son el mismo biogás, auxiliares tecnológicos, aceites, carbón activo, efluentes de ensilaje, purines, desechos y agentes biológicos.

- Peligros eléctricos

En las plantas de biogás se utiliza una gran variedad de aparatos eléctricos (equipos de control, unidad CHP, bombas, agitadores, instrumentos de medición, etc.). Bajo determinadas circunstancias, estos aparatos pueden tener efectos adversos sobre la salud como resultado de los peligros eléctricos que conlleva la presencia de energía eléctrica.

- Peligros mecánicos

Los peligros mecánicos no son específicos de la tecnología del biogás. Sin embargo, los tipos de accidente más comunes en las plantas de biogás son atribuibles a peligros mecánicos: caídas, impactos, contusiones, cortes.

- Peligros de explosión e incendio

Una explosión se define como la reacción química repentina de una sustancia inflamable con oxígeno, liberando grandes cantidades de energía. Al liberar energía, se produce una expansión repentina del volumen de gases. Dependiendo de las circunstancias, en las plantas de biogás se pueden producir dos tipos de explosión:

- Detonación: es una combustión rápida que se produce en el límite de explosividad. La presión generada es menor que en el caso de una deflagración, pero es suficiente para destrozarse los cristales de las ventanas, por ejemplo. Con frecuencia, las lesiones del personal se limitan a magulladuras, quemaduras y cortes.
- Deflagración: es una forma de explosión en la cual la velocidad de propagación del frente de reacción es inferior a la velocidad del sonido en el correspondiente medio y las columnas de gas de la combustión fluyen en dirección contraria a la propagación. La presión resultante es suficiente para dañar o destruir edificios completamente. Las personas pueden sufrir lesiones graves, que incluso pueden llegar a ser mortales.

- Peligros originados por el biogás

El biogás es una mezcla de diferentes gases, cuya concentración puede variar dependiendo de la planta en cuestión. Los constituyentes del biogás aparecen enumerados más abajo, junto con sus propiedades en relación con los riesgos que suponen para la salud humana. El límite de

exposición en el lugar de trabajo (TRGS 900, 2016) o límite de exposición profesional (LEP) es la concentración media ponderada cronológicamente de una sustancia en el aire en el lugar de trabajo durante un período de referencia especificado en el cual no se espera que se produzcan daños agudos o crónicos en la salud de los empleados y empleadas. Por regla general, el límite se establece partiendo de la suposición de que la exposición se produce durante ocho horas al día, cinco días a la semana, a lo largo de la vida laboral.

	Propiedades	Atmósfera peligrosa	Límite exposición lugar trabajo
CO ₂	Gas incoloro e inodoro. Más pesado que el aire.	8 % v/v, peligro de asfixia.	5.500 ppm
NH ₃	Gas incoloro de olor penetrante. wMás ligero que el aire	Por encima de 30–40 ppm, se produce irritación de las membranas mucosas, el tracto respiratorio y los ojos. Por encima de 1.000 ppm, dificultad para respirar, puede inducir una pérdida de consciencia.	20 ppm
CH ₄	Gas incoloro de olor penetrante. Más ligero que el aire.	4,4–16,5 %	-
H ₂ S	Gas incoloro altamente tóxico. Más pesado que el aire. Hueve a huevos podridos	Por encima de una concentración de 200 ppm, se reduce el sentido del olfato y el gas ya no se percibe. Por encima de 700 ppm, inhalar sulfuro de hidrógeno puede causar paro respiratorio.	5 ppm

Figura 7.6: Propiedades de los constituyentes gaseosos del biogás. Fuente: (TRGS 900, 2016) y (SVLFG, 2016)

7.6.2 Matriz de Riesgos

La metodología para la confección de la matriz de riesgos se basó en valorar cuantitativamente los peligros en función de la probabilidad de ocurrencia y la gravedad de sus consecuencias potenciales. Para ello, la probabilidad de que un evento ocurra o surta efecto se categorizó y valorizó de la siguiente manera:

Probabilidad de Ocurrencia (PO)		
Categoría - Probabilidad	Descripción	Valor cuantitativo
Infrecuente	Puede ocurrir, pero probablemente nunca sucederá	1
Improbable	No es probable que ocurra en circunstancias normales	2
Posible	Puede ocurrir en algún punto	3
Probable	Se espera que ocurra en algún punto	4
Casi seguro	Se espera que ocurra regularmente bajo circunstancias normales	5

Tabla 7.8: Categorización y valorización de la probabilidad de ocurrencia. Fuente: elaboración propia.

Las consecuencias potenciales y su correspondiente gravedad se categorizaron y valorizaron del siguiente modo:

Consecuencias Potenciales (Cp)		
Categoría - Probabilidad	Descripción	Valor cuantitativo
No significativas	Lesiones de poca gravedad o malestar. Sin tratamiento médico o consecuencias físicas mensurables.	1
De poca importancia	Lesiones o enfermedad que requieren tratamiento médico. Incapacidad temporal	2
Moderadas	Lesiones o enfermedad que requieren hospitalización	3
De gran importancia	Lesión o enfermedad que causan incapacidad permanente	4
Graves	Fallecimiento	5

Tabla 7.9: Categorización y valorización de las consecuencias potenciales. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, los riesgos para cada peligro son estimados mediante la siguiente ecuación.

$$Riesgo (R) = Probabilidad de ocurrencia (PO) \times Consecuencias Potenciales (Cp)$$

A su vez, de acuerdo al valor obtenido se los clasificó en riesgos bajos, medio, alto y muy alto.

Valoración del riesgo (R)		
Categoría - Probabilidad	Descripción	Valor cuantitativo
Bajo	RIESGO ACEPTABLE	< 5
Media	RIESGO CONDICIONALMENTE ACEPTABLE - APLICAR ACCIONES CORRECTIVAS DE SER POSIBLE	entre 5 y 8
Alto	RIESGO CONDICIONALMENTE ACEPTABLE - OBLIGACIÓN DE APLICAR ACCIONES CORRECTIVAS	entre 8 y 15
Muy alto	RIESGO NO ACEPTABLE - REQUIERE ACCIÓN CORRECTIVA INMEDIATA	> 15

Tabla 7.10: Categorización y valoración del riesgo. Fuente: elaboración propia.

Los resultados obtenidos deben ser tenidos en cuenta en el diseño, selección de equipos y materiales y a la hora de diseñar las estaciones de trabajo, los procesos de trabajo, producción y las secuencias operativas, así como la manera en que estos interaccionan entre sí. Asimismo, lo anterior se define en el reglamento de seguridad para plantas de biogás.

Por regla general, el operador será responsable de realizar la evaluación del peligro o, en su caso, un experto en prevención de riesgos designado por el operador para tal fin. La evaluación del peligro debe actualizarse antes del arranque de la planta, tras cualquier reanudación de las operaciones y después de haber realizado cambios relevantes en términos de seguridad.

7.6.3 Resultados - Matriz de Riesgos

A continuación se presenta la matriz de evaluación de riesgos confeccionada para el presente proyecto.

Evaluación de Riesgos - Matriz				
Peligro		Probabilidad	Consecuencia Potencial	Riesgo
Peligros para el medio ambiente	Emisiones atmosféricas	3	1	3
	Vertidos en el suelo y agua	1	4	4
Peligros para la salud humana	Sustancias peligrosas	1	3	3
	Peligros eléctricos	2	2	4
	Peligros mecánicos	3	3	9
	Peligros de explosión e incendio	1	5	5
	Peligros por Biogás	3	3	9

Tabla 7.11: Evaluación de riesgos ambientales. Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar, no existen riesgos inaceptables en el proyecto, aunque se evidencia riesgo condicional con obligatoriedad de corrección en lo que concierne a los peligros mecánicos y por exposición al biogás. Por último, de ser posible se deben aplicar acciones correctivas sobre el riesgo de explosión e incendio.

7.7 Plan de Gestión Ambiental y Social

El Plan de Gestión Ambiental se compone del Plan de Mitigación Ambiental, Plan de Monitoreo Ambiental y Plan de Contingencias Ambientales. El conjunto de estos documentos tiene por objeto evitar, reducir, recomponer (Plan de Mitigación Ambiental), controlar (Plan de Monitoreo Ambiental) y responder (Plan de Contingencias Ambientales) ante aquellos impactos potenciales del proyecto, identificados a partir de la EIA. Para la implementación del Plan de Gestión Ambiental se recomienda establecer claramente, en el ámbito organizativo, las funciones y responsabilidades de

cada actor involucrado, asignando al gerenciamiento del PGA un nivel de decisión cercano a la Dirección del Proyecto.

Un componente de relevancia para la elaboración del Plan de Gestión Ambiental del Proyecto es la determinación de las Medidas de Mitigación de los Impactos negativos identificados y evaluados en la EIA.

7.7.1 Plan de Mitigación Ambiental

Una vez evaluados e identificados los Impactos negativos que puedan ser generados, se definen las Medidas de Mitigación y acciones que se deban adoptar para controlar y reducir al máximo los efectos de los mismos, haciendo viable la ejecución de la obra sin mayores trastornos.

Se define como Medidas de Mitigación Ambiental al conjunto de acciones de Prevención, Control, Atenuación, Restauración y Compensación de impactos ambientales negativos que deben acompañar al desarrollo de un Proyecto para asegurar la sustentabilidad del mismo y la protección del medio ambiente, incluyendo tanto los aspectos que hacen a la integridad del medio natural, como a los que aseguren una adecuada calidad de vida para la comunidad involucrada.

El siguiente Plan es un conjunto de Medidas y Recomendaciones técnicas que tiene como objetivo la minimización de los Impactos negativos sobre los aspectos naturales y antrópicos.

Calidad del aire y ruido

Los posibles efectos ambientales derivados de las diferentes tareas constructivas entre las que se han destacado la emisión de polvo y el incremento de los niveles sonoros, podrán prevenirse con actuaciones de fácil aplicación y bajo coste económico, proponiéndose las que se especifican a continuación.

Los motores de la maquinaria se tendrán en perfecta puesta a punto, con el fin de asegurar el mantenimiento adecuado de la misma y reducir los ruidos generados por su tránsito.

Se limitará la velocidad de los camiones, evitando las aceleraciones y frenadas fuertes, lo que contribuirá a reducir al máximo los niveles sonoros producidos por la maquinaria móvil de obra.

La realización de las obras deberá llevarse a cabo estrictamente en periodo diurno (7 a.m – 22 p.m.). En caso de existir alguna queja vecinal por las emisiones de ruido, se realizará una inspección de la zona y se comprobará el correcto funcionamiento de los equipos

En relación con las posibles alteraciones de la calidad del aire por emisión de polvo a la atmósfera debida a la acción de la maquinaria, la apertura de zanjas, la descarga y extensión de materiales, se procederá al riego suficiente de las distintas zonas, especialmente en los periodos más secos, a fin de evitar dicha emisión, en el caso de considerarse necesario.

Se establecerá un procedimiento de limpieza periódica de los camiones y maquinaria móvil que evite el arrastre de partículas y la diseminación de sedimentos por las vías de comunicación próximas, evitando así la emisión de polvo en las inmediaciones. Los camiones que transportan el material deben someterse a una limpieza antes de su entrada en carretera de uso público si es necesario.

Puesto que no se puede eliminar la emisión de gases procedentes de los motores de combustión interna de los camiones y maquinaria, para reducir en lo posible sus efectos, se mantendrá siempre una correcta puesta a punto de todos los motores, antes del inicio de las obras. Esta puesta a punto deberá ser llevada a cabo por servicio autorizado.

Paisaje, Fauna y Flora

A continuación, se enumeran las medidas orientadas a mitigar los impactos negativos sobre el medio biológico del proyecto:

- Las instalaciones fijas provisionales se situarán en zonas poco visibles.
- Se evitarán, en la medida de lo posible, los ruidos intensos y vibraciones en la época de cría y reproducción de las especies anidantes.
- Los restos orgánicos generados durante la realización de las obras se depositarán en contenedores con sistemas de cierre.
- El tránsito de la maquinaria se realizará exclusivamente por las áreas marcadas al efecto.

7.7.2 Plan de Contingencias Ambientales

El objetivo del Plan de Contingencias Ambientales es el de establecer los procedimientos a llevar a cabo para prevenir y/o remediar la ocurrencia probable de siniestros o desastres por causa de las acciones del Proyecto. Esto requiere de la formulación de un PCA cuyo propósito será garantizar una adecuada respuesta ante incidentes o eventos que pongan en riesgo los recursos naturales, la integridad de las personas vinculadas y no vinculadas al Proyecto, o los bienes de la compañía. En el marco de la legislación vigente y sobre la base del análisis de riesgos realizado, se indicarán todas aquellas medidas a llevar a cabo durante la emergencia.

Este procedimiento será de aplicación en cualquier momento comprendido entre el inicio y el final de la obra, así como durante las etapas de operación, mantenimiento y desafectación o abandono. Define las acciones y mecanismos necesarios para dar una respuesta adecuada y coordinada ante las siguientes situaciones:

- Incendios.

- Evacuación médica.
- Accidentes vehiculares

7.7.2.1 Incendios

La persona que detecte el incendio dará la voz de alarma. La persona designada en el rol de llamadas de la Municipalidad dará aviso al cuartel de bomberos. En caso que el incendio sea un fuego incipiente, se intentará (siempre y cuando se evalúe que sea seguro hacerlo) sofocarlo con los extintores correspondientes al tipo de fuego, o mediante el uso de la red contra incendios del Proyecto. En caso de ser un incendio declarado e incontrolable el Supervisor de Operaciones pondrá en práctica estas acciones:

- Evacuar a todas las personas que se encuentren presentes en el Predio hasta ubicarlas en un lugar seguro previamente definido como “punto de reunión”. Este lugar debe definirse en el procedimiento de la Municipalidad y ser conocido por toda persona que ingrese al Predio (personal propio, contratistas, transportistas, visitas, etc.).
- Alertar a los servicios de autobomba y seguridad según corresponda indicando lugar y forma de llegar. Bloquear los accesos de otros vehículos y personas ajenas a los equipos de respuesta a la emergencia.
- Alejar todos los elementos combustibles de la zona de incendio siempre y cuando sea seguro hacerlo.

Una vez que no exista peligro para las personas se iniciarán las tareas de recomposición y remediación ambiental, tales como:

- Recolección de escombros.
- Control de daños.
- Eliminación de peligros para la salud y seguridad de los trabajadores.
- Restablecimiento de servicios.

7.7.2.2 Evacuación Médica

El observador Inicial, al tomar conocimiento de una emergencia de este tipo, dará aviso inmediatamente al Supervisor de Operaciones especificando gravedad de situación, ubicación, medidas estimadas a realizar, etc. El Supervisor iniciará la cadena de llamados de acuerdo al rol de llamadas de la Municipalidad.

Durante la llegada de la ambulancia, proveer primeros auxilios a la víctima (solo si se tiene conocimiento y es necesario).

Se procederá a retirar y trasladar a los afectados de la zona, únicamente si la permanencia de la persona en el lugar representa un mayor riesgo.

En caso de afectación por productos químicos, asegurarse que el personal médico tenga conocimiento de los materiales involucrados y que tome las precauciones para protegerse a sí mismo. Por lo tanto deberá encontrarse una copia de las Hojas de Seguridad de los productos químicos involucrados y los EPP correspondientes.

El personal médico atenderá al paciente y evaluará su situación, decidiendo sobre la necesidad de trasladar al afectado hacia un centro de atención de mayor complejidad (prestador habilitado por su ART).

En todos los casos, preservar el lugar del accidente para facilitar la investigación judicial salvo que resulte imprescindible realizar modificaciones con el objetivo de minimizar o eliminar el riesgo para el personal que se encuentre trabajando en el área, las instalaciones o el medio ambiente. Completar reportes de incidentes y remitirlos al área que corresponda.

7.7.2.3 Accidentes vehiculares

Si se produjera un accidente de tránsito dentro del Predio del Proyecto o en sus inmediaciones, el observador Inicial, dará aviso inmediatamente al Supervisor de Planta especificando gravedad de situación, ubicación, medidas estimadas a realizar, etc. El Supervisor iniciará la cadena de llamados de acuerdo al rol de llamadas de la Municipalidad.

Se procederá a retirar y trasladar a los afectados de la zona, únicamente si la permanencia de las personas en el lugar representa un mayor riesgo.

7.7.3 Plan de Monitoreo Ambiental

El Monitoreo Ambiental contempla una serie de actividades sistemáticas y ordenadas, tendientes a establecer un control y seguimiento de las afectaciones al ambiente en el área de influencia de las actividades del proyecto para las diferentes etapas: construcción, operación y cierre, con el fin de controlar las actividades que puedan incidir sobre el ambiente.

Objetivos:

- Controlar y realizar seguimiento a las actividades del proyecto, y a la aplicación de las medidas ambientales.
- Corroborar o no, los impactos a través del tiempo y espacio, en base a evaluaciones periódicas, tanto en la fuente como en el objeto sobre el cual recae.

- Disponer de documentos, registros y evidencias de las tareas que se realizan para llevar el control de las acciones contenidas en el Plan de Monitoreo en cuanto a medidas ambientales y actividades operativas del proyecto.

A continuación, se expone el plan de monitoreo ambiental del presente proyecto:

Plan de Monitoreo Ambiental				
Medio	Parámetro	Frecuencia de Muestreo	Lugar de monitoreo	Legislación Aplicable
Calidad de Aire	MP, NOx, CO, SO2, BTEX Ruidos molestos al vecindario	Anual	Fuentes Fijas en la instalación	Ley Nacional N° 5965 de la Provincia de BUENOS AIRES Decreto Reglamentario Nacional N° 3395/96 Norma IRAM 4062
Calidad del suelo	pH, Conductividad eléctrica (CE), Sodio (Na+), Potasio (K+), Calcio (Ca+2), Magnesio (Mg+2), Porcentaje de sodio intercambiable (PSI), Materia orgánica oxidable, Nitrógeno total (N), N-NO-3, S-SO-24, Fósforo total y extractable, Elementos Potencialmente Tóxicos	3 años	Lugar de aplicación del biodigerido	Resolución 19/2019 de la Secretaría de Gobierno de Ambiente y Desarrollo

Tabla 7.12: Plan de monitoreo ambiental. Fuente: elaboración propia.

7.8 Marco Legal

Los proyectos de biogás deberán seguir y cumplir con todo el marco legal y normativo exigible en el país, dependiendo de las actividades que se desarrollen durante todo el ciclo de vida del proyecto. Esto es, acogerse a las leyes, reglamentaciones y normas técnicas, establecidas en el marco jurídico imperante del país.

7.8.1 Normativa Ambiental Nacional

- **Constitución Nacional:** Los habitantes gozan del derecho a un ambiente sano, equilibrado, apto para el desarrollo humano y para que las actividades productivas satisfagan las necesidades presentes sin comprometer las de las generaciones futuras; y tienen el deber de preservarlo. El daño ambiental generará prioritariamente la obligación de recomponer, según lo establezca la ley. Las autoridades proveerán a la protección de este derecho, a la utilización racional de los recursos naturales, a la preservación del patrimonio natural y cultural y de la diversidad biológica
- **Ley 25.675:** “Ley General del Ambiente”: Establece los presupuestos mínimos 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. La política ambiental argentina está sujeta al cumplimiento de los siguientes principios: de congruencia, de prevención, precautorio, de equidad intergeneracional, de progresividad, de responsabilidad, de subsidiariedad, de sustentabilidad, de solidaridad y de cooperación.

- **Ley 23.918:** Ratifica la Convención sobre Conservación de Especies Migratorias de Animales (1991)
- **Ley 24.295:** Ratificación de la Convención Marco sobre Cambio Climático (1993)
- **Ley 24.375:** Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Conservación de la Biodiversidad Biológica (1994)
- **Ley 24.701:** Aprueba la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación en los países afectados por sequía grave o desertificación (1996)
- **Ley 25.438:** Ratificación del Protocolo de Kyoto (2001)
- **Ley 25.841:** Acuerdo Marco sobre Medio Ambiente MERCOSUR: se comprometen a cumplir con los principios enunciados en la Declaración de Río de Janeiro sobre Medio Ambiente y Desarrollo de 1992. Complementan el acuerdo normas aprobadas en el ámbito del Mercosur (2003)
- **Ley 26.106:** Se aprueba la enmienda del Protocolo de Montreal relativo a las sustancias que agotan la capa de ozono (2006)
- **Pacto Federal Ambiental (1993):** La Nación y Provincias acuerdan: agilizar y dar mayor eficiencia a la preservación del ambiente teniendo como referencia los postulados del Programa 21 aprobado en la CNUMAD '92. Reconocen al Consejo Federal de Medio Ambiente como instrumento válido para la coordinación de la política ambiental en la República; se comprometen a compatibilizar e instrumentar en sus jurisdicciones la legislación ambiental
- **Ley 24.051** "Ley de residuos peligrosos": Regula el tratamiento, disposición y transporte de residuos peligrosos, establece responsabilidades y sanciones.
- **Ley 24.065** El Marco Regulatorio Eléctrico sancionado en 1992 mediante Ley No 24.065. El Artículo 98 de la Ley No 24.065 contempla la adhesión de las provincias al Marco Regulatorio Eléctrico nacional.
- **Ley 26.093** : Régimen de Regulación y Promoción para la Producción y Uso Sustentables de Biocombustibles.

- **Ley 27.191:** reforma de la Ley 26.190, modificó y amplió el Régimen de Fomento Nacional para el uso de Fuentes Renovables de Energía destinada a la Producción de Energía Eléctrica.

7.8.2 Normativa Ambiental Provincial de Buenos Aires

- **Constitución Provincial (1994)**
- **Ley 11.459:** Ley de Radicación Industrial
- **Ley 11.723:** Ley Integral del Medio Ambiente y los Recursos Naturales
- **Ley 4977:** Aprueba la reglamentación del Estudio de Impacto Ambiental.

7.9 Conclusiones

Los resultados de la evaluación ambiental en cuanto a la ubicación del emprendimiento no afecta a la comunidad vecina, y se tomarán las medidas necesarias para evitar molestias a la misma.

En el análisis y evaluación ambiental de las distintas áreas del proyecto, se identifica cada acción o actividades que presumiblemente podrán causar potencialmente impactos con efectos negativos y cuáles serían las medidas de mitigación pertinentes que los responsables deberán implementar para hacer que dicho emprendimiento sea sustentable.

Igualmente, la evaluación de impacto ambiental considera que la aplicación en tiempo y forma del proyecto en el sitio identificado, genera también, impactos con efectos positivos específicamente en el medio socioeconómico y el medio físico, principalmente el suelo mediante la fertilización con biodigerido.

Se entiende que el proyecto es factible de realizar desde el enfoque socio, ambiental y económico, debido a que los potenciales impactos negativos pueden ser mitigados adecuadamente con la aplicación de las medidas ambientales y que el emprendimiento tiene un aspecto social y económico y es de carácter potencialmente positivo porque contribuye a mejorar la calidad de vida de los habitantes dado que la misma corresponde a una actividad de servicios y genera fuentes de empleos salvaguardando la calidad de los recursos naturales.

Por lo tanto, se concluye en el Estudio de Impacto Ambiental que el Proyecto será sostenible en cuanto a la equidad social, viabilidad económica y protección ecológica. En ese sentido, se dará un énfasis al seguimiento o monitoreo de todas las acciones señaladas en las distintas áreas del proyecto, para que el Plan de Gestión Ambiental propuesto del proyecto sea eficaz y eficiente.

8. Conclusiones

En primera instancia, resulta importante señalar que se logró cumplir con los objetivos propuestos, tanto el objetivo general como los objetivos específicos.

Mediante la caracterización y cuantificación del efluente generado se definieron los parámetros que se encontraban por fuera de la norma para la descarga por absorción al suelo. De esa manera, se analizaron dos posibles alternativas para el tratamiento de los mismos. Considerando los objetivos plasmados en el proyecto y observando las características de ambos sistemas de tratamiento analizados, se optó por utilizar un sistema de biodigestión con cogeneración de energía.

El sistema de tratamiento adoptado asegura el cumplimiento de las normas y parámetros tanto de la generación de energía a partir de biogás, como de la calidad del biodigestato como mejorador de suelo, ambos productos sujetos a sus normas respectivas y a las autoridades de aplicación correspondiente descritos en los estudios preliminares del proyecto.

La memoria de cálculo y el cómputo y presupuesto justifican la viabilidad técnica y económica del proyecto. La instalación de la planta de biogás permite a la empresa minimizar los costos de disposición de efluentes a largo plazo y generar fuentes de ingreso mediante la comercialización de la energía generada. El análisis económico presentó un período de recuperación de la inversión de 13 años y una tasa interna de retorno del 16%. A su vez, se permite la valorización del biodigestato, pudiendo ser utilizado como un mejorador de suelos, y con potencial para ser registrado ante el ministerio de agricultura como fertilizante y de esa manera, ser comercializado.

Mediante la evaluación de impacto ambiental se observa que la instalación de la planta de biogás impacta positivamente sobre el medio socioeconómico y ambiental. El cumplimiento del plan de gestión ambiental asegura el correcto funcionamiento del proyecto mediante los programas de prevención, seguimiento, monitoreo y contingencias. La evaluación de impacto ambiental y el plan de gestión ambiental justifican la viabilidad ambiental del proyecto.

9. Planos

En el presente capítulo se detallarán las dimensiones y especificaciones constructivas del sistema propuesto. Los planos tienen su base en lo detallado en la memoria de cálculo, aunque se encuentran sujetos a cambios de acuerdo al cálculo estructural de las unidades que excede el alcance de este proyecto. Se presentan a continuación los planos, los cuales corresponden a:

- Plano 1: Vista superior de planta.
- Plano 2: Vista lateral hidráulica en Corte (A-A).
- Plano 3: Vista lateral de la línea de conducción 1 en corte.
- Plano 4: Vista lateral de la línea de conducción 2 en corte.
- Plano 5: Vista lateral del sistema de purificación de biogás en corte (B-B).
- Plano 6: Vista lateral de la línea de conducción 3.

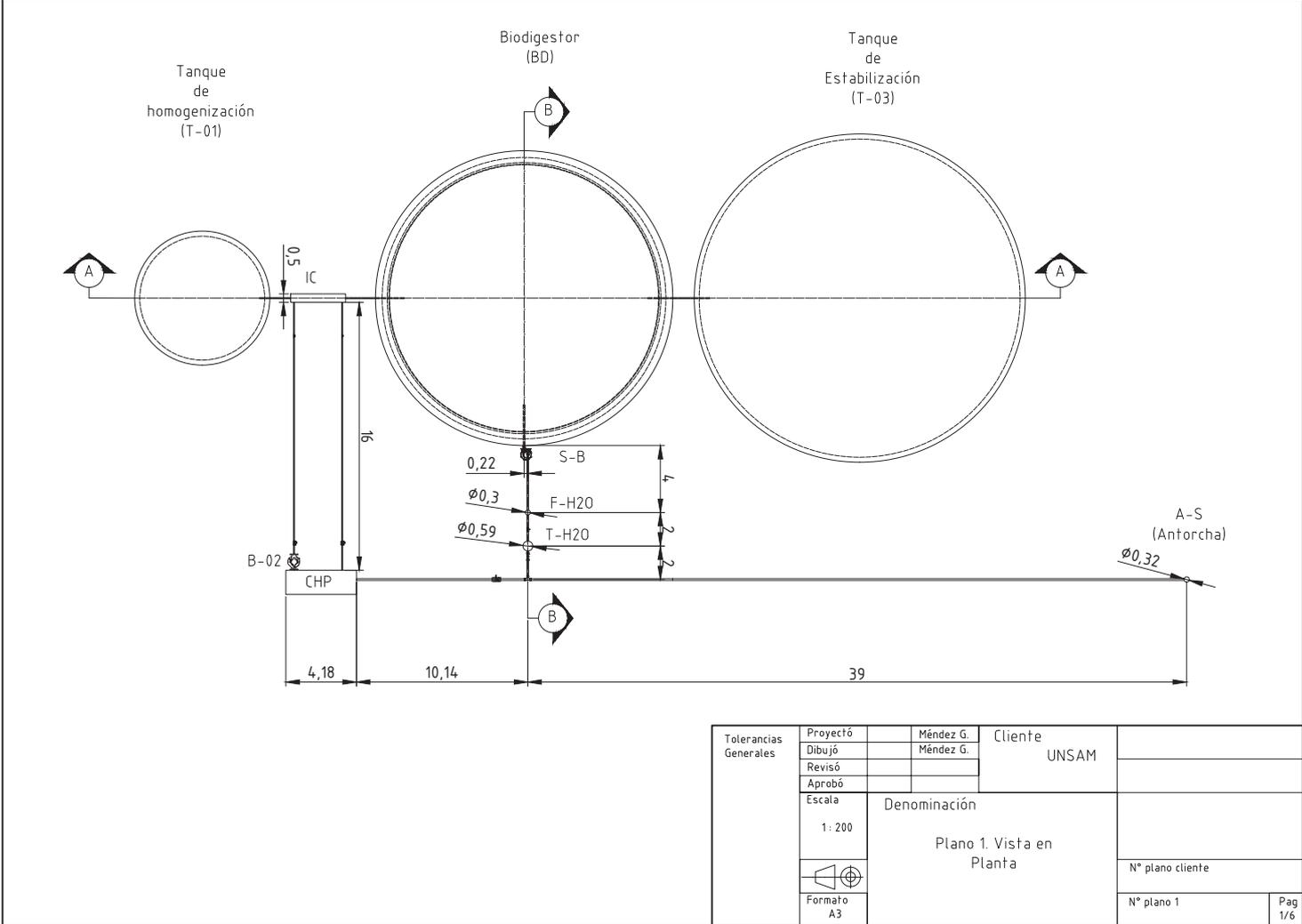
Se utilizan las siguientes denominaciones para cada una de las unidades y componentes del sistema:

1. Área de recepción, descarga y homogeneización de materias primas
 - Tanque de alimentación-homogeneización de sustratos (T-01)
 - Agitador del tanque de alimentación homogeneización (A-01)
 - Bomba sumergible de alimentación (B-01)
2. Área de digestión anaerobia y generación de biogás
 - Intercambiador de calor externo para calentamiento de sustrato (IC)
 - Bomba del agua caliente (B-02)
 - Digestor anaerobio (DA):
 - Agitador del digestor anaerobio (A-02)
 - Gasómetro (GA)
 - Soplador biogás (S-B)
3. **Área de purificación del biogás**
 - Trampa de humedad (T-H₂O)
 - Filtro de H₂S (F-H₂S)
 - Antorcha de seguridad (A-S)
4. **Área de Cogeneración**

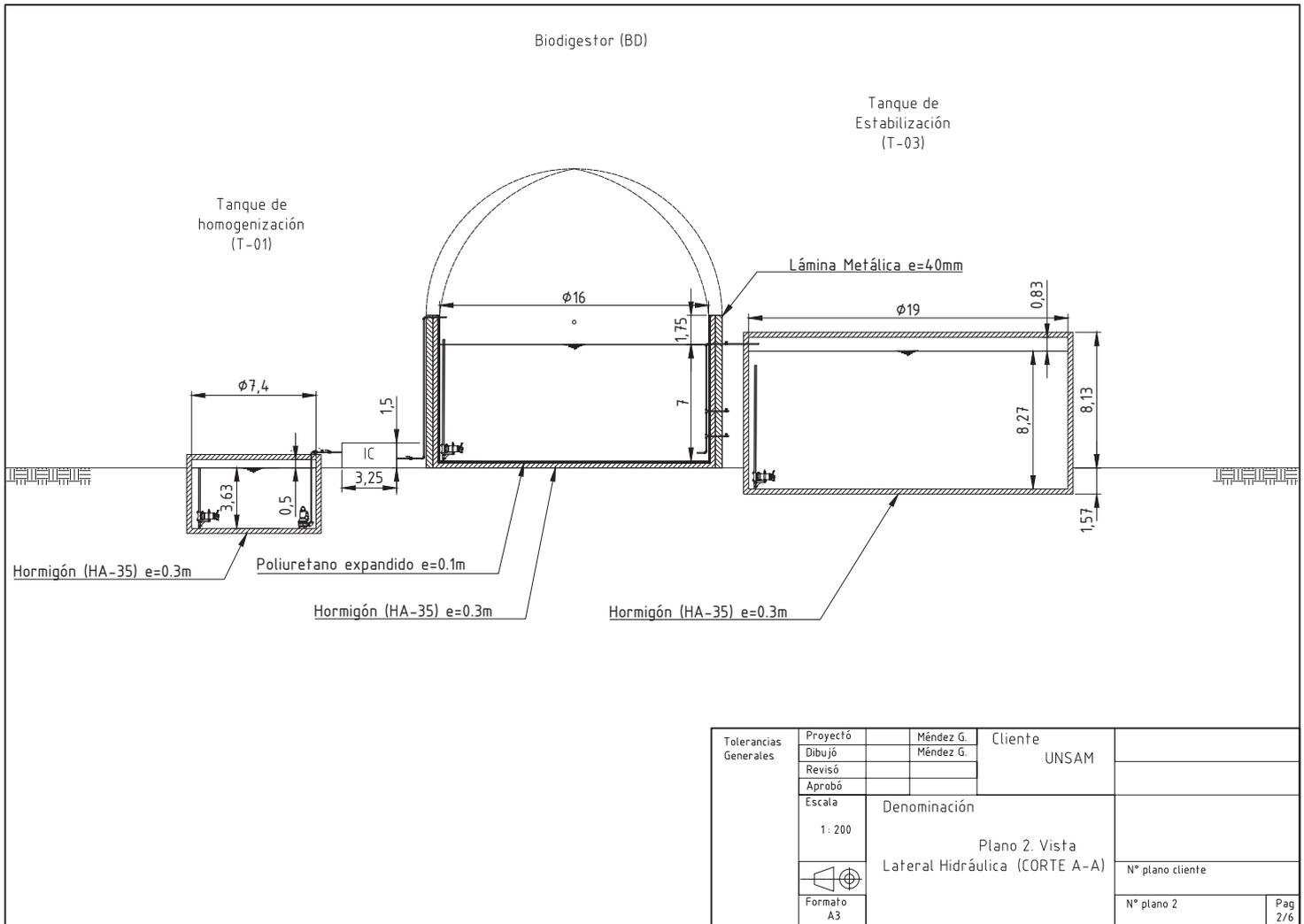
- Unidad de cogeneración (CHP)

5. Área de almacenamiento del digestato

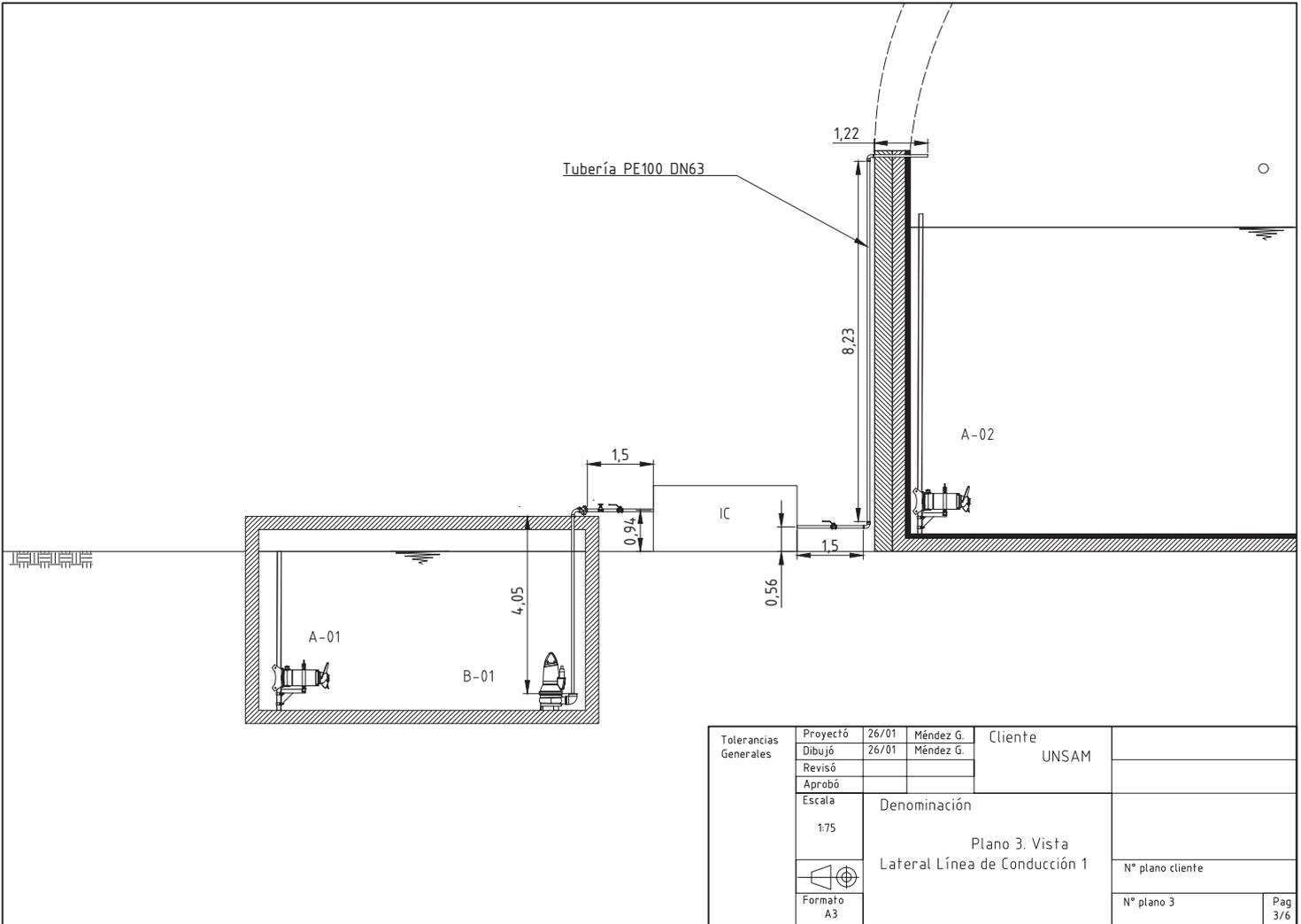
- Tanque de almacenamiento de digestato (T-03)
 - Agitador del tanque de almacenamiento (A-03)



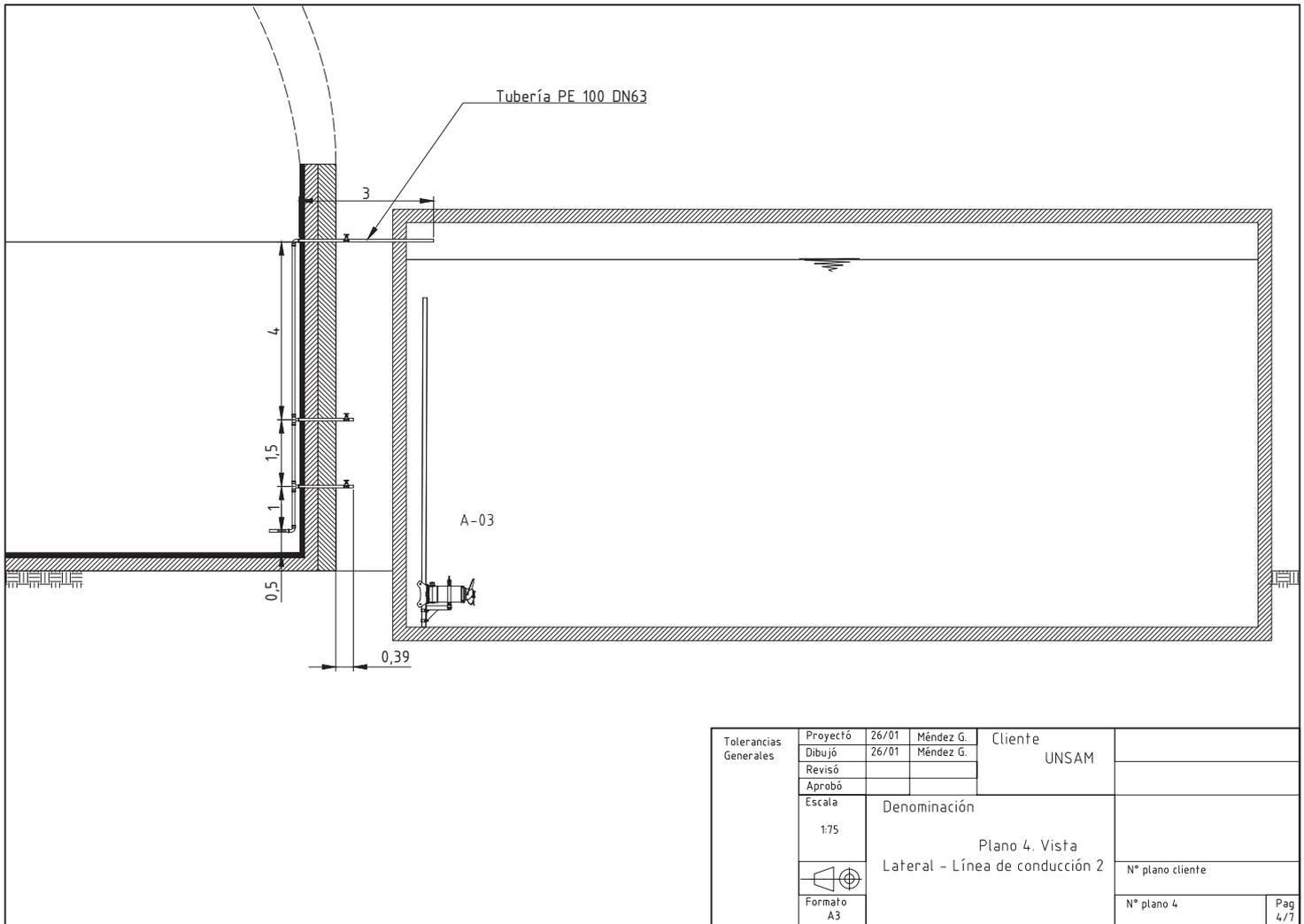
Tolerancias Generales	Proyectó	Méndez G.	Cliente	UNSAM
	Dibujó	Méndez G.		
	Revisó			
	Aprobó			
Escala	Denominación		N° plano cliente	
1: 200	Plano 1. Vista en Planta		N° plano 1	
Formato A3			Pag 1/6	



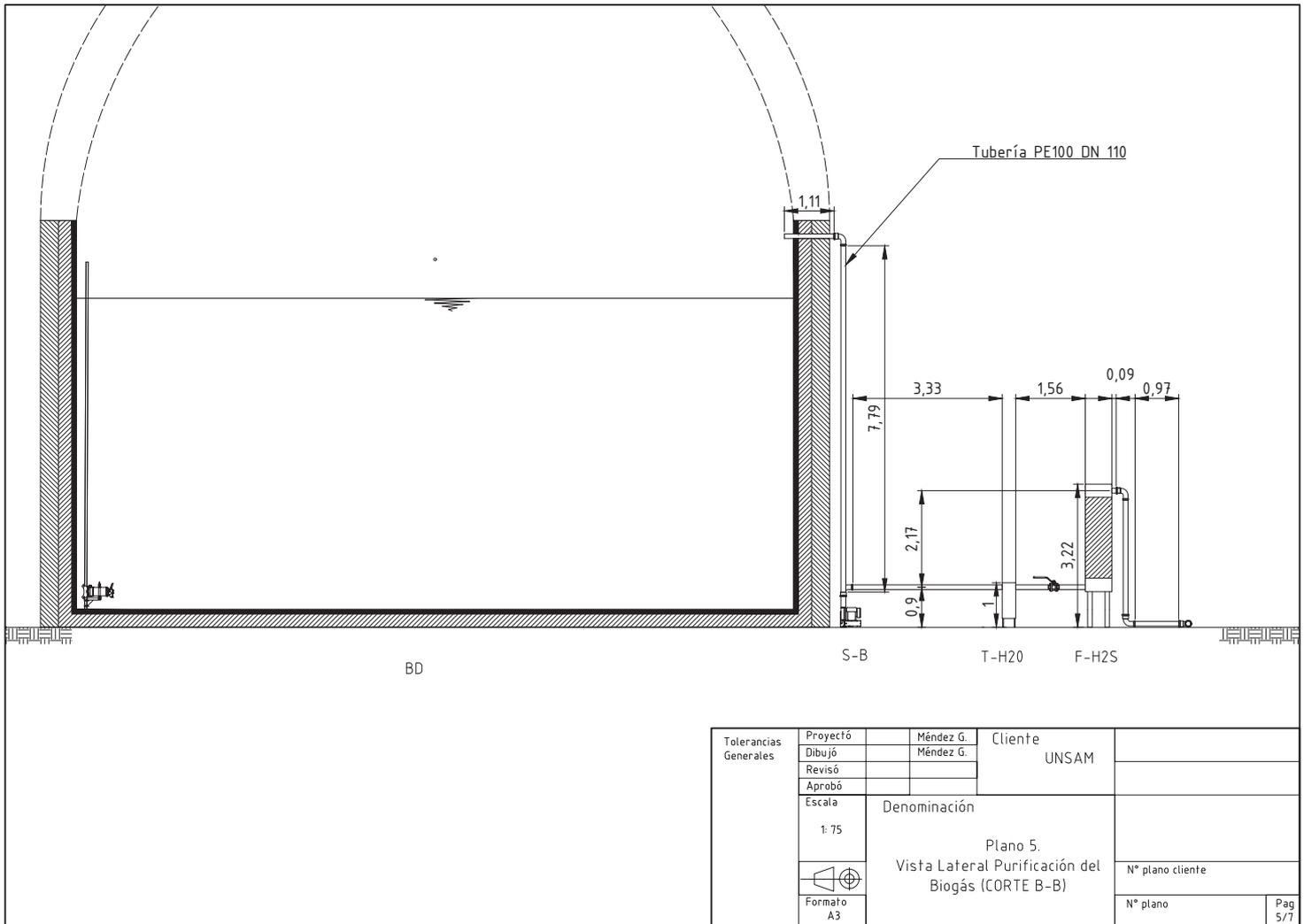
Tolerancias Generales	Proyectó	Méndez G.	Cliente	
	Dibujó	Méndez G.		
	Revisó			
	Aprobó			
	Escala	Denominación		
	1: 200	Plano 2. Vista Lateral Hidráulica (CORTE A-A)		N° plano cliente
	Formato A3			N° plano 2
				Pag 2/6

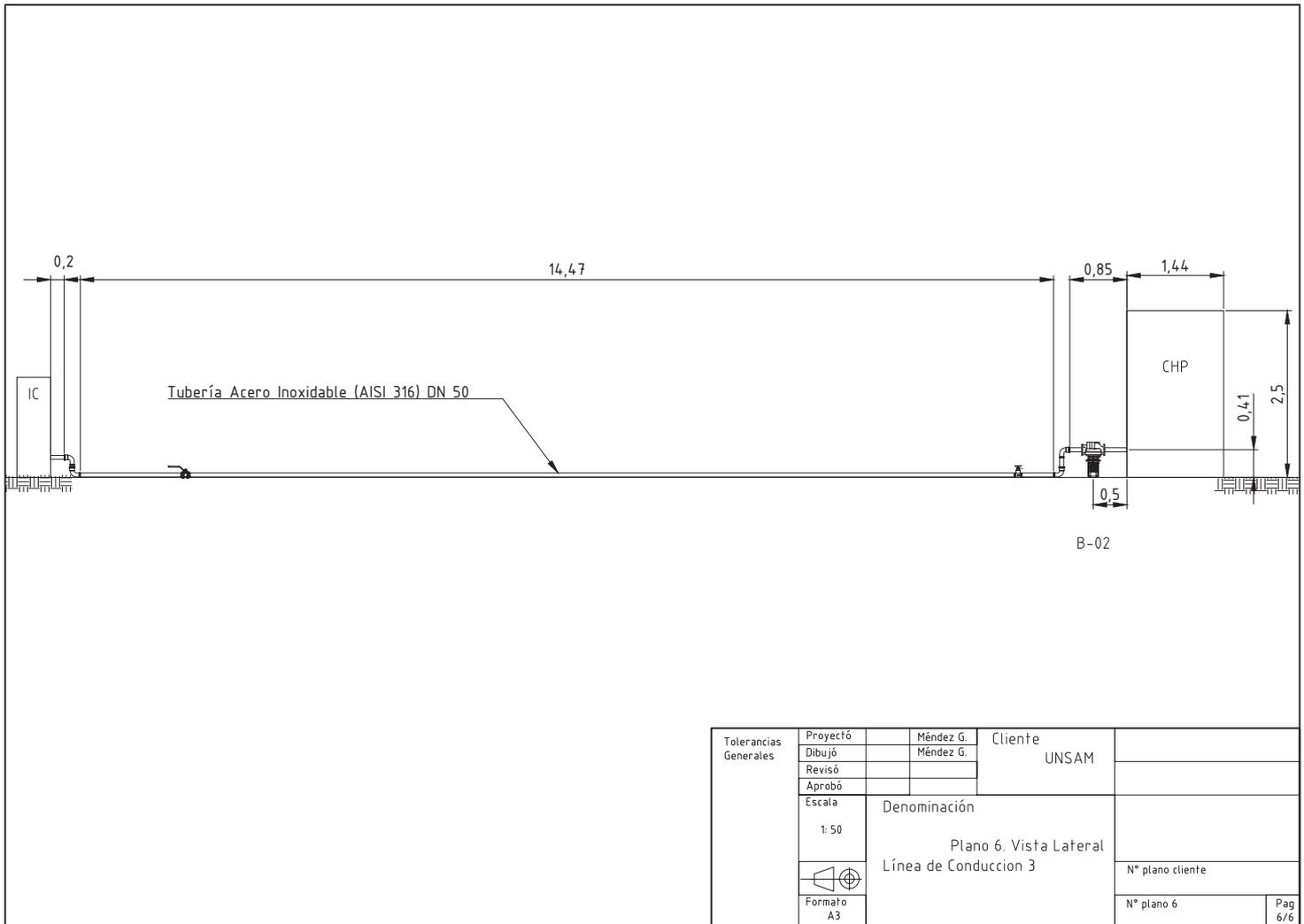


Tolerancias Generales	Proyectó	26/01	Méndez G.	Cliente UNSAM	
	Dibujó	26/01	Méndez G.		
	Revisó				
	Aprobó				
	Escala	Denominación			
	1:75	Plano 3. Vista Lateral Línea de Conducción 1			N° plano cliente
					N° plano 3
	Formato A3				Pag 3/6



Tolerancias Generales	Proyectó	26/01	Méndez G.	Cliente UNSAM	
	Dibujó	26/01	Méndez G.		
	Revisó				
	Aprobó				
	Escala	Denominación			
	1:75	Plano 4. Vista Lateral - Línea de conducción 2			N° plano cliente
					
	Formato A3				N° plano 4
					Pag 4/7





Tolerancias Generales	Proyectó	Méndez G.	Cliente UNSAM	
	Dibujó	Méndez G.		
	Revisó			
	Aprobó			
	Escala	Denominación		
	1:50	Plano 6. Vista Lateral Línea de Conduccion 3		N° plano cliente
				N° plano 6
	Formato A3			Pag 6/6

10. Bibliografía y Anexos

- Acosta L.; Abreu C. La Digestión Anaeróbica. Aspectos Teóricos. Parte I. Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar, N° 1, 2005.
- Berra, G., Finster, L. Emisión de gases de efecto invernadero; influencia de la ganadería argentina; Instituto de Patobiología, I.N.T.A. Castelar; 2002.
- Dueblein, D. y Steinhauser, A. 2008. Biogas from Waste and Renewable Resources - An Introduction, Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH and Co. KGaA.
- Chen, Y.R. y Hashimoto, A.G. 1978. Kinetics of methane fermentation. Biotechnology and Bioengineering Symp. Vol. 8
- Chen F. y Dixon R.A. 2007. Lignin modification improves fermentables sugar yields for biofuel production.
- Chen, Y., Cheng, J.J. y Creamer, K.S. 2008. Inhibition of anaerobic digestion process: a review. Bioresour.
- Flotats, X., Campos, E., Bonmatí, A. 1997. Aprovechamiento energético de residuos ganaderos.
- Gropelli, E; Giampaoli O. Biodigestores. Una propuesta sustentable. Primera Edición, Ediciones UNL, 2012, ISBN 9789876577946.
- Gunaseelan, V. N. 2004. Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks. Biomass and Bioenergy
- Guevara Vera, A. Fundamentos básicos para el diseño de biodigestores anaeróbicos rurales. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente, 1996.
- Hessami, M. A., Christensen, S., Gani, R. 1996. Anaerobic Digestion of Household Organic Waste to Produce Biogas
- Hilbert, J.A. Manual para la producción de biogás, Instituto de Ingeniería Rural I.N.T. A - Castelar, 2011.
- INTA; Buenas Prácticas Pecuarias (BPP) para la producción y comercialización porcina familiar, ISBN 978-92-5-306794-7, FAO 2012.
- McCabe, W.L., Smith, J.C. y Harriot, P. 2007. Operaciones Unitarias en Ingeniería Química, Séptima Edición.
- McCarty, P.L. Anaerobic waste treatment fundamentals. Public Works, 1964.

Metcalf, L., Eddy, H. Tratamiento y depuración de las aguas residuales. Primera Edición, McGraw-Hill, 1977, ISBN 8433564161.

Moncayo R.G. 2013. "Dimensionamiento, diseño y construcción de biodigestores y plantas de biogás". Aqualimpia Engineering e.K

Rosato, M.A. 2018. Managing Biogas Plants A Practical Guide.

Salas, H. 2009. Proyecto de producción de engorde a corral para ganado vacuno (Feedlot) y granja porcina. Estudio de impacto ambiental. Tucumán, Estudio Hugo Salas.

Varnero Moreno, M.T. 2011. Manual del biogás, Ministerio de Energía, Gobierno Chile, 2011.

Vertes, A., Qureshi, N., Yukawa, H., Blaschek, H. (Eds.) 2010. Biomass to Biofuels, Strategies for Global Industries.

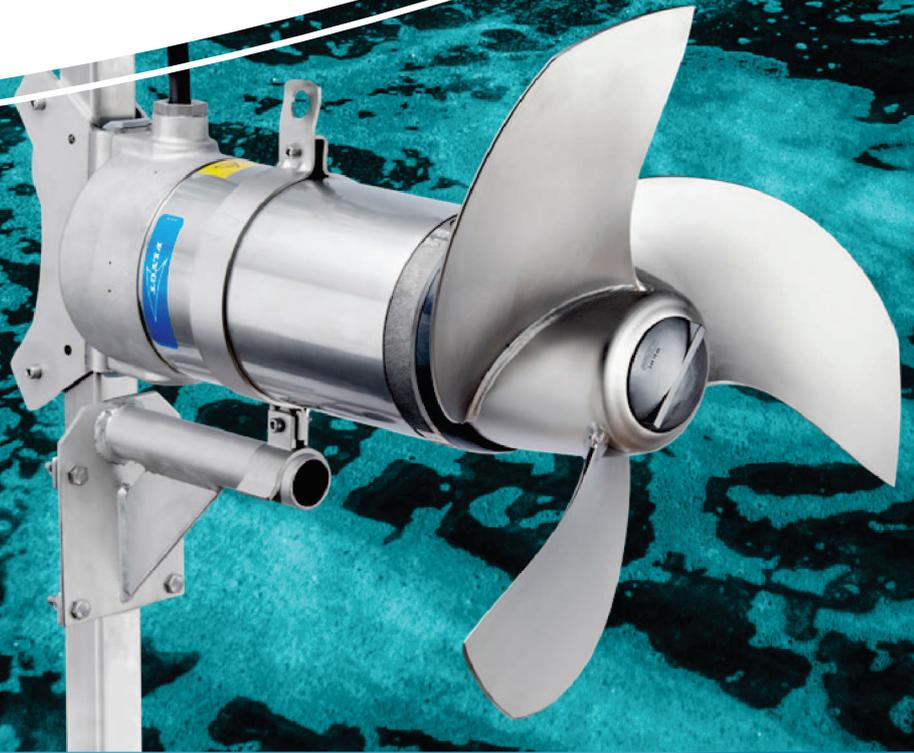
Ward, A. J., Hobbs, P. J., Holliman, P. J., Jones, D. L. 2008. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources.

Wellinger, A., Murphy J. y Baxter D. 2013. The biogas handbook.

Williams, R. B., Jenkins B. M., Nguyen D. 2003. Solid Waste Conversion: A review and database of current and emerging technologies.

ANEXOS

xylem
Let's Solve Water



Flygt 4200 Series Compact Adaptive Mixers

FLYGT
a xylem brand

With its ability to match and adjust output to the real demand, Xylem’s range of Flygt adaptive mixers represents a new level in mixing performance. The Flygt 4200 series of submersible compact adaptive mixers revolutionizes the wastewater treatment industry by bringing complete control and adaptability into the mixing process. Along with the integrated power electronics, high-efficiency IE4 equivalent motor and optimized hydraulics, these enhanced capabilities bring a number of unmatched customer values:



SPEND UP TO 50% LESS ON ENERGY

Whether you control the mixer from the tank side or manage it from the control room, the Flygt 4200 adaptive mixers provide significant energy savings. By matching output to real demand, they save operational costs and optimize process efficiency.



INCREASE MIXER UPTIME

Diminish wear and tear thanks to the mixer’s high performance even at low speeds. The automatic motor overload protection reduces the risks for process down time.



IMPROVE PROCESS RESILIENCY

Experience full and immediate flexibility with the Flygt 4200 series. With manual tank side control or SCADA-integrated management, you can be sure that the mixer will adapt to handle both unexpected and planned changes with maintained efficiency.



REDUCE MIXER INVENTORY

Mixers in the Flygt 4200 series have multiple duty points and can easily be deployed across different applications, reducing the need for inventory of back-up mixers and spares and lowering capital investment for rebuild or mixer replacements.

Scalable Mixer System

Whether you choose a standard or adjustable mixer of the Flygt 4200 series, you can be assured of its unparalleled performance to meet your shifting process demands of wastewater treatment.



	FLYGT 4220 AD FLYGT 4230 AD	FLYGT 4220 ADF FLYGT 4230 ADF
Gateway FPG 415		✓
IE4 motor efficiency	✓	✓
High efficiency propeller	✓	✓
Soft start	✓	✓
Power factor close to 1	✓	✓
Always correct propeller rotation	✓	✓
Automatic overload speed control	✓	✓
Easily adjustable speed		✓
Analog I/O and Modbus RTU/TCP		✓
Full status and alarms information		✓
Jog wheel operator panel FOP 31 (optional)		✓
Touch screen operator panel FOP 402 (optional)		✓

AD - STANDARD CONTROL

Standard system with pre-set control incorporates many built-in valuable features providing energy savings, key autonomous protection capabilities, and scalability for ADF functionality at a later stage. It can easily replace any conventional compact mixer without any infrastructure modifications.

ADF - FLEXIBLE CONTROL

Gear up your Flygt 4220 or Flygt 4230 for tank-side and remote operation by adding the FPG 415 gateway with analog I/O and fieldbuses. Ease of connectivity and connections to the operator panel allow fully integrated monitoring functions, so you can be assured of optimal mixer operation wherever you may be.

Gateway and Operator Panels

GATEWAY - FPG 415

The FPG 415 gateway enables monitoring and control of mixer performance and status, including speed, power, alarms, running time and energy consumption, via operator panel or remote communications.

Communication	Modbus RTU / TCP, 4-20 mA
Standard Input/Output	4×DO, 4×DI, 1×AO, 1×AI
Ports	USB, RS485, Ethernet, operator panel, mixer
Environment class	IP 20, operation temperature -20°C to +65°C (-4°F to 149°F)
Power supply	24 VDC
Size (W×L×H)	45×100×100 mm, (1.77 x 3.94 x 3.94 in.), DIN mount
Approvals	CE, UL, CSA, RCM



JOG WHEEL OPERATOR PANEL - FOP 315

The FOP 315 jog wheel operator panel is a traditional push-button interface for operator's inspection and mixer control.

Screen	3.5" monochrome LCD
Environment class	Handheld: IP20 Door mount. Front: IP 54; Back: IP21 Operation temp: -20°C to +70°C (-4°F to 158°F)
Power supply	24 VDC
Size (W×L×H)	205×33×110 mm, (8.07 x 1.3 x 4.33 in.), DIN or door mount
Approvals	CE, UL



TOUCH SCREEN OPERATOR PANEL - FOP 402

The FOP 402 touch screen operator panel is a full text and graphics interface for quick and easy operator's management.

Screen	7" color touch screen
Environment class	Front: IP65; Back: IP20 Operation temp: -20°C to +60°C (-4°F to 140°F)
Power supply	24 VDC
Size (W×L×H)	197×42×140 mm (7.76 x 1.65 x 5.51 in.), Door mount
Approvals	CE, UL



PERFORMANCE - FLYGT 4200 SERIES

Rated Power 50/60 Hz, kW (hp)	Flygt 4220				Flygt 4230				
	1.1 (1.5)	1.5 (2.0)	2.2 (3.0)	3.0 (4.0)	2.2 (3.0)	3.0 (4.0)	4.0 (5.5)	5.5 (7.5)	7.3 (10.0)
Propeller speed, rpm	variable, up to 800				variable, up to 290				
Maximum thrust, N*									
370 mm (14.5 in.) propeller	380	510	670	790	-	-	-	-	-
580 mm (22.8 in.) propeller	440	670	870	-	-	-	-	-	-
770 mm (30.3 in.) propeller	-	-	-	-	960	1,240	1,710	2,080	2,470
Maximum efficiency, N/kW*									
370 mm (14.5 in.) propeller	530	530	530	450	-	-	-	-	-
580 mm (22.8 in.) propeller	450	590	590	-	-	-	-	-	-
770mm (30.3 in) propeller	-	-	-	-	670	670	760	760	760

*According to ISO 21630:2007 and depending on product configuration

Flygt 4200 Series COMPACT ADAPTIVE MIXERS

		Flygt 4220	Flygt 4230
Motor data	Speed, max Type Efficiency Frequency Voltage Insulation class	800 rpm Synchronous permanent magnet motor IE4 level according to IEC/TS 60034-30-2 Ed. 1 50-60 Hz 380-480 V H (180°C, 356°F)	290 rpm Synchronous permanent magnet motor IE4 level according to IEC/TS 60034-30-2 Ed. 1 50-60 Hz 380-480 V H (180°C, 356°F)
Materials	Stator housing Wetted metal parts Connection housing Lifting handle and guide bar bracket Hub and propeller blades Propeller shaft O-rings Oil	Cast iron, ASTM 35B Stainless steel, ASTM 316L Stainless steel, ASTM/AISI 431 Flourinated rubber Paraffin oil ISO VG32	Cast iron, ASTM 35B Stainless steel, ASTM 316L Stainless steel, ASTM/AISI 431 Flourinated rubber Paraffin oil ISO VG32
Cable	Screened Flygt SUBCAB® with integrated control leads	10 or 20 m (30 or 65 ft)	10 or 20 m (30 or 65 ft)
Application data	Liquid temperature, max Liquid density, max pH range of mixed liquid Depth of immersion, max	40°C (104°F) 1,100 kg/m ³ (9.2 lb per US gal) 1-12 20 m (65 ft)	40°C (104°F) 1,100 kg/m ³ (9.2 lb per US gal) 1-12 20 m (65 ft)
Weight and dimensions	Weight, max Length, excl. bracket Propeller diameter Guide bar bracket	70 kg (154 lb) 660 mm (26.0 in.) 580 mm (22.8 in.), Option: 370 mm (14.5 in.) 50x50 mm (2x2 in.) 50x100 mm (2x4 in.) 60x60 mm (2.4x2.4 in.) 80x80 mm (3x3 in.) 100x100 mm (4x4 in.)	220 kg (485 lb) 920 mm (36.2 in.) 770 mm (30.3 in.) 100x100 mm (4x4 in.) 100x150 mm (4x6 in.)
Approvals	CE, CSA, UL	Yes	Yes



El intercambiador modelo DTI es un intercambiador de doble tubo (un tubo dentro de otro), similar a la serie DTA, pero con un diseño industrial. El tubo interior está corrugado para aumentar la transferencia de calor. El producto circula por el interior del tubo y el servicio por el canal resultante entre el tubo interior y la camisa en flujo contracorriente. En la camisa del intercambiador se coloca una junta de expansión (fuelle) que absorbe la dilatación diferencial entre el tubo interior y el exterior.

APLICACIONES

Fluidos con fibras u otros solidos.
Fluidos de viscosidad media-alta.

MATERIALES

Lado camisa: acero inoxidable AISI 304.
Lado tubo: acero inoxidable AISI 316L.

CONEXIONES

Lado camisa: Brida
Lado tubo: Clamp

ACABADO

Lado camisa: pulido exterior
Lado tubos: Sin pulir

CONDICIONES DE DISEÑO

Lado camisa: 10 barg / 185 °C
Lado tubo: 10 barg / 185 °C

RANGO MODELOS

CARACTERÍSTICAS

Tubos corrugados para aumento en transferencia de calor

Junta de expansión que absorbe la dilatación diferencial entre la camisa y el segundo tubo interior

Múltiples unidades pueden ir montadas e interconectadas en bastidor con opción de chapa protectora y aislamiento térmico



Modelos:	Longitud (m)	Area (m ²)	Conexión Servicio	Conexión producto	Caudal máx servicio (m ³ /hr)	Caudal máx producto (m ³ /hr)	Volumen servicio (L)	Volumen producto (L)
DTI 51/25	3.0 – 6.0	0.4	DN40	DN15	13	4	8.2	2.5
DTI 64/38	3.0 – 6.0	0.6	DN40	DN25	17	10	10.3	5.7
DTI 76/51	3.0 – 6.0	0.9	DN40	DN40	18	18	14.1	11.0
DTI 104/64	3.0 – 6.0	1.1	DN65	DN50	43	29	29.7	16.9
DTI 104/76	3.0 – 6.0	1.3	DN65	DN65	33	41	21.5	24.8
DTI 129/104	3.0 – 6.0	1.8	DN80	DN80	37	77	26.0	46.4
DTI 168/129	3.0 – 6.0	2.4	DN100	DN100	55	120	45.4	73.6

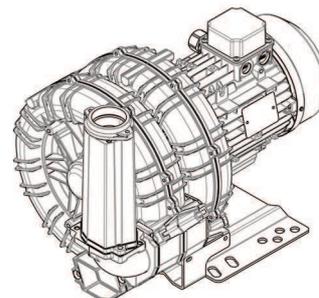
Área y volúmenes para modelos de 6,0 metros



Technical Characteristics	
<ul style="list-style-type: none"> Aluminum alloy construction Smooth operation Maintenance free 	
Electric Motor	
<ul style="list-style-type: none"> Motors with IP 55 protection rating. class F insulation, suitable for operating with inverter (refer to FPZ) Thermal Protector (PTO) as standard 	
Options	
<ul style="list-style-type: none"> Special voltages (IEC 60038) Surface treatments Increased seal version 	

~3	[V] (Y / Δ)	[Hz]
IE2	400 / 230	50
	460 / 265	60
Wide Range	345 – 415 / 200 – 240	50
	380 – 480 / 220 – 280	60

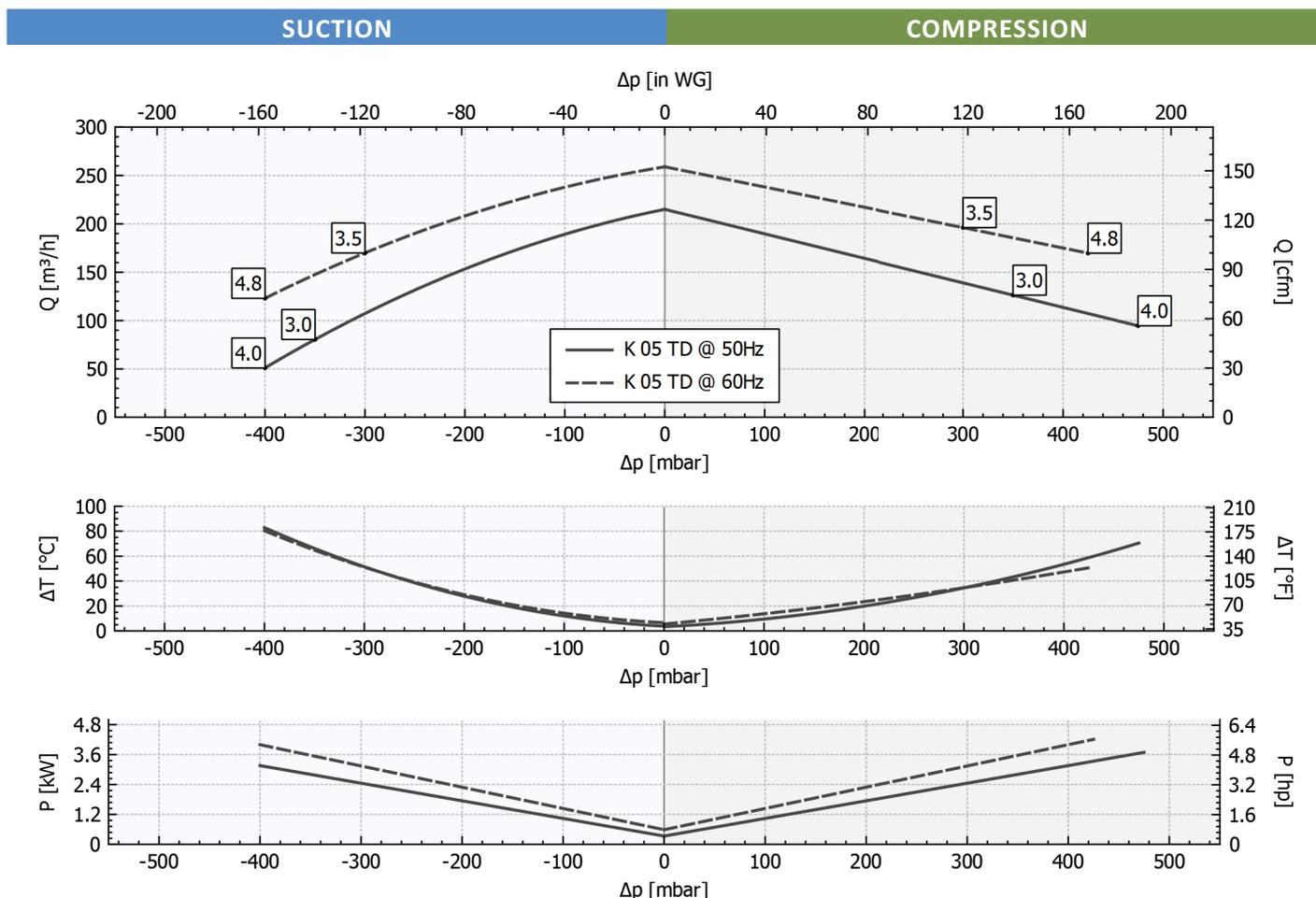
Supply voltage - IE2 only at 50 Hz - Tolerance on the fixed voltage value ± 10%, in range ± 5%.



Performance Table

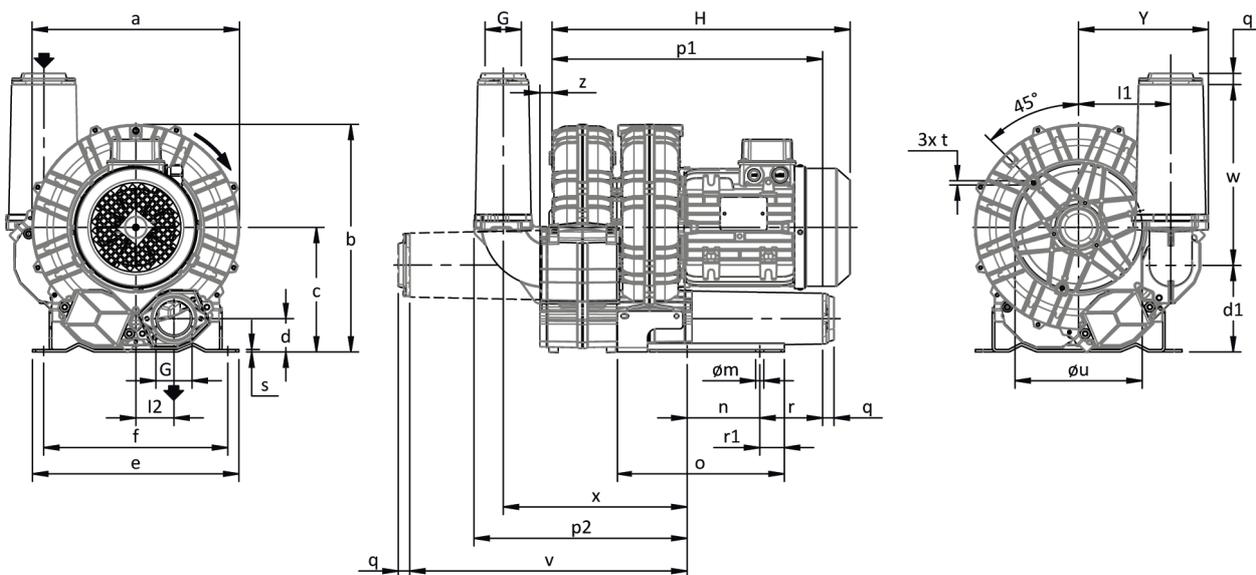
P _n [kW]	Frequency [Hz]	Δp _{max} [mbar]		Q _{max} [m³/h]	Leq ¹ [dB(A)]	Weight [kg]	H ³ [mm]	Current Consumption (Y/Δ) [A]		Cosφ [-]	Speed [rpm]
		Suction	Compression					IE2 ²	Range		
3	50	350	350	215	70.6	44.5	475	6.27 / 10.8	6.88-6.36 / 11.9-11.0	0.82	2920
3.5	60	300	300	259	72.6	44.5	475	6.23 / 10.8	7.29-6.23 / 12.6-10.8	0.84	3515
4	50	400	475	215	70.6	45.5	495	8.12 / 14.05	8.80-8.26 / 15.2-14.3	0.82	2910
4.8	60	400	425	259	72.6	45.5	495	8.10 / 14.03	9.37-8.10 / 16.2-14.0	0.84	3480

- Noise level measured at a distance of 1 m with ducted intake and delivery, in accordance with Standard ISO 3744.
- IE2 only at 50 Hz.
- See figure "dimensions" at following page.



Tolerance on indicated values ± 10%.
 Data subject to change without notice.
 Curves referring to air at a temperature of 20 °C and atmospheric pressure of 1013 mbar (abs).

Dimensions



For all assembly options refer to FPZ.
 NOT Binding
 Dimensions in mm

a	b	c	d	d1	e	f	G	l	l1	l2	m	n	o	p1	p2	q	r	r1	s	t	u	v	w	x	y	z
327	365	200	54	140	325	260	G 2"	-	145	60	15	115	265	428	340	18	98	38.5	4	M8	200	440	285	293	206	19

INSTALLATION

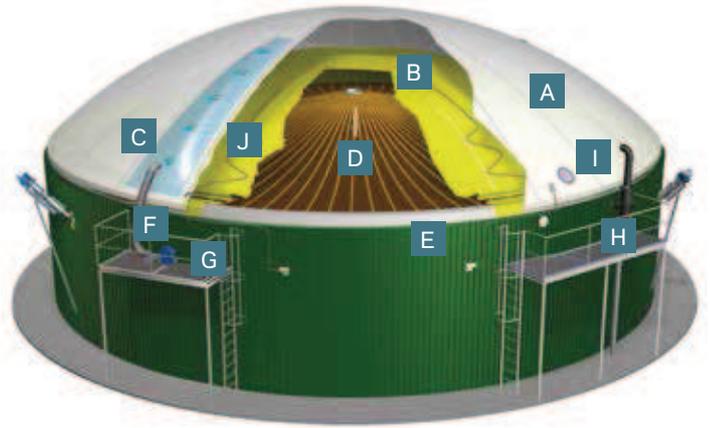
- For proper operation of the machine, it must be provided with a suction FILTER and a vacuum/pressure limiting VALVE.
- Other accessories are available on request.
- Permissible ambient and fluid temperature in suction from -15 °C to +40 °C.
- Read the instruction manual carefully before installing the machine.

GASÓMETRO MONTADO

El gasómetro montado sobre un depósito está constituido por una membrana exterior y una interior que cierran el fermentador herméticamente. Los soplantes de aire de apoyo dan la forma a la membrana exterior garantizando tanto la resistencia a cargas de viento y nieve como también una presión constante en el gasómetro.

Al igual que con el gasómetro de doble membrana autónomo, también se utiliza el sistema patentado AIRFLOW-SYSTEM™ para este diseño. Ambas membranas se sujetan con rieles de anclaje a la corona del depósito o a las paredes externas del depósito de acero u hormigón. La unión se lleva a cabo mediante una junta en el borde compuesta por una cuerda soldada a la membrana.

La construcción en la estructura, evita que la membrana interior tenga contacto con el sustrato y la protege al mismo tiempo, de daños causados por el sistema de agitadores. Las cintas utilizadas y el apoyo central están diseñados para resistir cargas. Para medir el nivel de llenado se utilizan sistemas de medición hidráulicos. El manejo eficiente de los componentes y el mantenimiento de los mismos quedan garantizados mediante la construcción de componentes adicionales.



A membrana exterior B membrana interior C AIRFLOW-SYSTEM™
D sistema de cintas E anillo de anclaje F válvula de conservación de aire
G soplantes H válvula de seguridad I mirilla J medición del nivel del depósito

CARACTERÍSTICAS:

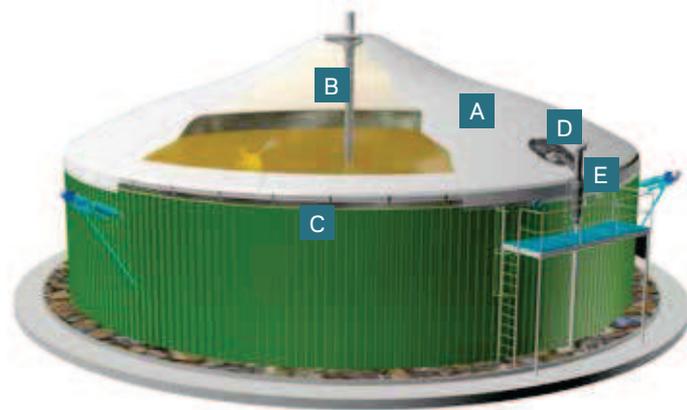
- altas presiones operativas
- grandes volúmenes hasta la mitad de la esfera
- apto para altas cargas de nieve y viento
- resistencia duradera al gas
- inversión y gastos de operación reducidos
- tiempo de construcción reducido
- alta seguridad operativa
- fijación estable y adaptada a la forma
- suministro de aire de forma homogénea gracias al sistema AIRFLOW-SYSTEM™
- posible construcción para el acceso y mantenimiento a las instalaciones



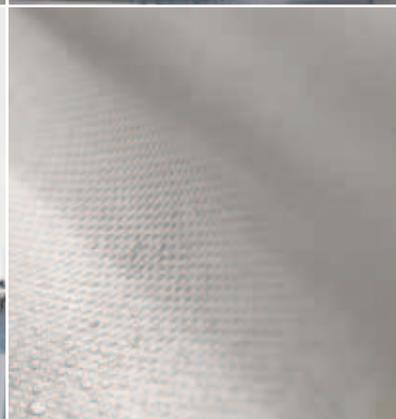
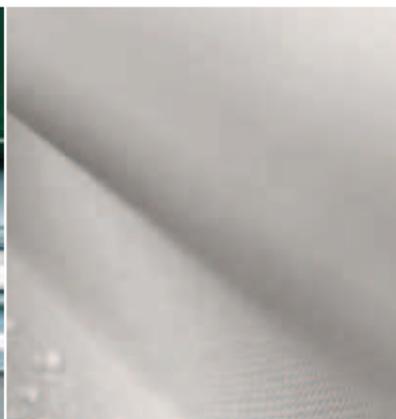
CUBIERTA PARA BIOGÁS

La cubierta para biogás de Sattler CENO montada sobre un depósito está compuesta por una membrana exterior y por un apoyo central que le da forma. De esta manera la cubierta de biogás es capaz de resistir cualquier carga externa como la nieve, la lluvia, el aire, etc. Mediante la encorvadura biaxial de la cubierta se evita la vibración y bamboleo causados por el viento. La membrana se fija herméticamente a la pared exterior del depósito de acero u hormigón en su circunferencia. Las válvulas de seguridad protegen la cubierta de la sobrepresión y depresión del gas.

La cubierta para biogás de doble hoja es una cubierta con apoyo central y dispone de una membrana interior con función integral de almacenamiento. También en este caso se tensa la membrana exterior desde el mástil central hacia el borde del depósito, de forma similar a cuando se tensa una tienda. De esta manera, la membrana queda tensada de forma homogénea y queda protegida en el área de los bordes del depósito.



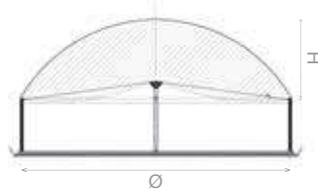
A membrana exterior B apoyo central (mástil)
C anillo de anclaje D apertura de servicio E válvula de seguridad



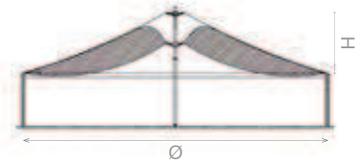
CARACTERÍSTICAS:

- sistema de apoyo mediante un mástil
- sin presión sobre la cubierta
- presión de descarga de hasta 2 mbar
- función combinada de almacenamiento y de cubierta
- estabilidad mediante la encorvadura biaxial
- alta seguridad operativa
- apta para elevadas cargas de nieve y de viento
- resistencia duradera al gas

GASÓMETRO MONTADO



CUBIERTA PARA BIOGÁS



cuarto de esfera		
diámetro/ altura de los depósitos		capacidad efectiva
Ø	H	
10 m	2,5 m	129 m³
11 m	2,8 m	172 m³
12 m	3,0 m	216 m³
13 m	3,3 m	276 m³
14 m	3,5 m	336 m³
15 m	3,8 m	415 m³
16 m	4,0 m	493 m³
17 m	4,3 m	594 m³
18 m	4,5 m	693 m³
19 m	4,8 m	819 m³
20 m	5,0 m	940 m³
21 m	5,3 m	1.094 m³
22 m	5,5 m	1.237 m³
23 m	5,8 m	1.417 m³
24 m	6,0 m	1.589 m³
25 m	6,3 m	1.793 m³
26 m	6,5 m	1.985 m³
27 m	6,8 m	2.230 m³
28 m	7,0 m	2.450 m³
29 m	7,3 m	2.724 m³
30 m	7,5 m	2.981 m³
31 m	7,8 m	3.285 m³
32 m	8,0 m	3.567 m³
33 m	8,3 m	3.908 m³
34 m	8,5 m	4.233 m³
35 m	8,8 m	4.645 m³
36 m	9,0 m	4.976 m³
37 m	9,3 m	5.423 m³
38 m	9,5 m	5.800 m³
39 m	9,8 m	6.269 m³
40 m	10,0 m	6.710 m³

semiesfera		
diámetro/ altura de los depósitos		capacidad efectiva
Ø	H	
10 m	5,0 m	285 m³
11 m	5,5 m	376 m³
12 m	6,0 m	485 m³
13 m	6,5 m	613 m³
14 m	7,0 m	762 m³
15 m	7,5 m	934 m³
16 m	8,0 m	1.130 m³
17 m	8,5 m	1.351 m³
18 m	9,0 m	1.599 m³
19 m	9,5 m	1.876 m³
20 m	10,0 m	2.184 m³
21 m	10,5 m	2.523 m³
22 m	11,0 m	2.892 m³
23 m	11,5 m	3.296 m³
24 m	12,0 m	3.735 m³
25 m	12,5 m	4.207 m³
26 m	13,0 m	4.717 m³
27 m	13,5 m	5.271 m³
28 m	14,0 m	5.862 m³
29 m	14,5 m	6.494 m³
30 m	15,0 m	7.178 m³

23°		
diámetro/ altura de los depósitos		capacidad efectiva
Ø	H	
10 m	2,1 m	59 m³
11 m	2,3 m	79 m³
12 m	2,5 m	104 m³
13 m	2,8 m	118 m³
14 m	3,0 m	145 m³
15 m	3,2 m	171 m³
16 m	3,4 m	198 m³
17 m	3,6 m	236 m³
18 m	3,8 m	281 m³
19 m	4,0 m	326 m³
20 m	4,2 m	373 m³
21 m	4,5 m	426 m³
22 m	4,7 m	487 m³
23 m	4,9 m	555 m³
24 m	5,1 m	630 m³
25 m	5,3 m	686 m³
26 m	5,5 m	772 m³
27 m	5,7 m	889 m³
28 m	5,9 m	990 m³
29 m	6,2 m	1.077 m³
30 m	6,4 m	1.151 m³
31 m	6,6 m	1.260 m³
32 m	6,8 m	1.403 m³
33 m	7,0 m	1.551 m³
34 m	7,2 m	1.706 m³
35 m	7,4 m	1.929 m³
36 m	7,6 m	2.098 m³
37 m	7,9 m	2.278 m³
38 m	8,1 m	2.468 m³
39 m	8,3 m	2.668 m³
40 m	8,5 m	2.877 m³



Equipo de Cogeneración a Biogás

ENERGIN® M08 CHP B333

Hoja de Datos, 250 mg NO_x

El equipo de cogeneración ENERGIN® CHP simultáneamente genera electricidad y utiliza el calor del agua de refrigeración y de los gases de escape del motor para calentar el circuito de agua de calefacción. La potencia eléctrica del equipo se deja regular de forma continua entre 50% y 100% de la potencia nominal. Se puede operar en paralelo con la red eléctrica o en modo isla. Opcionalmente, es posible la configuración como respaldo de la red y/o el funcionamiento en isla en paralelo con otros generadores.

El equipo se entrega de fábrica como una unidad compacta y completamente funcional, con o sin insonorización. El motor de gas, generador, intercambiadores de calor para aceite lubricante, gases de escape y agua de refrigeración, un silenciador primario de escape y el gabinete de control con unidad de potencia están montados en tacos anti vibración sobre el bastidor común. También está integrado en el equipo el suministro continuo de aceite lubricante, que permite un funcionamiento continuo de hasta 2000 horas sin recarga manual.

El sistema de control eléctrico incluye funciones de protección y control para el funcionamiento automático o manual. Un panel táctil de 12" informa sobre los estados operativos y permite el funcionamiento y la parametrización del sistema. Varias interfaces están disponibles para la comunicación con otros generadores y un sistema de control de nivel global. Una interfaz Ethernet permite la conexión a Internet para la supervisión remota y el control remoto de la ejecución del mantenimiento.

Todo el sistema está certificado según la Directiva de Media Tensión BDEW.

DATOS TÉCNICOS

Fabricante	R Schmitt Enertec	
Modelo ENERGIN®	M08 CHP B333	
Potencia eléctrica ¹	kW	333
Potencia térmica ²	kW	367
Consumo de combustible ³	kW	802
Consumo propio ⁴	kW	5,6

DISEÑO

Tipo de combustible	Biogás	
Poder calorífico inferior (PCI)	kWh/Nm ³	5,0
Presión flujo de gas ⁵	kPa	2,2 - 5,0
Temperatura ventilación	°C	20
Temperatura gas de escape	°C	120
Temperaturas calefacción ⁶	°C	70 / 90
Caudal agua de calefacción	m ³ /h	16,3

EMISIONES DE ESCAPE⁷ SIN CATALIZADOR

NO _x	mg/Nm ³	250
CO	mg/Nm ³	1500
Formaldehído	mg/Nm ³	100

MOTOR

Fabricante	R Schmitt Enertec	
Modelo ENERGIN®	M08-BT2D41	
Principio de funcionamiento	4 tiempos	
Cilindros	8 V / 90°	
Válvulas por cilindro	4	
Aspiración	turbocompresión	
Enfriamiento mezcla	2 etapas	
Cilindrada	ltr	15,1

ACEITE LUBRICANTE

Volumen aceite	ltr	162
Volumen aceite de respaldo	ltr	157
Consumo	ltr/OH	0,10

GENERADOR

Fabricante	Leroy Somer	
Modelo	LSA 47.2 M8	
Tensión	V / Hz	400 / 50
Velocidad	1/min	1.500
Eficiencia	%	96,3



RENDIMIENTO⁸

Carga		100 %	75 %	50 %
Potencia eléctrica	kW	333	250	167
Calor utilizable AT	kW	367	288	218
Consumo de gas (PCI)	kW	802	615	440
Consumo de gas	Nm ³ /h	161	123	88
Eficiencia eléctrica	%	41,5	40,7	38,0
Eficiencia térmica	%	45,8	46,8	49,5
Eficiencia global	%	87,3	87,5	87,5
Flujo gas de escape ⁹	m ³ /h	1.815	1.321	897
Demanda de Aire	m ³ /h	7.340	5.891	4.735
Aire de salida ¹⁰	m ³ /h	5.987	4.903	4.062

DIMENSIONES Y PESOS CON CUBIERTA DE INSONORIZACIÓN

Largo	mm	4.180
Altura	mm	2.400
Altura con conexión escape	mm	3.350
Ancho	mm	1.440
Peso seco	kg	4.960
Peso operativo	kg	5.480

CONEXIONES

Escape	DN / PN	200 / 10
Combustible	DN / PN	65 / 16
Salida aire	mm	850 x 850
Enfriador de emergencia	DN / PN	65 / 16
Enfriador de mezcla	DN / PN	40 / 16
Agua de calefacción	DN / PN	65 / 16
Condensado de escape	DN / PN	Rp 1/2"

¹ +0% tolerancia en potencia eléctrica

² -3/+ 8% tolerancia al rendimiento térmico a 120 °C

³ +5% tolerancia en consumo de combustible, relativo al poder calorífico inferior

⁴ Consumo propio promedio sin refrigeración de emergencia

⁵ Con max. 10% fluctuación alrededor del valor setado

⁶ Temperatura retorno / surtidor de calefacción

⁷ Emisiones de escape basadas en 5% de oxígeno en el gas de escape seco

⁸ En condiciones estándar de acuerdo a ISO 3046-1; cos φ = 1

⁹ Gas de escape húmedo a 120 °C

¹⁰ ΔT = 15 K

Contar	Descripción
--------	-------------

1	SEG.40.09.2.1.502
---	-------------------



Advertir! la foto puede diferir del actual producto

Código: [96076212](#)

Bomba centrífuga de una etapa, no autocebante, con puerto de descarga horizontal, diseñada específicamente para la elevación y el bombeo de aguas residuales de descarga de inodoros.

La bomba incorpora un sistema triturador que tritura los sólidos destruibles, convirtiéndolos en fragmentos de menor tamaño y permitiendo su impulsión a través de tuberías de diámetros relativamente pequeños.

La bomba posee superficies lisas que impiden la acumulación de suciedad e impurezas. Un acoplamiento de acero inoxidable resistente a la corrosión mantiene el motor sujeto a la carcasa de la bomba y facilita el mantenimiento de la misma.

El sistema SmartTrim facilita el ajuste de la holgura del impulsor para maximizar la eficiencia de la bomba a lo largo de toda su vida útil.

Paneles control:

Sensor de humedad: sin sensores de humedad
AUTOADAPT: NO

Líquido:

Líquido bombeado: Cualquier líquido viscoso
Rango de temperatura del líquido: 0 .. 40 °C
Densidad: 994.3 kg/m³

Técnico:

Caudal real calculado:
Altura resultante de la bomba: m
Tipo de impulsor: SIST TRITURADOR
Cierre primario: SIC/SIC
Cierre secundario: LIPSEAL
Homologaciones en la placa de características: PA-I
Tolerancia de curva: ISO9906:2012 3B2

Materiales:

Carcasa de la bomba: Hierro fundido
EN1561 EN-GJL-200
Impulsor: Fundición
EN1561 EN-GJL-200

Instalación:

Contar	Descripción
	Maximum ambient temperature: 40 °C Presión de trabajo máxima: 6 bar Normativa de brida: DIN Conexión de la red de tuberías: DN 40/50 Salida de bomba: DN 40 Presión nominal: PN 10 Profundidad máxima de instalación: 10 m Autoacoplamiento: 96076063 Datos eléctricos: Potencia de entrada - P1: 1.3 kW Potencia nominal - P2: 0.9 kW Frecuencia de red: 50 Hz Tensión nominal: 1 x 230 V Toler. tensión: +6/-10 % Arranques máx. por hora: 30 Intensidad nominal: 6 A Intensidad de arranque: 38 A Intensidad nominal sin carga: 2.9 A Cos phi - Factor de potencia: 0.99 Cos phi - Factor de potencia a 3/4 de carga: 0.98 Cos phi - Factor de potencia a 1/2 de carga: 0.94 Velocidad nominal: 2890 rpm Momento de inercia: 0.0036 kg m ² Eficiencia del motor a carga total: 71 % Eficiencia del motor a una carga de 3/4: 67 % Eficiencia del motor a una carga de 1/2: 58 % Tamaño condensador - Funcionamiento: 30 µF Tamaño condensador - Arranque: 150 µF Número de polos: 2 Tipo de arranque: directo Grado de protección (IEC 34-5): IP68 Clase de aislamiento (IEC 85): F Resistente a explosiones: no Longitud de cable: 15 m Tipo de cable: LYNIFLEX Tipo de clavija de cable: NO PLUG Otros: Peso neto: 43.6 kg

Contar	Descripción
--------	-------------

1	TP 50-90/4 A-F-A-BAQE-EX3
---	---------------------------



Advierta! la foto puede diferir del actual producto

Código: [96087105](#)

Bomba de una etapa, acoplamiento cerrado y voluta con puertos de aspiración y descarga en línea de idéntico diámetro. El diseño de la bomba incluye un sistema de extracción superior que facilita el desmontaje del cabezal motor (el motor, el cabezal de la bomba y el impulsor) con fines de mantenimiento o reparación sin necesidad de desconectar las tuberías de la carcasa de la bomba.

La bomba está equipada con un cierre de fuelle de caucho no equilibrado. El cierre mecánico satisface los requisitos establecidos por la norma EN 12756. Pipework connection is via PN 16 DIN flanges (EN 1092-2 and ISO 7005-2).

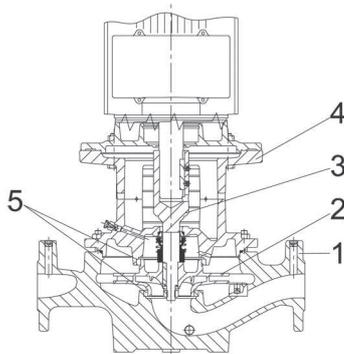
La bomba está equipada con un motor asíncrono refrigerado por ventilador.

Bomba

La carcasa y el cabezal de la bomba están tratados por cataforesis para mejorar su resistencia a la corrosión.

El tratamiento por cataforesis incluye:

- 1) Limpieza basada en agentes alcalinos.
- 2) Pretratamiento con revestimiento de fosfato de zinc.
- 3) Tratamiento por cataforesis catódica (epoxi).
- 4) Secado de la capa de pintura a 200-250 °C.



- 1: Carcasa de la bomba
2: Impulsor
3: Eje con mangueta

Contar	Descripción
	<p>4: Cabezal de la bomba/soporte del motor 5: Anillos de desgaste</p> <p>La carcasa de la bomba está dotada de un collarín de latón sustituible que minimiza la cantidad de líquido que se transfiere desde el lado de descarga del impulsor hasta el lado de aspiración. El impulsor se encuentra fijado al eje con una tuerca.</p> <p>La bomba está equipada con un cierre de fuelle de caucho no equilibrado con transmisión de par a través del muelle y alrededor del fuelle.</p> <p>El fuelle evita que el cierre desgaste el eje e impide que el movimiento axial se vea obstaculizado por la presencia de depósitos en el eje.</p> <p>Cierre primario:</p> <ul style="list-style-type: none">• Material del anillo del cierre giratorio: grafito de carbono impregnado con metal• Material del asiento estacionario: carburo de silicio (SiC) <p>Esta combinación de materiales proporciona una magnífica resistencia a la corrosión y resulta especialmente apta para agua a una temperatura máxima de 120 °C.</p> <p>La vida útil del cierre, no obstante, se ve perjudicada a temperaturas superiores a 90 °C.</p> <p>Esta combinación de materiales no se recomienda para líquidos que contengan partículas, ya que podrían causar un desgaste severo de la superficie de SiC.</p> <p>Material del cierre secundario: EPDM (caucho de etileno-propileno)</p> <p>El EPDM posee una excelente resistencia al agua caliente. El EPDM no es apto para el uso con aceites minerales.</p> <p>La circulación de líquido a través del conducto del tornillo de purga de aire garantiza la lubricación y la refrigeración del cierre mecánico.</p> <p>Las bridas poseen orificios roscados para la instalación de manómetros.</p> <p>El soporte del motor forma la conexión entre la carcasa de la bomba y el motor, y está equipado con un tornillo de purga de aire manual que permite purgar la carcasa de la bomba y la cámara del cierre mecánico.</p> <p>El cierre entre el soporte del motor y la carcasa de la bomba es una junta tórica.</p> <p>La parte central del soporte del motor está provista de cubiertas que protegen el eje y el acoplamiento. El eje de la bomba se sujeta directamente al eje del motor empleando una chaveta y tornillos de ajuste.</p> <p>Motor</p> <p>El motor es de tipo totalmente cerrado, cuenta con refrigeración por ventilador y sus principales dimensiones se ajustan a las normas IEC y DIN. Las tolerancias eléctricas satisfacen los requisitos establecidos por la norma IEC 60034.</p> <p>El motor está montado con una brida dotada de orificios libres (FF).</p> <p>Designación de montaje del motor según la norma IEC 60034-7: IM B 5, IM V 1 (Código I)/IM 3001, IM 3011 (Código II).</p> <p>El nivel de eficiencia del motor de acuerdo con la norma IEC 60034-30-1 es IE3.</p> <p>El motor no incorpora funciones de protección y debe conectarse a un disyuntor protector para motor que sea posible restablecer manualmente. El disyuntor protector para motor debe configurarse en función de la corriente nominal del motor (I1/1).</p> <p>Más información acerca del producto</p> <p>Datos técnicos</p> <p>Paneles control: Frequency converter: NONE</p> <p>Líquido: Líquido bombeado: Agua Rango de temperatura del líquido: 0 .. 120 °C Temperatura del líquido durante el funcionamiento: 80 °C Densidad: 971.8 kg/m³ Viscosidad cinemática: 0.41 mm²/s</p> <p>Técnico: Velocidad predeterminada: 1400 rpm Caudal real calculado: 17.83 m³/h Altura resultante de la bomba: 6.942 m</p>

Contar	Descripción
	<p> Diámetro real del impulsor: 169 mm Código del cierre: BAQE Tolerancia de curva: ISO9906:2012 3B2 </p> <p> Materiales: Cuerpo hidráulico: Fundición Carcasa de la bomba: EN-GJL-250 ASTM class 35 Impulsor: Fundición EN-GJL-200 ASTM class 30 </p> <p> Instalación: Rango de temperaturas ambientes: -20 .. 55 °C Presión de trabajo máxima: 16 bar Presión máxima a la temp. declarada: 16 bar / 120 °C Tipo de conexión: DIN Tamaño de la conexión: DN 50 Presión nominal para la conexión: PN 16 Longitud puerto a puerto: 340 mm Tamaño de la brida del motor: FF165 </p> <p> Datos eléctricos: Tipo de motor: SIEMENS Clase eficiencia IE: IE3 Potencia nominal - P2: 0.55 kW Frecuencia de red: 50 Hz Tensión nominal: 3 x 220-240D/380-420Y V Intensidad nominal: 2,31-2,09/1,32-1,2 A Intensidad de arranque: 590-590 % Cos phi - factor de potencia: 0.78 Velocidad nominal: 1440 rpm Eficiencia: IE3 80,8% Eficiencia del motor a carga total: 80.8-80.8 % Eficiencia del motor a una carga de 3/4: 81.1-81.1 % Eficiencia del motor a una carga de 1/2: 79.3-79.3 % Número de polos: 4 Grado de protección (IEC 34-5): IP55 Clase de aislamiento (IEC 85): F Motor N.º: 99900485 </p> <p> Otros: Índice de eficiencia mínima, IE min: 0.50 Peso neto: 44.4 kg Peso bruto: 55 kg Volumen de transporte: 0.16 m³ VVS danés n.º: 382762091 RSK sueco n.º: 5732873 NRF noruego n.º: 9044204 </p>