

3iA

Instituto de Investigación
e Ingeniería Ambiental



Universidad
Nacional
de San Martín

PROYECTO FINAL INTEGRADOR

INGENIERÍA AMBIENTAL

“Estudio de prefactibilidad de biodigestión del
bagazo proveniente de cervecería artesanal”

Autor: Tomás Debandi

DNI: 38.165.870

LEGAJO N°: CYT-6157

Año 2021

Abstract

In this project, a biogas plant was designed to re-use the majority solid waste from a craft brewing industry (bagasse), in order to reuse biogas as thermal energy in the production process and reduce costs associated with the disposal of the waste. For a more precise design, an experimental stage was carried out in order to characterize the substrate used and obtain its Biomethane Potential (BMP) following a clear and detailed methodology.

The brewery used in the case study is located in the Ciudad Autónoma de Buenos Aires and has a production flow of 20,000 liters of beer per month and a projected 30,000 liters of beer per month, generating between 5,400 and 8,100 kg of solid waste per month respectively and an availability of 100 m² for the installation of the biodigestion system.

The project includes an introduction to the craft brewing industry, a brief description of the production process and its residues, and a diagnosis of the brewery used as a case study. Regarding biogas, it briefly introduces the current situation in Argentina, the fundamental mechanisms of anaerobic digestion, operational conditions and parameters, stages, components and main technologies of a biogas plant.

The experimental stage is based on the determination of the BMP, for which it introduces the fundamental factors of the test, the materials and methods used, and the results obtained. In conclusion, BMP values were obtained for beer bagasse without pretreatment and with mechanical pretreatment, and mechanical-thermal, for two substrate / inoculum ratios. The characterization parameters of the substrate and the effluent generated from the process on a laboratory scale were also obtained.

Based on the comprehensive analysis of the results obtained in the tests and the data collected, an Anaerobic Contact Process system was selected as the biogas plant (CSTR system with a settler after the biodigester and sludge recycling). As pretreatment, an integrated unit was selected with dilution, mixing, neutralization and heating of the solid line (bagasse and other assimilable solid waste) and the liquid line (liquid effluent from the brewhouse).

The biogas generated has a desulfurizing and dehumidifying treatment and a storage system. It is used to supply the heating system of the biogas plant and the thermal operations of the brewhouse, covering between 66 and 81% of the total thermal energy requirements of the brewery.

The basic engineering plans, the economic analysis, an analysis of economic viability according to the size of the industry, and a Safety, Use and Maintenance Manual for the Biogas Plant are also presented to guarantee its correct operation.

Resumen ejecutivo

En el presente Proyecto Final Integrador se realizó el diseño de una planta de biogás a partir de el residuo sólido mayoritario proveniente de una industria cervecera artesanal (bagazo), con el fin de reutilizar el biogás como energía térmica en el proceso productivo y disminuir los costos asociados a la disposición del residuo. Para un diseño más preciso, se realizó una etapa experimental con el objetivo de caracterizar el sustrato utilizado y obtener su Potencial de Biometano (BMP) siguiendo una metodología clara y detallada.

La cervecería utilizada como caso de estudio se encuentra ubicada en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y posee caudal productivo de 20.000 litros de cerveza/mes y un proyectado a 30.000 litros de cerveza/mes, generando entre 5400 y 8100 kg de residuos sólidos por mes respectivamente y una disponibilidad de 100 m² para la instalación de el sistema de biodigestión.

El proyecto incluye una introducción a la industria cervecera artesanal, una breve descripción del proceso productivo y sus residuos, y un diagnóstico de la cervecería utilizada como caso de estudio. Respecto al biogás, introduce brevemente la situación actual en Argentina, los mecanismos fundamentales de la digestión anaeróbica, condiciones y parámetros operacionales, etapas, componentes y tecnologías principales de una planta de biogás.

La etapa experimental se basa en la determinación del BMP, para lo cual introduce los factores fundamentales del ensayo, los materiales y métodos utilizados, y los resultados obtenidos. Como conclusión, se obtuvieron los valores de BMP para el bagazo cervecero sin pretratamiento y con pretratamiento mecánico, y mecánico-térmico, para dos relaciones de sustrato/inóculo. También se obtuvieron los parámetros de caracterización del sustrato y los efluente generados del proceso a escala laboratorio.

A partir del análisis integral de los resultados obtenidos en los ensayos y los datos relevados, se seleccionó como planta de biogás, un sistema de Proceso Anaeróbico de Contacto (sistema CSTR con un sedimentador posterior al biodigestor y reciclaje de lodos). Como pretratamiento, se seleccionó una unidad integrada con dilución, mezcla, neutralización y calentamiento de la línea sólida (bagazo y otros residuos sólidos asimilables) y la línea líquida (efluente líquido proveniente de la Brewhouse).

El biogás generado posee un tratamiento desulfurizador y deshumidificador y un sistema de almacenamiento. Es utilizado para suplir el sistema de calefacción de la planta de biogás y las operaciones térmicas de la brewhouse, cubriendo entre un 66 y 81 % de los requerimientos totales de energía térmica de la cervecería.

También se presentan los planos de ingeniería básica, el análisis económico, un análisis de viabilidad económica según el tamaño de la industria, y un Manual de seguridad, uso y mantenimiento de la Planta de Biogás para garantizar su correcta operación.

“¿Qué tipo de mundo queremos dejar a quienes nos sucedan? Lo que está en juego es nuestra propia dignidad. Somos nosotros los primeros interesados en dejar un planeta habitable para la humanidad que nos sucederá”.

Francisco I, Laudato Si.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de San Martín y toda la educación pública en Argentina, por permitir el privilegio e igualdad de oportunidades a través del estudio libre y gratuito

A la Escuela de Ciencia y Tecnología y al Instituto del 3IA, a sus directores y docentes, por su dedicación, cercanía, compromiso con sus alumnos y la calidad educativa que brindan

Al Instituto Nacional de Tecnología Industrial, en especial al personal del Departamento de Evaluación y Control de la Contaminación, por recibirme con los brazos abiertos al realizar las prácticas, brindarme su acompañamiento, conocimiento y afecto durante el proceso

A mis docentes de proyecto, la Ing. Rodríguez e Ing. Bailat, por ser docentes y profesionales inspiradores, por su acompañamiento y sostén en todo el tramo final de mi proceso académico

A mis padres, profesionales apasionados, quienes siempre promovieron mi educación y el amor por aprender desde pequeño, gracias por su ejemplo, todo su afecto, escucha y contención a lo largo de todo este camino

A todos mis compañeros, los del principio, los del final, por todas las horas de estudio, mates, risas, compañía y sostén compartidos, en especial a Agustina y Alan, cuya admiración por su dedicación, compromiso ambiental y calidad humana es total

A Dios, por ser mi principal motor, guía, sponsor y fuente de inspiración en todo este proceso de vida

Índice

| | |
|---|-----------|
| Abstract | 2 |
| Resumen ejecutivo | 3 |
| Agradecimientos | 4 |
| Índice | 5 |
| Glosario | 10 |
| Introducción | 11 |
| Justificación del Proyecto | 13 |
| Objetivo del Proyecto | 14 |
| | |
| CAPÍTULO 1 Diagnóstico General | 15 |
| 1.1 Industria cervecera en Argentina y el mundo | 15 |
| 1.2 Industria cervecera artesanal en Argentina | 17 |
| 1.3 Producción de biogás en el mundo | 19 |
| 1.4 Producción de biogás en Argentina | 19 |
| | |
| CAPÍTULO 2 Proceso productivo y sus residuos | 24 |
| 2.1 Descripción del proceso productivo | 24 |
| 2.1.1 Materias primas: | 24 |
| 2.1.2 Etapas del proceso | 27 |
| 2.2 Generación de residuos y contaminación durante del proceso productivo | 35 |
| 2.2.1 Residuos sólidos | 37 |
| 2.2.2 Efluentes líquidos | 39 |
| 2.2.3 Emisiones a la atmósfera | 41 |
| 2.2.4 Olores | 41 |
| 2.2.5 Consumo de agua | 42 |
| 2.2.6 Consumo de energía | 42 |

| | |
|--|-----------|
| CAPÍTULO 3 Relevamiento de información | 45 |
| 3.1 Bagazo: subproducto | 45 |
| 3.1.1 Características fisicoquímicas del bagazo | 45 |
| 3.1.2 Alternativas de tratamiento del bagazo | 47 |
| 3.2 Marco legal | 51 |
| 3.2.2 Normativas Ambientales | 54 |
| 3.3 Caso de estudio | 56 |
| 3.3.1 Características generales | 56 |
| 3.3.2 Producción | 57 |
| 3.3.3 Consumo energético | 61 |
| 3.3.4 Generación de residuos y costos de disposición | 61 |
| | |
| CAPÍTULO 4 Determinación del BMP | 62 |
| 4.1 Potencial de Biometano (BMP) | 63 |
| 4.1.1 Sustrato | 64 |
| 4.1.2 Inóculo | 65 |
| 4.1.3 Condiciones experimentales | 66 |
| 4.1.4 Condiciones operacionales | 68 |
| 4.1.5 Determinación de BMP | 71 |
| 4.2 Materiales y métodos | 73 |
| 4.2.1 Equipo | 73 |
| 4.2.2 Inóculo | 74 |
| 4.2.3 Sustrato | 75 |
| 4.2.4 Pretratamiento | 75 |
| 4.2.5 Caracterización | 76 |
| 4.2.6 Ensayo de Potencial de Biometano | 77 |
| 4.3 Resultados | 79 |
| 4.3.1 Caracterización inicial | 79 |
| 4.3.2 Producción de metano | 79 |

| | |
|---|-----------|
| 4.3.3 pH | 85 |
| 4.3.4 Sólidos y Demanda química de Oxígeno | 85 |
| 4.3.5 Potencial de biometano (BMP) | 86 |
| 4.4 Conclusiones del ensayo de BMP | 87 |
| CAPÍTULO 5 Planta de generación de biogás | 89 |
| 5.1 Proceso de tratamiento anaeróbico | 90 |
| 5.1.1 Hidrólisis | 91 |
| 5.1.2 Acidogénesis | 92 |
| 5.1.3 Acetogénesis | 92 |
| 5.1.4 Metanogénesis | 93 |
| 5.1.5 Reducción de sulfatos | 93 |
| 5.2 Condiciones y parámetros operacionales | 93 |
| 5.2.1 Temperatura | 94 |
| 5.2.2 Características del Sustrato | 95 |
| 5.2.3 Tiempo de retención | 96 |
| 5.2.4 pH y Alcalinidad | 98 |
| 5.2.4 Tóxicos e inhibidores | 100 |
| 5.2.5 Inoculación inicial | 103 |
| 5.2.6 Agitación - Mezcla | 104 |
| 5.2.7 Tipo de alimentación | 105 |
| 5.3 Etapas de una planta de biogás | 106 |
| 5.3.1. Etapa 1: Pretratamiento | 107 |
| 5.3.3. Etapa 2: Digestión Anaeróbica | 107 |
| 5.3.3. Etapa 3: Tratamiento y disposición del digerido | 107 |
| 5.3.4. Etapa 4: Tratamiento, almacenamiento y uso de biogás | 108 |
| 5.4 Componentes de una planta de biogás | 109 |
| 5.4.1. Tecnologías de biodigestión | 109 |
| 5.4.2. Elementos y Accesorios de una Planta de Biogás | 115 |

| | |
|---|------------|
| 5.5 Biodigestores propuesto | 119 |
| 5.5.1. Pretratamiento Propuesto | 119 |
| 5.5.2. Tratamiento Anaeróbico Propuesto | 119 |
| 5.5.3. Tratamiento de Biogás Propuesto | 119 |
| 5.5.4. Disposición de Lodos Propuesto | 120 |
| 5.5.5. Esquema General de la Planta de Biogás | 120 |
| CAPÍTULO 6 Diseño del biodigestor | 121 |
| 6.1 Preliminares | 121 |
| 6.1.1 Datos | 121 |
| 6.2 Memoria Descriptiva y de Cálculo de la Planta de Biogás | 125 |
| 6.2.1 Criterios | 125 |
| 6.2.2 Mezcla | 126 |
| 6.2.3 Tanque de pretratamiento | 133 |
| 6.2.4 Biodigestor | 151 |
| 6.2.5 Sedimentador | 176 |
| 6.2.6 Tratamiento, almacenamiento y uso del biogás | 186 |
| 6.3.7 Conducción | 198 |
| 6.3.8 Lodos/digerido | 199 |
| 6.3 Planos generales | 200 |
| CAPÍTULO 7 Presupuesto y evaluación económica | 203 |
| 7.1 Costo de Inversión Inicial (CAPEX) | 203 |
| 7.2 Costos operacionales y de mantenimiento (OPEX) | 207 |
| 7.3 Evaluación económica del proyecto | 209 |
| 7.3.1 Análisis de Viabilidad Económica | 209 |
| 7.3.2 Viabilidad Económica según el tamaño de la Industria | 210 |

| | |
|--|------------|
| CAPÍTULO 8 Manual de seguridad, uso y mantenimiento de la Planta de Biogás | 212 |
| 8.1 General | 212 |
| 8.1.1 Peligros | 213 |
| 8.2 Requisitos de Seguridad | 217 |
| 8.2.1 Evaluación de Riesgos | 217 |
| 8.2.2 Disposiciones de Planta | 219 |
| 8.3 Inspecciones y pruebas | 224 |
| 8.4 Instrucciones Generales | 225 |
| 8.4.1 Puesta en marcha Planta de Biogás | 225 |
| 8.4.2 Operación Planta de Biogás | 228 |
| | |
| CAPÍTULO 9 Conclusiones y recomendaciones | 236 |
| 9.2 Conclusiones sobre el diseño y estudio de prefactibilidad de la Planta de Biogás | 237 |
| 9.3 Conclusiones Personales | 238 |
| 9.1 Conclusiones y Recomendaciones Estudio BMP | 236 |
| | |
| CAPÍTULO 10 Anexos | 239 |
| | |
| CAPÍTULO 11 Bibliografía | 246 |

Glosario

Biogás: Es el gas obtenido por procesos de digestión anaeróbica de materia orgánica, cuyos componentes principales son metano (CH_4) y dióxido de carbono (CO_2), con presencia de nitrógeno (N_2), oxígeno (O_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S) y vapor de agua.

Biodigestor: Es el dispositivo principal donde ocurre el proceso bioquímico de degradación de la materia orgánica, generando en el proceso biogás y digerido, también denominado reactor.

Digerido: Se trata del lodo residual estabilizado (o semi estabilizado) producto del proceso anaeróbico.

Bagazo: Consiste en el grano de malta gastado, residuo sólido principal del proceso cervecero, obtenido luego de la etapa de maceración.

Carbono orgánico total (COT, o TOC por sus siglas en inglés): Se refiere es la cantidad de carbono que forma parte de compuestos orgánicos y se usa frecuentemente como indicador no específico de la cantidad de materia orgánica presente en la muestra, expresado en mg C/kg o mg C/L.

Demanda química de oxígeno (DQO): Se refiere a la cantidad de oxígeno que se necesita para oxidar la materia orgánica por medios químicos y convertirla en dióxido de carbono y agua, expresado en g O_2 /L o g O_2 /kg.

Sólidos Totales (ST): Sustancias que conforman la materia remanente de la muestra luego de pasar por una estufa a 105°C , expresado en % m/m.

Sólidos Fijos (SF): Sustancias que conforman la materia remanente de la muestra luego de pasar por una mufla a 550°C , expresado en % m/m.

Sólidos Volátiles (SV): Sustancias que conforman la materia producto de la diferencia entre los sólidos Suspendidos Totales (ST) y los sólidos remanentes de la muestra luego de pasar por una mufla a 550°C , expresado en % m/m.

Inóculo: Material orgánico compuesto por diversos microorganismos, entre ellos, los metanogénicos activos, rodeados del medio que les sirve de hábitat.

Sustrato/efluente: Material orgánico o semi sintético, líquido o semi sólido utilizado para evaluar el BMP a través de su degradación anaeróbica por medio del inóculo.

Potencial Bioquímico de Metano (BMP): Es la capacidad de producir metano que exhibe una determinada cantidad de sustrato puesto en condiciones óptimas digestión anaeróbica. Se expresa en $\text{L}_{\text{CH}_4}/\text{L}$ (o $\text{kg}_{\text{sustrato}}$) o $\text{L}_{\text{CH}_4}/\text{g}_{\text{SV}}$.

Ácidos grasos volátiles (AGV's): Es la concentración de ácidos grasos de cadena corta de menos de 6 carbonos, expresada en mg HAC/L.

Alcalinidad: Es la capacidad amortiguadora del sistema frente a cambios de pH, expresada en mg CaCO_3/L .

FOS/TAC: Relación entre concentración de ácidos grasos volátiles y alcalinidad (FOS/TAC, por sus siglas en alemán)

Introducción

La industria cervecera es un sector en auge y constante desarrollo en todo el mundo. Argentina no es la excepción al presentar un fuerte crecimiento durante la última década, especialmente en el sector de cerveza artesanal, el cual, a pesar de ser aún un segmento pequeño dentro del volumen de producción a nivel nacional, demuestra ser un rubro rentable y en expansión. Su producción, gobernada en su mayoría por pequeños y medianos productores, genera efluentes de alto contenido orgánico, contaminantes para los cuerpos receptores si no reciben un apropiado tratamiento.

Durante la elaboración de la cerveza artesanal se generan diversos tipos de residuos, tanto sólidos como líquidos (efluentes). El residuo sólido principal es el grano de malta agotado o también denominado bagazo, subproducto obtenido del proceso de prensado y filtrado del mosto luego de la maceración. El bagazo posee un volumen de producción del 85% respecto al total de sólidos generados oscilando entre aproximadamente 14 a 20 kg cada 100 litros de cerveza producida (Reinold, 1997 & Fillaudeau et al., 2006). Otros residuos sólidos minoritarios son las levaduras usadas, lúpulos, proteínas coaguladas durante la cocción (denominado usualmente “turb”) (Ishiwaki et al., 2000), y en algunos casos, el residuo tierra de diatomeas utilizado para filtrar la cerveza en las etapas finales, cuya presencia depende del proceso productivo utilizado (Fisher, 1992).

El bagazo presenta un importante valor nutritivo por sus altos contenidos de proteína y fibra, y usualmente se lo destina como suplemento alimenticio ganadero, sin embargo dicha práctica es parcial ya que se dificulta en producciones cerveceras que se encuentran en grandes metrópolis. Otra opción es su uso para la producción de energía, particularmente conveniente cuando puede ser aprovechada en el propio proceso productivo de la cerveza (Thiago et al., 2014).

La producción de energía a través del bagazo cervecero se realiza a través de la digestión anaeróbica para producir biogás con altos contenidos de metano (Mussatto et al., 2004). Esto ocurre a través de reacciones de biodegradación de la materia orgánica mediante la acción de microorganismos, en ausencia de oxígeno y determinadas condiciones (temperatura, pH, nutrientes, etc). Este proceso logra la reducción del volumen y cantidad del residuo original (disminuyen los sólidos totales y volátiles), la estabilización de los sólidos y la generación de biogás.

El biogás generado es un recurso energético renovable: cuando su contenido de metano es superior al 45% es inflamable, y puede utilizarse en calderas o usinas para la producción de calor o electricidad (GIZ, 2010). Su composición está formada principalmente por un 55% a un 70% de metano (CH_4) y un 30% a 45% de dióxido de carbono (CO_2) conteniendo pequeñas cantidades de otras impurezas. Para una composición 70% CH_4 y 30% CO_2 su contenido energético equivale a 0,60 - 0,65 litros de petróleo por m^3 de biogás (Manual de Biogás, 2011).

La digestión anaeróbica ocurre naturalmente en ambientes sin oxígeno y puede realizarse de forma controlada en dispositivos específicos llamados biodigestores

(Rodríguez, 2012). La digestión anaeróbica es un proceso complejo, multifactorial, donde para facilitar su comprensión se puede dividir en cuatro etapas. La primera comprende la hidrólisis de los compuestos orgánicos complejos de cadena larga (carbohidratos, proteínas, etc.) y su transformación en compuestos más simples. En la segunda etapa ocurre la acidogénesis, los compuestos orgánicos simples son metabolizados en forma de ácidos grasos de cadena corta, dióxido de carbono e hidrógeno. La acetogénesis, la tercera etapa del proceso, consiste en la conversión de los ácidos grasos en acetato e hidrógeno y el dióxido de carbono e hidrógeno en más acetato. Por último, la metanogénesis donde se reducen el dióxido de carbono y acetato para formar metano (GIZ, 2010).

Dada la complejidad del proceso anaeróbico, para un diseño exitoso del biodigestor, es fundamental el buen conocimiento de las características físicas y bioquímicas del sustrato/residuo y su comportamiento bajo ciertos parámetros operativos planteados. El Potencial de Biometano (BMP, por sus siglas en inglés) es un test a escala de laboratorio utilizado para conocer la biodegradabilidad anaeróbica de un sustrato y su comportamiento en determinadas condiciones de temperatura, relación de carga, concentración y acidez previo al diseño del biodigestor (BioProcess Control, 2016).

La composición del bagazo consiste en un 15 a 26% de proteínas y un 70% de fibras, compuesto por celulosa (15 a 25%), hemicelulosa (28 a 35%) y lignina (cerca del 28%), y presenta pequeñas cantidades de lípidos, cenizas y vitaminas (Thiago et al., 2014). El alto contenido de fibras plantea dificultades en su digestión debido a que se trata de un compuesto poco biodegradable, sin embargo la optimización de las etapas de la digestión anaeróbica y el desarrollo de biodigestores apropiados para utilizar este tipo de sustrato se vuelven un desafío, donde se estima que la generación de energía a partir del bagazo cervecero puede sustituir hasta el 70% del gas natural requerido por el proceso productivo (Panjičko et al., 2017).

Existen numerosas tecnologías de biodigestión, donde los biodigestores varían enormemente de acuerdo a su complejidad y utilización. Los más sencillos son de alimentación discontinua, bajos costos de inversión y operación, pero también suponen un bajo rendimiento en la producción de biogás. Para aumentar su rendimiento, garantizando una producción continua a lo largo del año para satisfacer la demanda de un proceso productivo, es necesario diseñar sistemas más complejos, que cuenten con calefacción, agitación y un sistema de pretratamiento para adecuar el sustrato a la digestión anaeróbica. Para ello debe seleccionarse la tecnología adecuada, en términos del tipo de sustrato, caudales, capacidad de inversión y operación del caso de estudio planteado.

El desarrollo de plantas de biodigestión especialmente adaptadas a la producción de biogás a partir del bagazo cervecero podría promover el fortalecimiento de los pequeños y medianos productores cerveceros disminuyendo el gasto energético del proceso productivo y contribuir al desarrollo sustentable en Argentina a través de la generación de fuentes de energía renovables a través del tratamiento de los propios residuos industriales.

Justificación del Proyecto

La necesidad de generar energía a partir del bagazo cervecero para utilizarla en el propio proceso productivo de cervecerías artesanales puede evidenciarse en los siguientes aspectos:

El consumo y la producción de cerveza son factores en tendencia en nuestro país, así como en el mundo. En la última década el sector productivo de cervezas artesanales vivió una expansión y se multiplicaron las microcervecerías en todo el país. Este crecimiento trajo aparejado un aumento de los efluentes y residuos propios del proceso, acentuando los impactos a nivel ambiental, socioeconómico, etc. Es imprescindible, en pos de la sustentabilidad, tomar medidas adaptadas a nuestra realidad para minimizar al máximo los impactos negativos, sin dejar de lado los impactos positivos buscados.

El bagazo, subproducto de la maceración, es el residuo mayoritario del proceso productivo. Su alto contenido orgánico biodegradable y su temperatura inicial, provocan una rápida descomposición de su materia orgánica, genera olores y lixiviados molestos, obliga su eliminación lo más inmediatamente posible. Esta característica, sumada a los amplios volúmenes generados, vuelve costoso su transporte y disposición a través de los métodos convencionales.

La industria cervecera artesanal posee un alto índice de consumo de energía térmica obtenida a partir de la red de gas natural. Los constantes aumentos en los precios de energía asociados al uso de energías no renovables y la posibilidad futura de la quita de subsidios en las tarifas de consumo de gas y electricidad aumentan el riesgo en la rentabilidad del proceso a futuro, siendo una problemática común a todos los establecimientos cerveceros. La producción de biogás a partir de un subproducto autogenerado como el bagazo permitiría reemplazar parte del consumo de gas natural con un recurso renovable, disminuyendo los costos de energía térmica.

Analizar la capacidad de generar biogás del bagazo cervecero, diseñar el biodigestor para el espacio disponible y realizar un escalado para determinar los caudales productivos mínimos, facilitaría una alternativa para los negocios cerveceros para la reducción del impacto ambiental y costos asociados a la producción y disposición de residuos.

Para un diseño exitoso del biodigestor es necesario conocer el Potencial de Biometano (BMP) del bagazo cervecero. A pesar de se han generado una gran cantidad de datos bibliográficos al respecto en las últimas décadas, dichos datos de biodegradabilidad resultan, muchas veces, poco detallados en referencia a la metodología, equipo y condiciones de los ensayos de BMP aplicados, haciendo dificultosa su comparación (Angelidaki et al., 2009). Dicha problemática decanta en la necesidad e interés de realizar una determinación del BMP a través de una metodología detallada para futuras repeticiones.

El caso de estudio se trata de una Pyme pequeña ubicada en el barrio de Chacarita, cerca del epicentro de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Cuenta con un caudal productivo de 20000 litros de cerveza/mes. En la actualidad no posee ningún tipo de

tratamiento para los efluentes líquidos y sólidos, donde los primeros son volcados en el alcantarillado y los segundos son retirados por una empresa transportista. La posibilidad de analizar soluciones sustentables para pequeñas empresas y el correspondiente análisis de prefactibilidad, abre la puerta para conocer, en la actualidad, a partir de que caudales mínimos es económicamente viable una solución de mayor sustentabilidad ambiental.

Objetivo del Proyecto

El objetivo del proyecto es realizar un estudio de prefactibilidad técnico y económico, para determinar el volumen mínimo de residuos a partir del cual es factible el tratamiento del bagazo proveniente de la industria de cerveza artesanal utilizando un biodigestor, para, así darle valor agregado al subproducto, disminuyendo la contaminación y los insumos energéticos del proceso productivo de fabricación.

Para ello se ejecutó la caracterización del sustrato, la determinación del Potencial de Biometano (BMP) y caracterización del efluente resultante de la biodigestión en el laboratorio y utilizando los equipos del departamento de Departamento de Evaluación y Control de la Contaminación del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI).

Posteriormente con los resultados obtenidos, se realizó la elección del tipo reactor anaeróbico para producir biogás y su dimensionamiento adecuado para la industria seleccionada como caso de estudio y un análisis económico del proyecto y los caudales productivos mínimos a partir de los cuales se hace viable el tratamiento.

El proyecto también incluye el correspondiente manual de seguridad, uso y mantenimiento para la Planta de Biogás. No incluye el diseño de tratamiento de los efluentes posteriores al biodigestor, pero sí recomendaciones para su tratamiento y disposición.

Objetivos Específicos

- Caracterizar la composición del bagazo cervecero utilizado para producir biogás
- Determinar el potencial de biometano del bagazo cervecero a escala laboratorio
- Caracterizar el efluente resultante de la biodigestión
- Analizar el uso de pretratamientos sobre el bagazo
- Seleccionar el tipo de biodigestor requerido y dimensionarlo para las condiciones de la cervecería utilizada como caso de estudio
- Realizar análisis de prefactibilidad económico
- Desarrollar el manual de seguridad, uso y mantenimiento para la planta biodigestión planteada.

CAPÍTULO 1

Diagnóstico General

1.1 Industria cervecera en Argentina y el mundo

La cerveza es un bien de consumo masivo, siendo la bebida alcohólica más consumida en el mundo, con más de 50 clases de cerveza y unas 40.000 marcas en el mundo. La producción de cerveza a nivel mundial ha aumentado considerablemente en las últimas décadas: entre 1998 y 2018, el incremento fue de aproximadamente el 145% (**Figura 1.1**), lo que equivale a un aumento de la producción de 30 millones de litros por año.

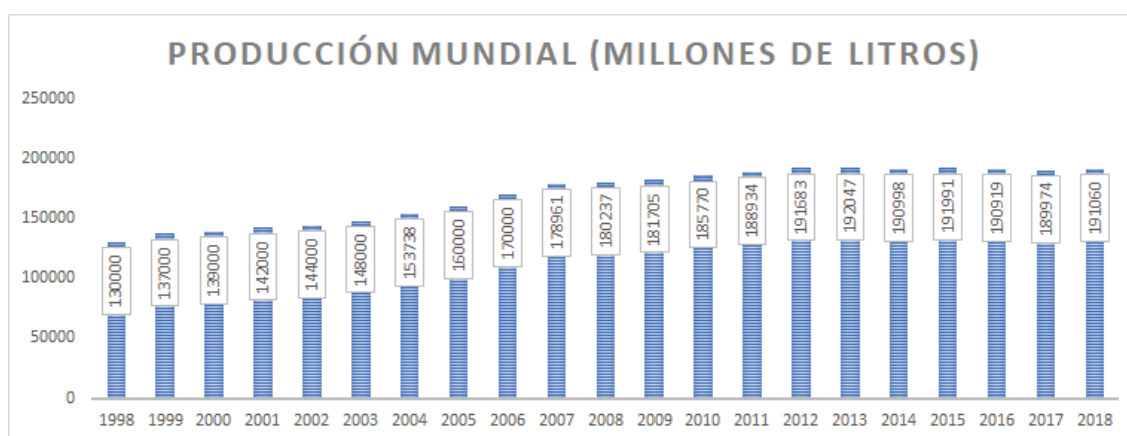


Figura 1.1: Producción mundial histórica de cerveza en millones de litros (Fuente: <http://www.kirinholdings.co.jp>)

La producción mundial alcanzó su pico en el 2013 con una producción de 192047 millones de litros, y manteniendo valores cercanos en los sucesivos años, aumentando un 0.6% entre el 2017 y el 2018. A nivel regional, Latinoamérica tiene el tercer puesto en producción respecto a la producción total (**Figura 1.2**), y sigue en expansión con un incremento del 2.9% el último año (Kirin Holdings Company, 2020).

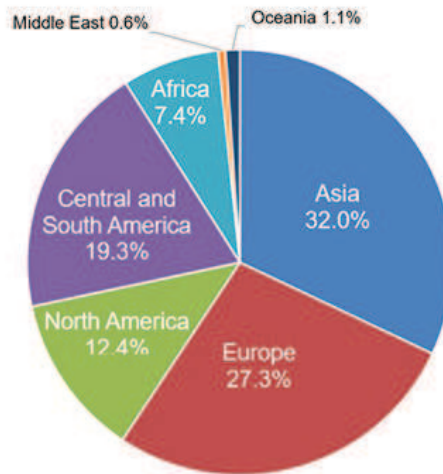


Figura 1.2: Distribución regional de la producción de cerveza en el año 2018 (Fuente: <http://www.kirinholdings.co.jp>)

A su vez, Argentina se encuentra entre los 25 países del mercado con mayor volumen de producción (**Figura 1.3**), donde China, quien lidera el mercado con la mayor producción de cerveza en los últimos 17 años, disminuyó su producción en los últimos años, al igual que Estados Unidos y Brasil, mientras que México, Rusia y Filipinas aumentaron su producción, aportando al aumento de la producción global (Kirin Holdings Company, 2020). Como novedad, en Estados Unidos, a pesar de su contracción en la producción de los últimos años, la producción de cerveza artesanal sigue ganando popularidad, alcanzando el 13.2% de la producción neta de cerveza durante el 2018 (Brewers Association, 2020)

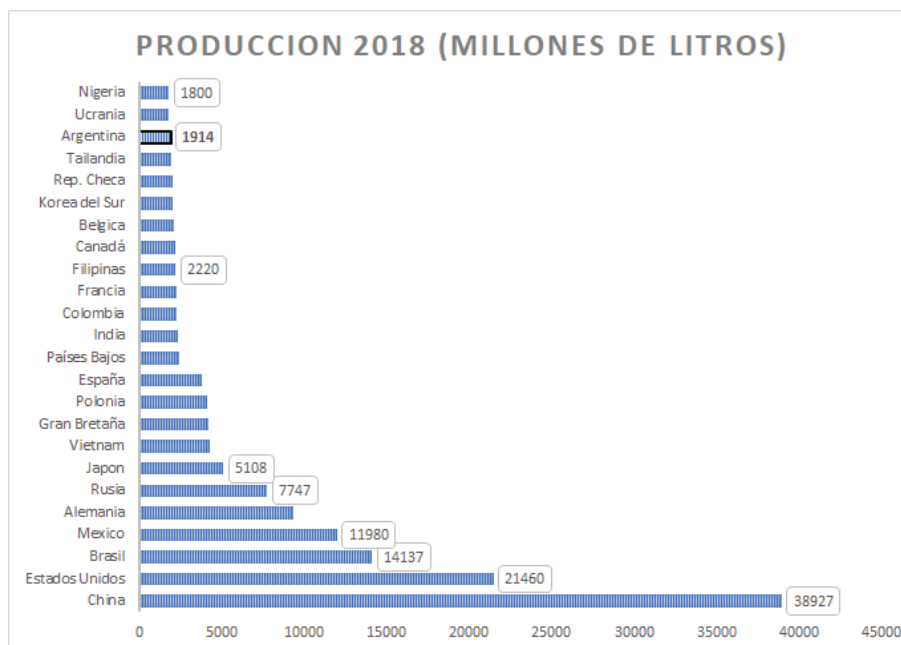


Figura 1.3: Ranking de producción de cerveza en el año 2018 (Fuente: <http://www.kirinholdings.co.jp>)

Argentina experimentó un crecimiento dinámico en el producción cervecera durante las últimas dos décadas, debido, por un lado, a un fuerte proceso de globalización y concentración del mercado de cervezas industriales, y por otro, al surgimiento, a nivel local, de cervezas de producción artesanal a pequeña escala. Según datos de la Cámara de la Industria Cervecera Argentina y del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC), entre 1991 y 2013 la venta de cervezas en Argentina registró un incremento del 262%, pasando de poco menos de 800 a 2.108 millones de litros anuales tal como se observa en el siguiente gráfico (**Figura 1.4**):

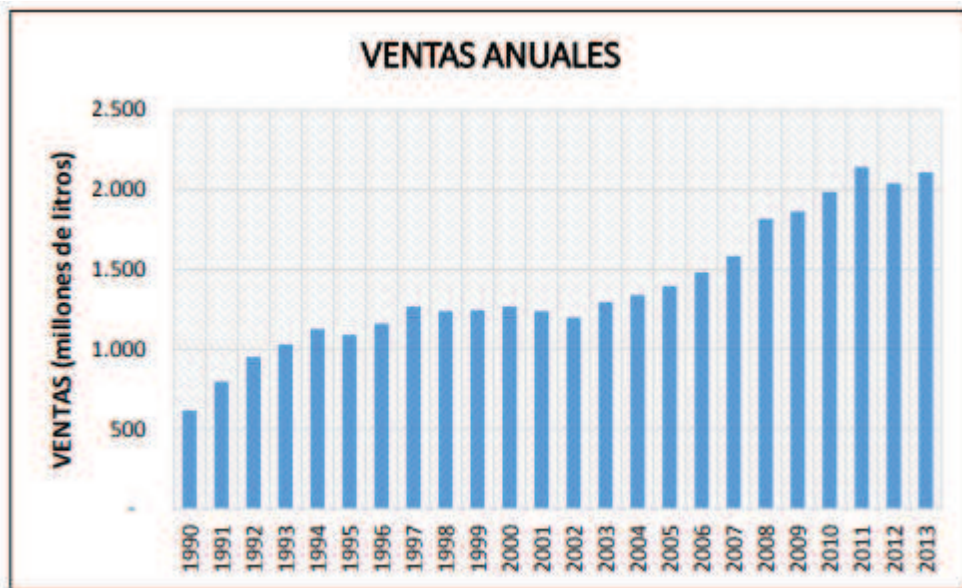


Figura 1.4: Ventas de cerveza en Argentina (Fuente: <https://www.indec.gob.ar/>)

Al igual que en Estados Unidos, parte de este crecimiento se debe al sector productor de cervezas artesanales, aunque su producción a nivel nacional aun es pequeña respecto a la cerveza industrial, creció a un ritmo del 20% anual durante el año 2013, mientras que la oferta total, en su mayoría industrial, creció solo un 1% anual (Ablin, 2014, 2015).

1.2 Industria cervecera artesanal en Argentina

Según Kleban y Nickerson (2011), el sector productor de cervezas artesanales se identifica por tener producciones a baja escala, tiempos de producción relativamente cortos, combinando la elaboración de recetas tradicionales con la búsqueda de productos de calidad y diferenciados, incorporando nuevos ingredientes que resultan en nuevos estilos. La Brewers Association de Estados Unidos, agrega que se trata de emprendimientos comúnmente independientes en términos de sociedad comercial, ya que menos del 25% del capital de la cervecería artesanal sería propiedad de un miembro preestablecido de la industria del alcohol.

En la búsqueda de estandarizar esta industria en creciente desarrollo en Argentina, en 2017, se incorporó la producción de cerveza artesanal en el Código Alimentario Argentino (Art. 1082 bis), planteando que se considera así a aquella cerveza que: a) no utilice en su producción aditivos alimentarios; b) se encuentre adicionada únicamente con ingredientes naturales; c) tenga una elaboración manual o semiautomática; y d) en el caso que se le agregue jugos o extractos de frutas, éstos sean previamente pasteurizados. Esta definición, de orden técnico, deja fuera aspectos productivos y económicos como la escala de producción y el origen del capital.

Estos aspectos productivos del sector cervecero artesanal tienen un gran espectro debido a la gran variedad de actores: desde personas que producen en forma casera, en la propia vivienda, con productos de calidad variable y poco estandarizados, hasta cervecerías artesanales con un caudal productivo mensual considerable y altos estándares de calidad. Esta heterogeneidad del sector, dificulta la disponibilidad de datos rigurosos sobre la producción, y debido a la falta de trabajos previos en Argentina que hayan intentado categorizar a los productores cerveceros artesanales, impiden contar con datos precisos para su estudio detallado (Pellet y Nougues, 2016).

En la **Tabla 1.1** se muestra la categorización de actores del sector según el estudio presentado en los Estados Unidos por Kleban y Nickerson (2011), donde se establecen como criterio el volumen de producción anual de cerveza producida y la forma de comercialización, dividiendo el segmento en 6 grupos diferentes.

Tabla 1.1: Clasificación de actores según su producción y tipo de comercialización por Kleban y Nickerson (2011)

| Grupo | Producción anual m ³ /año | Descripción |
|---|--------------------------------------|---|
| Nanocervecería | < 3.6 | Operan con volúmenes muy bajos |
| Microcervecería | 3.6 - 1800 | Más del 75% es vendido fuera de la cervecería |
| Brewpub | | Cuenta con restaurante donde más del 25% se vende en el lugar o para llevar |
| Compañías por contrato (Contract brewing company's) | | Tercerizan su producción a otras cervecerías, mientras que son responsables del marketing, distribución y venta |
| Cervecería artesanal regional | 1800 - 240000 | Más del 50% de su volumen productivo se focaliza en elaborar maltas especiales |
| Cervecería grande (large brewery) | 240000 < | Volúmenes muy altos de producción |

Utilizando este criterio de categorización, sumado a los datos recolectados provenientes del Centro de Cata y posteriormente corroborados con los proveedores de levadura y malta, en Argentina durante el año 2015 se produjeron 16 millones de litros de cerveza artesanal, tres millones más que en 2013 (Anuario Cervecero de Sudamérica, 2016). Y si bien, como se mencionó anteriormente, no existen estudios sistemáticos sobre la composición de sus actores, diversos informes hablan de la existencia de más de 1200 microcervecerías y 400 brewpub en todo el país (Colino, et al., 2017).

1.3 Producción de biogás en el mundo

La generación de biogás alcanzó por primera vez especial importancia durante la segunda guerra mundial debido a la escasez de combustibles. Con el fin de la guerra y la fácil disponibilidad de combustibles fósiles, su desarrollo se vio frenado y sus instalaciones fueron cesando su funcionamiento. En India, a comienzos de 1960, se impulsaron las tecnologías de generación de biogás a partir del estiércol bovino para el doble propósito de generar energía y obtener biofertilizante. Luego en China, en 1970, se fomentó la construcción de biodigestores sencillos y económicos mediante un ambicioso programa nacional (FAO, 2019). Este desarrollo no estuvo exento de errores y fallos que hicieron que la difusión de este tipo de tecnologías por el resto del mundo fuera, incluso en la actualidad, poco conocida.

En los países más industrializados, el desarrollo de las tecnologías de biodigestión se debió principalmente a motivaciones medioambientales que puramente energéticas, donde usualmente se aplicaba para estabilizar los lodos activos generados por las plantas de tratamiento de efluentes domésticos. Durante 1980, volvió a adquirir cierta importancia como forma de recuperación energética en explotaciones agropecuarias y agroindustriales, que nuevamente volvió a decaer con la disminución de los precios del petróleo a fin de la década. Sin embargo, desde el 2000, algunos países industrializados han desarrollado importantes programas de fomento de plantas de biodigestión a nivel industrial y doméstica.

En la actualidad, el biogás se utiliza en gran parte del mundo como una fuente de combustible a nivel industrial en países como Alemania, Estados Unidos, Brasil, Reino Unido y otros países de Europa, y a nivel doméstico o rural en China, India, Nepal, varios países de África y de América Latina (Rowse, 2011). Su desarrollo contribuyó a impulsar economías más sustentables proporcionando una fuente energética renovable alternativa al carbón y al petróleo.

1.4 Producción de biogás en Argentina

La matriz energética en Argentina se compone, principalmente, por combustibles fósiles como el gas y el petróleo, siendo su potencia instalada actualmente insuficiente para cubrir las necesidades energéticas de la población creciente. En los últimos años el acento que hubo en el desarrollo de energías renovables, hizo que aumentara la cobertura de la demanda eléctrica de un 2,2% en 2016, a un 6% durante el 2019, según el Ministerio de Desarrollo Productivo Argentina (argentina.gob.ar, 2020).

A su vez, el aumento de la población mundial ha llevado a una creciente demanda de alimento, intensificando las producciones en los países de economías de producción de alimentos. En Argentina existe un creciente volumen de recursos y residuos provenientes de la biomasa disponible que puede utilizarse para la generación de energía y que no son tratados, generando una problemática de gran impacto ambiental.

Entre las tecnologías que pueden utilizarse para el aprovechamiento de estos subproductos o residuos del proceso productivo con fines energéticos, está la producción de biogás. El biogás se origina a través de un proceso biológico que descompone la materia orgánica en un medio anaerobio, vía intervención de microorganismos, liberando una mezcla constituida mayoritariamente por metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y pequeñas trazas de otros gases. Este brinda un poder calorífico equivalente a $0,65 \text{ m}^3$ de gas natural por metro cúbico de biogás (Tobares, 2012).

Las aplicaciones para este tipo de tratamiento van desde ser usada como combustible a la generación de energía eléctrica, térmica, mecánica e incorporación a la red de gas natural, siendo una fuente de energía renovable confiable, constante, almacenable, características que la hacen muy versátil. Su uso contribuye positivamente en la gestión integral de residuos, evitando la ocupación de espacios con basurales, la contaminación visual y la polución de suelos y napas.

Entre otras ventajas, permite su abastecimiento sin estar afectado por las variaciones en las condiciones climáticas diarias, suceso corriente en las energías eólicas y solares y, a su vez, genera subproductos de valor económico potenciales para ser utilizados en la producción agropecuaria como fertilizantes. También, la producción de biogás tiene un importante papel en el control de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), debido a dos motivos: reemplaza combustibles fósiles y convierte en energía residuos forestales, agropecuarios, industriales y urbanos, que de otra manera emitirían al ambiente grandes cantidades de metano (21 veces más perjudicial que el CO_2 desde el punto de vista del efecto invernadero) (Comisión Nacional de Energía, 2006).

Respecto al uso de sustratos para su degradación, existe un gran abanico de residuos o subproductos re-valorizables mediante esta tecnología: Residuos de origen ganadero, agrícola, residuos provenientes de mataderos, pesqueros, plantas productoras de biocombustibles, lodos de plantas de depuración e incluso el uso de la Fracción Orgánica de Residuos Sólidos Urbanos (FORSU) proveniente de todo asentamiento urbano. También, dentro de este abanico de posibilidades, se encuentran los residuos de la industria alimentaria, como lácteas, cervecerías, azucareras y similares producen residuos de muy alta carga orgánica muy adecuados para su aprovechamiento energético (Tobares, 2012).

Considerando las excelentes condiciones agroecológicas de la actualidad y las ventajas de su sector agroindustrial, Argentina es un gran productor de biomasa con potencial para la producción de biogás, a lo que se suma la posibilidad de la generación de empleo y fortalecer economías locales y provinciales en un contexto de déficit energético. No obstante, su desarrollo se ve demorado por algunas barreras en el orden institucional, legal, económico, técnico y socioculturales (FAO, 2019).

Debido a esto, en el 2012 se creó el Proyecto para la promoción de energía derivada de la biomasa (PROBIOMASA) con el objetivo de incrementar la producción de energía térmica y eléctrica derivada de la biomasa a nivel local, provincial y nacional en búsqueda de obtener una energía limpia, confiable y que sea competitiva, estimulando nuevos

mercados y el desarrollo regional. Para ello, en 2015, este Proyecto, en conjunto con el Instituto de Tecnología Industrial (INTI), realizó un censo con el objetivo de establecer un diagnóstico nacional sobre la situación de biodigestión anaeróbica en el país. Se identificaron 105 plantas de producción de Biogás (**Figura 1.5**) de las cuales se relevaron 62 (FAO, 2019).

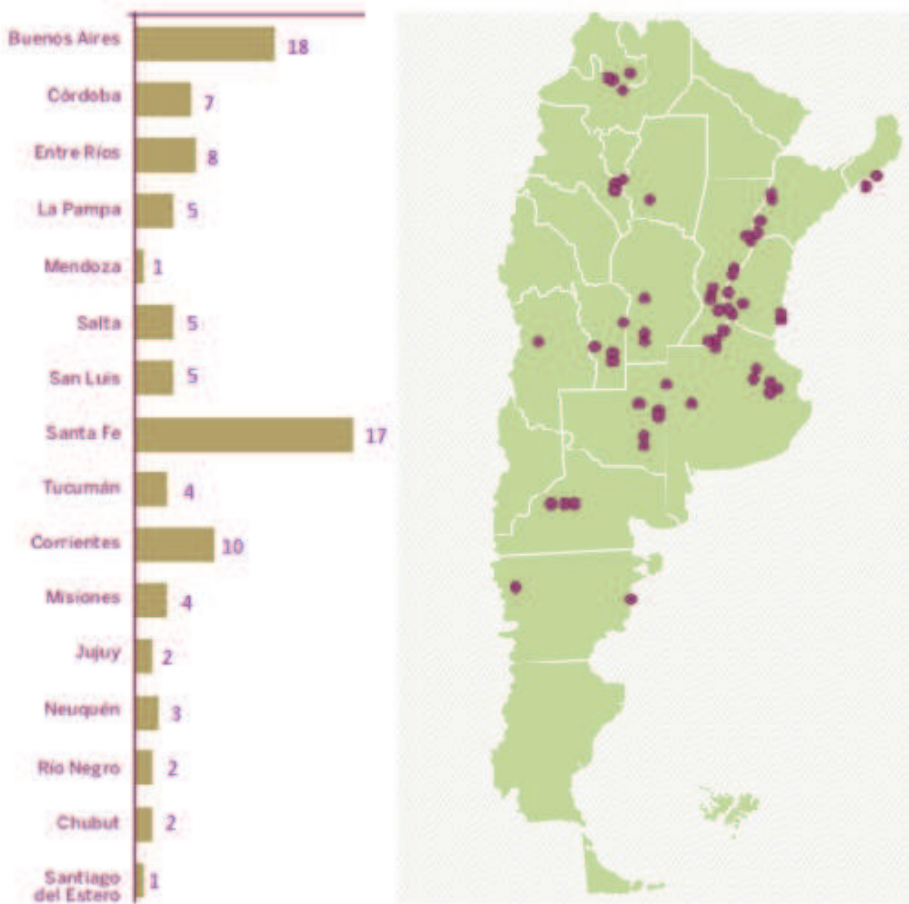


Figura 1.5: Ubicación de las plantas relevadas en el país (Fuente: FAO, 2018)

Los resultados obtenidos mostraron que el 53,1% de las plantas relevadas pertenecen al sector privado, el 37,5% al sector público, mientras que las cooperativas y ONGs suman el 4,7% (**Figura 1.6**). Dentro del sector privado, el 85,3% utiliza dicha tecnología como un sistema de tratamiento de efluentes o desechos y solo un 6% lo usa con fines principalmente energéticos. Esto deja en evidencia el sub-aprovechamiento de las instalaciones para utilizar el biogás como fuente de energía (FAO, 2018).

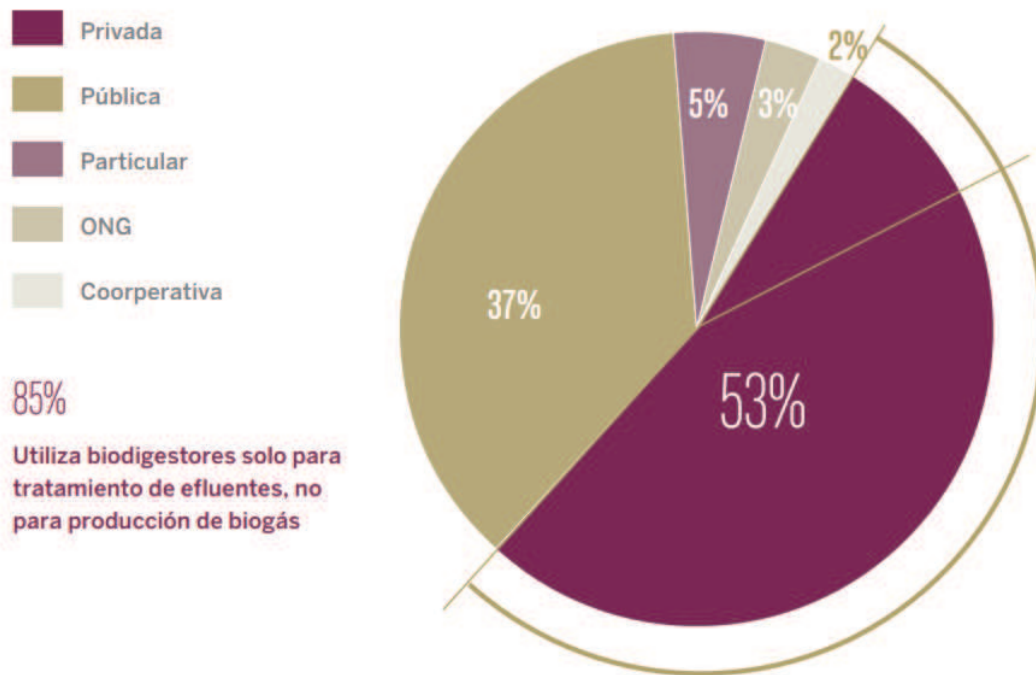


Figura 1.6: Clasificación de las plantas relevadas por tipo de organización (Fuente: FAO, 2018)

La clasificación según su tamaño se dividió en grandes (>1000 m³), medianas (entre 100 y 1000 m³) y pequeñas (<100 m³) utilizando como parámetro de clasificación el volumen del reactor instalado y no la energía producida. A partir de esto, el relevamiento realizado por el INTI muestra que el 49% de las plantas son pequeñas, el 37% corresponden a plantas grandes y el 14% restante a plantas de tamaño mediano (**Figura 1.7**) (FAO, 2018).

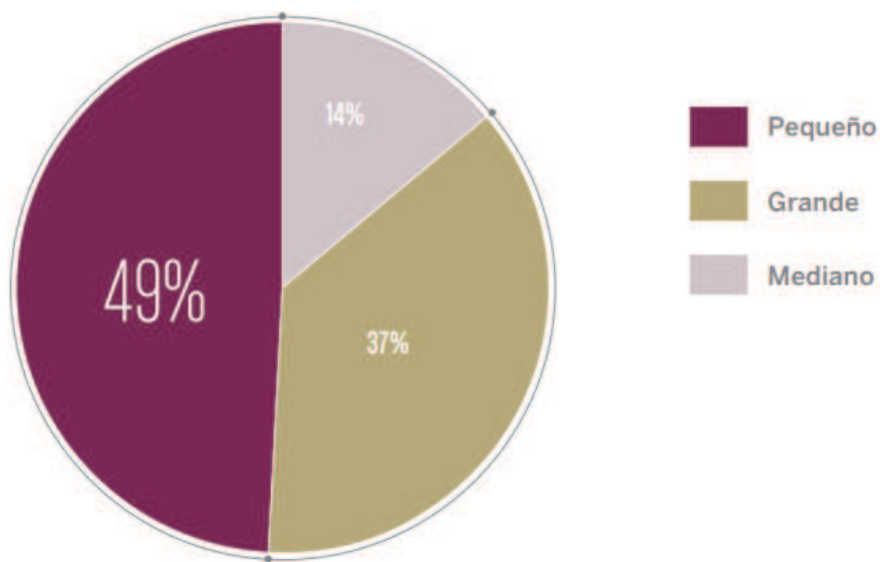


Figura 1.7: Distribución de tamaño según los biodigestores (Fuente: FAO, 2018)

Respecto a las tecnologías utilizadas, la mayoría corresponden a mezcla completa y laguna cubierta. En el relevamiento constataron la existencia de falencias técnicas en la construcción, los materiales utilizados, la seguridad y la operación de las instalaciones, así como también en la formación del personal calificado para el manejo de la planta. También había mucho desconocimiento en el aprovechamiento energético, el uso de equipos y controles, la caracterización del biogás y el fertilizante orgánico generado por el proceso, usos y aplicaciones de los mismos. El informe técnico-analítico provisto por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) en el 2019, explica que tales falencias corresponden, en algunos casos, a normas y estándares respectivos a las condiciones de seguridad, reglamentaciones ambientales y materiales, y en algunos casos, a fallas en los criterios de ingeniería generales, respecto a el uso de indicadores para evaluar el proceso, uso de aislantes térmicos, distribución de agitadores, eficiencias en los equipos utilizados, entre otros.

Los sustratos más utilizados son los desechos industriales, seguido de los desechos orgánicos urbanos y solo una pequeña fracción utiliza biomasa virgen. El uso de los subproductos del proceso como fertilizantes orgánicos no se encuentra desarrollado en el país y, solo el 36.5% de las instalaciones usa el subproducto líquido con alguna finalidad (FAO, 2019).

A pesar del potencial que posee Argentina para la generación de biogás debido a su sólido sector agropecuario y agroindustrial, esta forma de energía alternativa es una oportunidad latente aún no explotada eficazmente. Esto es debido a falencias en la obtención de tecnologías adecuadas, falta de normativa exigente y políticas y decisiones que impulsen su desarrollo. La posibilidad de seguir generando proyectos eficientes de biodigestores a pequeña y mediana escala es una puerta para propiciar el cambio socio-político necesario en pos de aumentar los suministros de energía limpia, confiable, competitiva y, también, abrir nuevas oportunidades laborales, estimular el desarrollo regional y contribuir a mitigar el cambio climático.

CAPÍTULO 2

Proceso productivo y sus residuos

2.1 Descripción del proceso productivo

La cerveza es una bebida alcohólica producto de fermentar en condiciones controladas y utilizando levaduras seleccionadas, una solución altamente azucarada a partir del macerado de los cereales malteados y posterior cocción en conjunto con lúpulo.

2.1.1 Materias primas:

La cerveza se fabrica a partir de 4 ingredientes principales: agua, malta, lúpulo y levadura que se detallan a continuación:

Agua: Es la materia prima que se usa en mayor cantidad siendo aproximadamente el 90% del producto final, desempeñando un papel importante en la determinación de su sabor, su aroma y su color. Para la producción de cerveza es suficiente que el agua sea potable, es decir que no contenga bacterias patógenas, sin embargo, su composición de minerales como Calcio, Magnesio, Potasio y Sodio, así como su pH, contenido de Cloro y Sulfatos influyen significativamente sobre los procesos fisicoquímicos en la fabricación y sobre el resultado final (**Tabla 2.1**).

Tabla 2.1: Iones presentes en la cerveza. Fuente: INTI, 2017.

| Iones | Fórmula | Concentraciones y características |
|-------------------------|---------------------------------------|--|
| Carbonato y Bicarbonato | CO_3^{2-} y HCO_3^- | Influye en la dureza temporal y la alcalinidad, tiene que ser controlado de cerca para lograr una buena cerveza. Cervezas Pálidas:25-50 mg/l, Oscuras:100-300 mg/l |
| Magnesio | Mg^{+2} | Co-factor levadura en bajo nivel. Confiere sabor ácido y amargo a la cerveza. 10-30 mg/l es ideal, >30 mg/l confiere sabor astringente |
| Calcio | Ca^{+2} | Modifica el pH y su capacidad de amortiguamiento. Entre 50-150 mg/l siendo 100 mg/l ideal |
| Sodio | Na^+ | A altas concentraciones imparte sabor ácido y salado. 10-70 mg/l nivel normal, 150 mg/l enriquece el cuerpo de la malta, >200 mg/l nivel no deseable |
| Sulfato | SO_4^{2-} | Otorga a la cerveza sabor seco y amargo 10-50 mg/l nivel normal, 100-500 mg/l aumenta el amargor |
| Cloruro | Cl^- | Otorga a la cerveza palatabilidad y sabor dulzón. <150 mg/l nivel normal |
| Potasio | K^+ | Colabora con las levaduras a baja concentración. Sabor salado sin ser ácido. |
| Nitratos | NO_3^{2-} | No afecta al sabor de la cerveza. Puede derivar en nitrosaminas en presencia de levaduras |

Malta: Es base de la cerveza, ya que aporta los azúcares necesarios en la fermentación y es el agente principal que le brinda color y en menor medida, sabor, aroma y cuerpo. Algunas solo llevan en su elaboración un solo tipo de malta, pero la mayoría utiliza 2 o 3 tipos diferentes en simultáneo, a veces más. Las proteínas de sus granos dan

estructura a la espuma, mientras que los minerales que contiene proporcionan muchos de los nutrientes esenciales que necesita la levadura para desarrollarse.



Figura 2.1: Imagen modo ilustrativo de los granos de cebada malteados

La malta está compuesta por granos de cereal con alto contenido en almidón, suele ser en su mayoría de cebada (puede incluir otros tipos cereales, tales como trigo o centeno), que han pasado por un proceso de malteado. Dicho proceso se basa en la germinación controlada de los granos y su posterior secado/tostado. El malteado activa las enzimas diastáticas, quienes se encargan en el proceso de fabricación de la cerveza, de convertir los almidones en azúcares fermentables. La duración de la germinación y la temperatura en el secado son factores que definen el color y aroma de los granos que luego impactarán en el tipo de cerveza obtenida (Gupta, 2010).

Lúpulo: Es una planta perenne que en su madurez puede tener unos 5 a 8 metros de largo y su flor se recolecta y seca para luego ser utilizada en la fabricación de la cerveza. Estas flores, están compuestas por brácteas verdes y finas que poseen en su base glándulas de lupulina con alto contenido de alfa-ácidos responsables del amargor y aceites esenciales que influyen en el sabor y aroma floral de la cerveza. Suelen comercializarse en forma de “pellets” y para lograr dicho formato, las flores de lúpulo se rallan, comprimen y se moldean los lúpulos secos luego de su cosecha.

Los lúpulos otorgan a la cerveza el amargor para equilibrar la dulzura de los azúcares de la malta, así como sabores, aromas, resinas que incrementan la retención de espuma y antisépticos que retardan su degradación. Los lúpulos se suelen añadir en el proceso de cocción, aunque también es posible añadirlos en etapas previas o posteriores al hervido dependiendo si se desea proporcionar amargor por encima de sabor y aroma o viceversa.



Figura 2.2: Imagen a modo ilustrativo de las hojas y flor del lúpulo

Levadura: La *Saccharomyces cerevisiae* es el tipo de levadura utilizado en la elaboración de la cerveza y destaca por su capacidad de crecer y reproducirse con y sin oxígeno a través de la gemación (forma de reproducción asexual). Este microorganismo heterótrofo anaerobio facultativo, se nutre de los azúcares fermentables de la malta produciendo como subproductos alcohol y dióxido de carbono en condiciones de anaerobiosis. En caso de presencia del oxígeno en el mosto, la levadura lo consume para multiplicarse y producir pequeñas cantidades de agua.

Este proceso debe ser controlado ya que la levadura también puede producir subproductos que afectan negativamente al sabor y al aroma final de la cerveza, como los fenoles, los ácidos o los ésteres (en función de la temperatura, el estilo de cerveza y el estrés de la levadura, los ésteres serán positivos o negativos).



Figura 2.3: Imagen a modo ilustrativo de la levadura comercial

Hay dos tipos de levaduras principales en la elaboración de cerveza que se suelen relacionar con su tendencia de formar grumos o flocular en la parte superior o la parte inferior del fermentador antes de finalizar la fermentación: tipo Ale o de alta fermentación utiliza la levadura *Saccharomyces cerevisiae* que flota en la superficie del líquido, mientras que el tipo Lager o de baja fermentación utiliza fundamentalmente levadura del género *Saccharomyces carlsbergensis* que se deposita en el fondo del fermentador tras la fermentación. Ambos tipos tienen diferentes características que afectan al sabor, el aroma y la sensación en la boca de la cerveza terminada.

2.1.2 Etapas del proceso

El proceso general de la elaboración de la cerveza comienza con: (a) la germinación de los granos de cebada y su posterior tostado para producir la malta. Esto puede ocurrir en el mismo recinto o bien, en la mayoría de los casos, la malta se produce en malterías y llega como materia prima semielaborada a las cervecerías. (b) La trituración de la cebada malteada para obtener una harina gruesa a la cual se añade agua caliente para formar una masa y estimular las enzimas de la malta. Este extracto acuoso, denominado mosto, se separa del bagazo, es decir la fase más sólida de la masa, mediante una filtración. (c) Una vez extraído el mosto, se le añade el lúpulo y se realiza la cocción que detiene la acción enzimática, esteriliza el mosto y coagula ciertas proteínas. Luego, el mosto se clarifica, enfría y airea para favorecer el crecimiento de las levaduras y del proceso de fermentación. (d) En la fermentación gran parte de los hidratos de carbono se metabolizan en alcohol y CO_2 mientras que otros metabolitos confieren aroma y sabor. A continuación la cerveza se deja madurar en tanques a baja temperatura, y se deja sedimentar la suspensión, para separar las sustancias que de otro modo enturbiarían la cerveza. (e) Por

último se procede a carbonatar, es decir inyectar el CO₂ faltante para alcanzar los estándares establecidos, pasteurización y envasado, cuyo orden depende del tipo de envase utilizado.

El diagrama general productivo se presenta a continuación en la **Figura 2.4**:

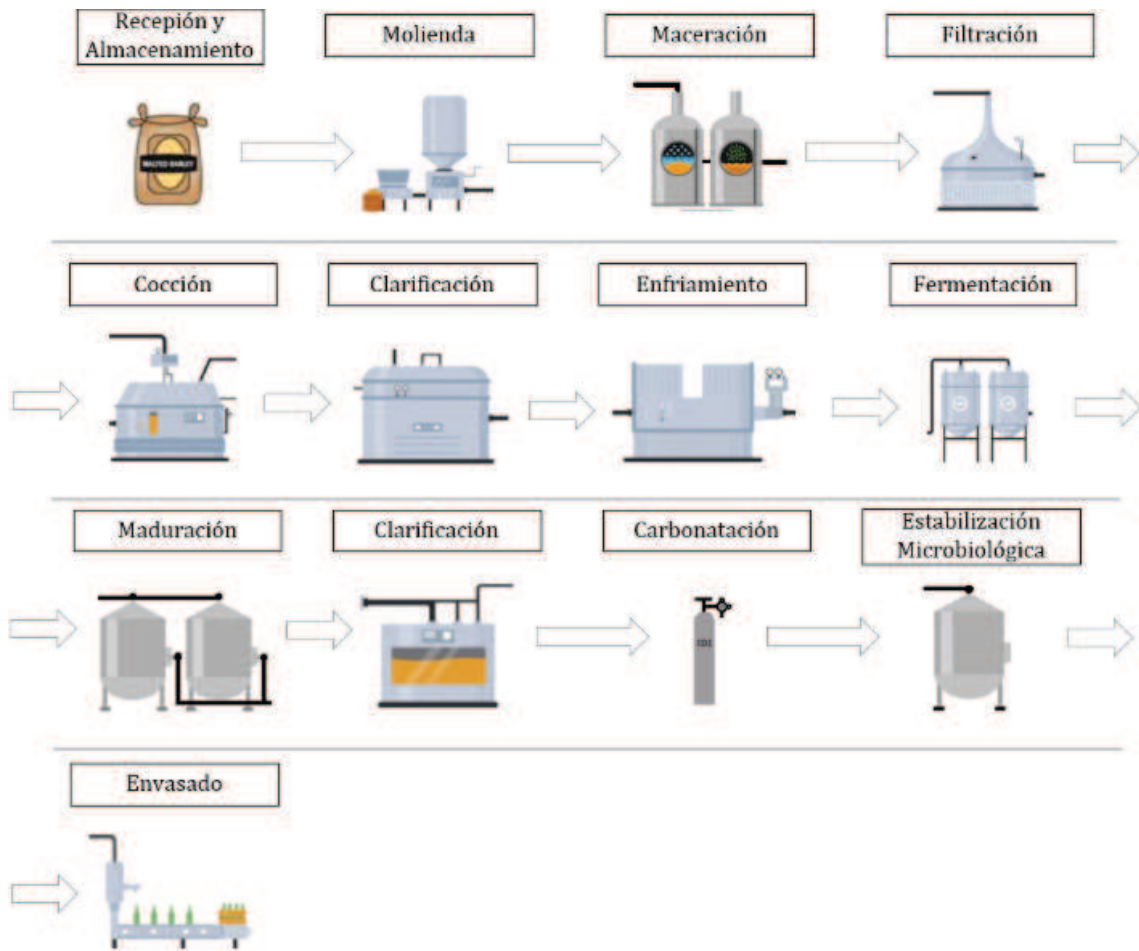


Figura 2.4: Diagrama general elaboración de cerveza. Fuente: Elaboración propia

El sistema analizado por este proyecto abarcará desde la etapa de recepción y almacenamiento de la malta, hasta la etapa de envasado y la limpieza de los equipos e instalaciones. A continuación, se detallará en qué consiste cada parte del proceso, desglosando cada una de ellas en subetapas:

- **Recepción y Almacenamiento**

Para fabricar la cerveza se utilizan las 4 materias primas fundamentales mencionadas anteriormente (agua, malta, lúpulo y levadura) y en ocasiones adjuntos (arroz, maíz, azúcares, miel, entre otros). La malta proveniente de las malterías se recibe a granel, se pesa y se almacena en bolsas o se coloca en silos donde se descarga. El agua debe ser

estandarizada para evitar variaciones de sabor y características de la cerveza y si es necesario hacerla pasar por un proceso fisicoquímico hasta alcanzar las condiciones deseadas. Las levaduras se preparan en laboratorios a partir de cepas preseleccionadas de las propias fábricas en el caso de las grandes compañías, o adquirida en polvo para el caso de las industrias con menor caudal productivo. El lúpulo se comercializa y se adquiere en forma de inflorescencias femeninas denominadas conos, o en polvos, pellets o extractos.

- **Molienda**

Este paso tiene por objetivo triturar la malta para lograr el tamaño de partícula adecuado y aumentar la superficie del grano expuesta al agua durante la maceración. Esto maximiza la reacción enzimática sobre el almidón.

Luego del macerado, para separar la fracción sólida de la solución azucarada se realiza un recirculado de la fracción líquida en el macerador. Esto provoca que el grano usado se acumule en el fondo y forme una capa compacta. Es importante por ello, que la cascarilla permanezca lo más entera posible para funcionar como un filtro natural eficaz. Debido a esto, la finura de la molienda y el equipo están determinados directamente por el equipamiento utilizado en el posterior filtrado, ya que si el lecho es profundo, requiere generalmente partículas más groseras y la composición de granos utilizados.



Figura 2.5: Imagen a modo ilustrativo de sistemas de molienda.

- **Maceración**

En la maceración, los cereales molidos se introducen en una cuba y se les añade agua previamente acidificada a un pH 5,5. La cantidad de agua agregada se basa en una relación 3:1 (3 kilogramos de agua cada 1 kg de granos molidos) y se lo deja macerar durante una a dos horas. Esta mixtura se mezcla hasta conformar una pasta consistente.

El agua se agrega a una velocidad adecuada y diversos periodos de estabilización, a unos 70°C, para que en contacto con el grano no supere los 65°C y así alcanzar la temperatura óptima para la activación enzimática. Las enzimas transforman el almidón presente en la mezcla en azúcares fermentables y las proteínas de los péptidos en

aminoácidos, que son fundamentales para proveer el nitrógeno necesario para la fermentación (AINIA, 2000). Durante el macerado, alrededor del 80% de la masa de la malta es solubilizada, permaneciendo en el fondo las fracciones insolubles.

En esta fase también se pueden añadir los adjuntos, a fin de aumentar el porcentaje de almidón, así como también enzimas adicionales para acelerar el proceso. Al final del macerado, la mezcla se somete a una filtración.

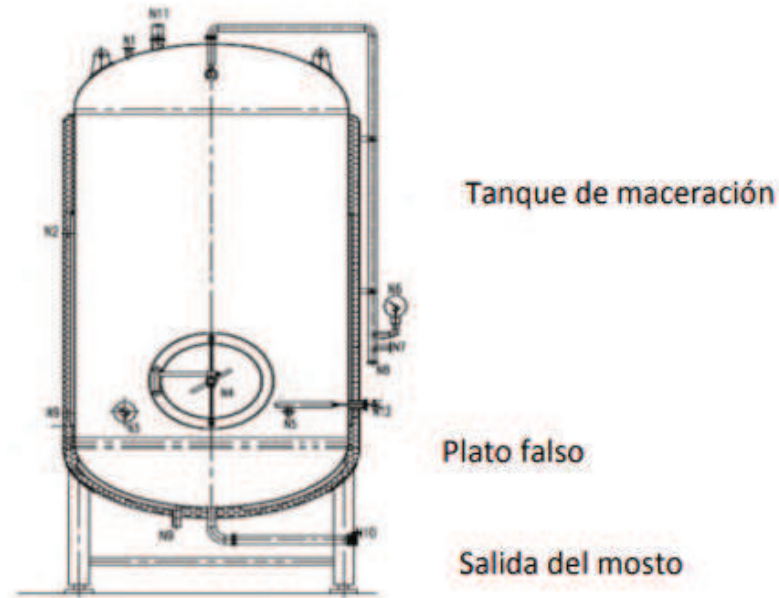


Figura 2.6: Esquema de una tanque de maceración industrial.

- **Filtración**

Este paso ayuda a deshacerse de las harinas y de los restos sólidos del grano, así como también disolver parte del azúcar que resta en la malta. Se recircula el mosto en la olla de maceración que posee un fondo o plato falso (**Figura 2.6**) o a través de un filtro prensa, y a medida que recircula, la propia cáscara del grano actúa como filtro. Es importante que el mosto caiga en la parte superior en forma de aspersion para no romper la cama de granos o generar canales de circulación a través de ésta.

El proceso se repite hasta que el mosto que sale por la parte inferior es cristalino y el sólido remanente de la filtración (bagazo) es separado como subproducto y no cumple ningún otro propósito durante el proceso de producción de cerveza.

- **Cocción**

El líquido obtenido por la filtración del macerado se introduce en una caldera donde se calienta junto con el lúpulo hasta ebullición durante una y dos horas a presión

atmosférica. El lúpulo agregado es principalmente para aportar amargor, pero también, para aportar aromas y sabores característicos según en que instancia del hervor se agregue.

El objetivo de esta etapa es esterilizar los agentes patógenos, detener toda actividad enzimática remanente, disminuir la turbidez, aumentar la concentración de azúcares, coagular los taninos extraídos (producto indeseado en la cerveza), aportar sabor amargo al mosto e intensificar su color (Briggs, 2004).

- **Clarificación**

Durante la cocción, las proteínas sensibles al calor precipitan, conformando un turbio caliente denominado “hot trub”, que es necesario eliminar. Para ello se realiza un centrifugado especial en depósitos denominados Whirlpool, que deposita las partículas y sólidos del mosto en la zona central de dichos tanques, permitiendo su separación.

Algunas cervecerías optan por no utilizar el centrifugado y reemplazarlo utilizando sustancias clarificantes naturales, una vez finalizada la cocción, para reducir los costos. Entre ellos comúnmente se utiliza “Irish Moss”, conocido también como musgo irlandés, u otros compuestos como gelatina, cola de pescado, gel de sílice, entre otros.

- **Enfriamiento**

El enfriamiento se lleva a cabo mediante un intercambiador de calor bajando la temperatura de 98°C a aproximadamente 8°C en menos de 30 minutos (AINIA, 2003). El objetivo de esta etapa es eliminar las bacterias indeseadas remanentes a través de un cambio brusco de temperatura y alcanzar una temperatura donde puede inocularse la levadura de forma segura para la cepa.

Existen distintos sistemas de enfriamiento, siendo el más utilizado el serpentín de acero inoxidable (**Figura 2.7**) a través del cual se hace circular una corriente de agua fría, o en el caso de grandes empresas, nitrógeno líquido. Otras alternativas utilizadas son tanques con camisa, circulado con agua contracorriente y enfriadores de placas.

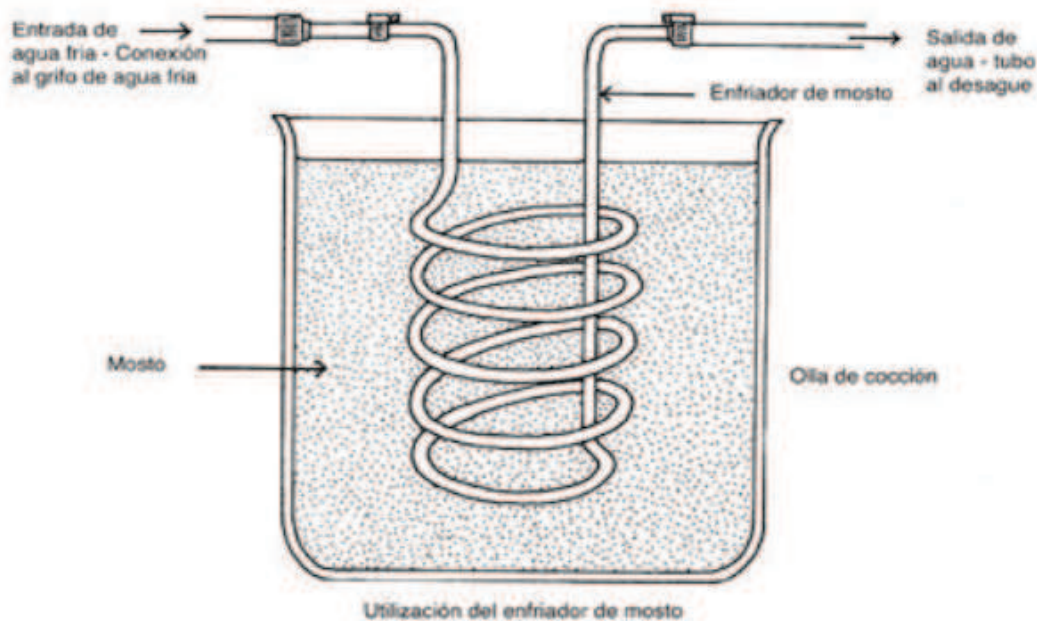
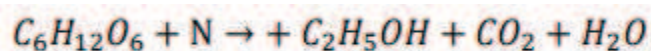


Figura 2.7: Esquema general del sistema de refrigeración del mosto.

- **Fermentación**

El mosto enfriado es apto para comenzar la etapa de la fermentación. Para ello se inyecta a la mezcla aire estéril hasta alcanzar aproximadamente 8 ppm de O₂ (AINIA, 2003) y se agrega la levadura por encima del mosto. Una vez alcanzado el nivel deseado, se tapa el fermentador y se coloca la esclusa de aire, comúnmente denominada “airlock” para permitir la salida del CO₂ producido e impedir el ingreso de aire y cualquier producto contaminante hacia dentro del fermentador.

Las levaduras crecen hasta agotar el oxígeno presente en su fase inicial y comienzan a fermentar los azúcares convirtiéndolos en alcohol y dióxido de carbono (CO₂). La fermentación en sí, es un proceso complejo donde ocurren, aproximadamente, 2000 reacciones químicas. La reacción básica (simplificada) que ocurre en condiciones anaeróbicas es la siguiente:



Dado que es una reacción exotérmica, los depósitos de fermentación se refrigeran para mantener la temperatura adecuada. Dependiendo del estilo de cerveza, el rango de temperatura y el tiempo de fermentación varía, siendo para cervezas tipo Ale, entre 18 a 22°C durante 4-5 días y cervezas tipo Lager, entre 7 a 13 °C durante 7-8 días (Colignon, 2018)

De forma variada, las características comunes con las que cuenta un fermentador son que posea un fondo plano, una salida para extracción de la cerveza y alguna forma de refrigeración para mantener la temperatura (**Figura 2.8**).

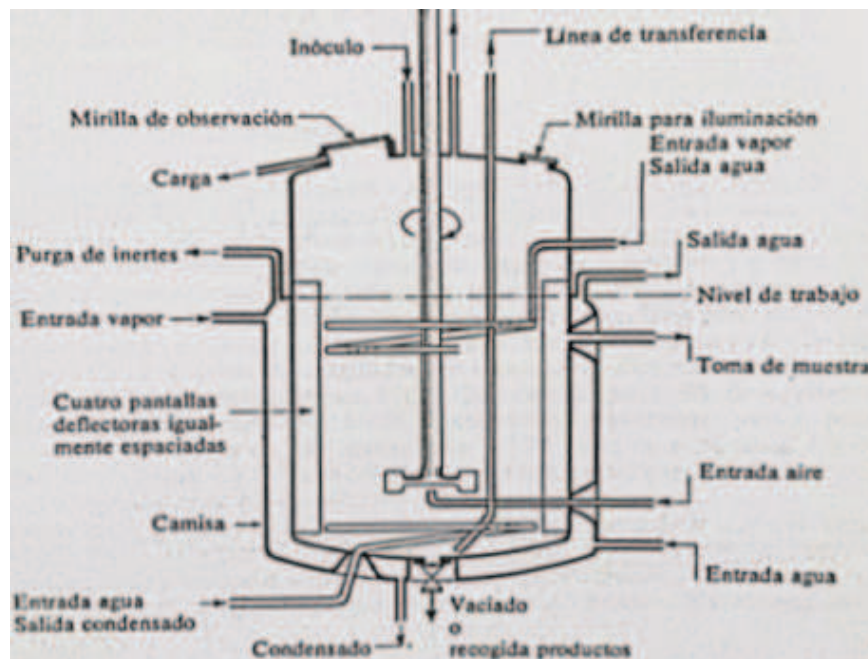


Figura 2.8: Esquema general de las partes que componen el fermentador.

Una vez finalizada la fermentación, se deja sedimentar las levaduras y se las recoje para futuras utilidades. Aproximadamente una cuarta parte de la levadura generada por el proceso se guarda para sucesivos procesos y el resto se elimina como residuo.

La cerveza producto de la fermentación se la denomina cerveza “verde” o inmadura ya que sus concentración de dióxido de carbono disuelto es baja y su color, sabor y aroma son de una calidad menor a la esperada en el producto final. Para mejorar dichos aspectos se la deja reposar en tanques hasta alcanzar la calidad requerida.

- **Maduración**

El propósito de la maduración es mantener la cerveza en reposo, a bajas temperaturas (0-2 °C comúnmente) con el fin de mejorar las condiciones organolépticas de la misma antes del proceso de envasado o después del mismo si se utilizan barriles como envases.

La levadura reduce lentamente las azúcares remanentes y también otros subproductos de la fermentación como cetonas, compuestos azufrados, aldehídos y ácidos grasos volátiles, que impactan negativamente sobre las propiedades de la cerveza (Briggs et al., 2004). A su vez se genera más CO₂ aportando a la carbonatación de la cerveza y precipitan sustancias aportando a la claridad de la cerveza. Este paso puede durar de 2 semanas a 6 meses posteriores a la fermentación. Sin embargo, debido a los costos

asociados a almacenar la cerveza refrigerada por tiempos prolongados, muchas empresas optan por omitir o acortar este paso.

- **Clarificación**

La cerveza madura se puede centrifugar antes del filtrado para eliminar la levadura restante y los precipitados y así alcanzar un estándar aceptable para su comercialización. Este paso busca remover toda la levadura remanente y los precipitados conformados por proteínas y otras sustancias.

Este paso se realiza a bajas temperaturas para evitar la re-solubilización de algunos precipitados y también es importante evitar la incorporación de oxígeno ya que éste disminuye la vida útil del producto. Para ello se purgan de aire utilizando CO₂ las tuberías y accesorios por donde circulará la cerveza (Briggs et al., 2004).

Para la filtración se utilizan comúnmente filtros de tierra de diatomeas o filtros de placas. Sin embargo, en las microcervecías, por una cuestión de costos e inversión, muchas veces omiten esta etapa con cierto perjuicio del producto final.

- **Carbonatación**

El CO₂ se produce de forma natural durante la fermentación. Sin embargo su concentración final no es suficiente, por lo que se recurre a una carbonatación forzada, inyectando artificialmente CO₂ en el fermentador/tanque de maduración o, en algunos casos, directamente en los barriles de envasado, para lograr la concentración de gas disuelto deseada.

- **Estabilización microbiológica**

Para alargar y garantizar manteniendo las propiedades del producto por lapsos razonablemente largos, se puede optar por estabilizar microbiológicamente la cerveza. Dicha estabilización se realiza mediante pasteurización en tanques o a través de tecnologías de membrana que permiten la desinfección sin necesidad de aplicar calor. También se puede optar por realizar la pasteurización posteriormente al envasado, donde las botellas se someten a baños o duchas a distintas temperaturas, hasta que la cerveza alcance la temperatura de pasteurización.

- **Acondicionamiento de envases y envasado**

Los barriles, botellas o latas vacías pasan previamente por ciclos de lavado antes de su uso, utilizando agua caliente a presión, en algunos casos detergente y/o sosa y finalmente se esteriliza con vapor.

Al igual que en el lavado, las líneas de envasado son varían según el tipo de envase, utilizando diversos dispositivos como desempacadora, llenadoras taponadora, pasteurizador, paletizadora para el caso de las botellas, lavadora exterior, pasteurizadora, lavadora-llenadora, pesadora, volteadora, etiquetadora y paletizadora para el caso de los barriles. El grado de automatización depende del tamaño y grado de inversión de la

industria, donde comúnmente los pequeños productores de cerveza artesanal realizan este proceso de forma más manual.

- **Limpieza**

Como se mencionó anteriormente, durante el proceso de elaboración de la cerveza se producen distintos precipitados, conformados tanto por sales como compuestos orgánicos y adherencias de los mismos a las superficies de los equipos: depósitos, cañerías y otras piezas que, durante el proceso, se encuentran en contacto con el mosto y la cerveza, en especial aquellas superficies que realizan transferencias de calor.

Estos restos están conformados principalmente por sales de calcio y magnesio, proteínas desnaturalizadas y levaduras. Por lo tanto, es importante realizar limpiezas periódicas en dichos equipos para impedir el desarrollo de microorganismos contaminantes que puedan afectar al proceso productivo.

De igual modo la limpieza de las instalaciones es de vital importancia debido a que se trata de un insumo alimenticio. La limpieza debe ser minuciosa y frecuente, y es fundamental que se mantengan los niveles de higiene mínimos exigibles. Para ello conviene programar un protocolo de limpieza, utilizando la tecnología adecuada para garantizar su eficacia.

2.2 Generación de residuos y contaminación durante del proceso productivo

La industria cervecera posee un alto consumo de agua y energía, varios tipos de efluentes, subproductos y residuos sólidos, que a pesar de los avances técnicos y tecnológicos en el sector, continúan siendo una problemática de interés. El consumo de agua y el volumen de los efluentes líquidos pueden ser optimizados con buenas prácticas y mejoras en la tecnología utilizada, al igual que el consumo de energía. No ocurre lo mismo con los principales subproductos sólidos: bagazo, extractos de levadura, lodos y sedimentos. Su cantidad es proporcional al volumen producido, y no puede ser reducida, debido a que las etapas de su generación son indispensables para el proceso, por lo que su tratamiento y/o revaloración requiere soluciones específicas.

En este apartado se analizan los efectos medioambientales en cada una de las etapas del proceso productivo estudiado. Los principales efectos y consumos de una industria cervecera artesanal de esas características pueden observarse en el diagrama (**Figura 2.9**) esbozado a continuación:

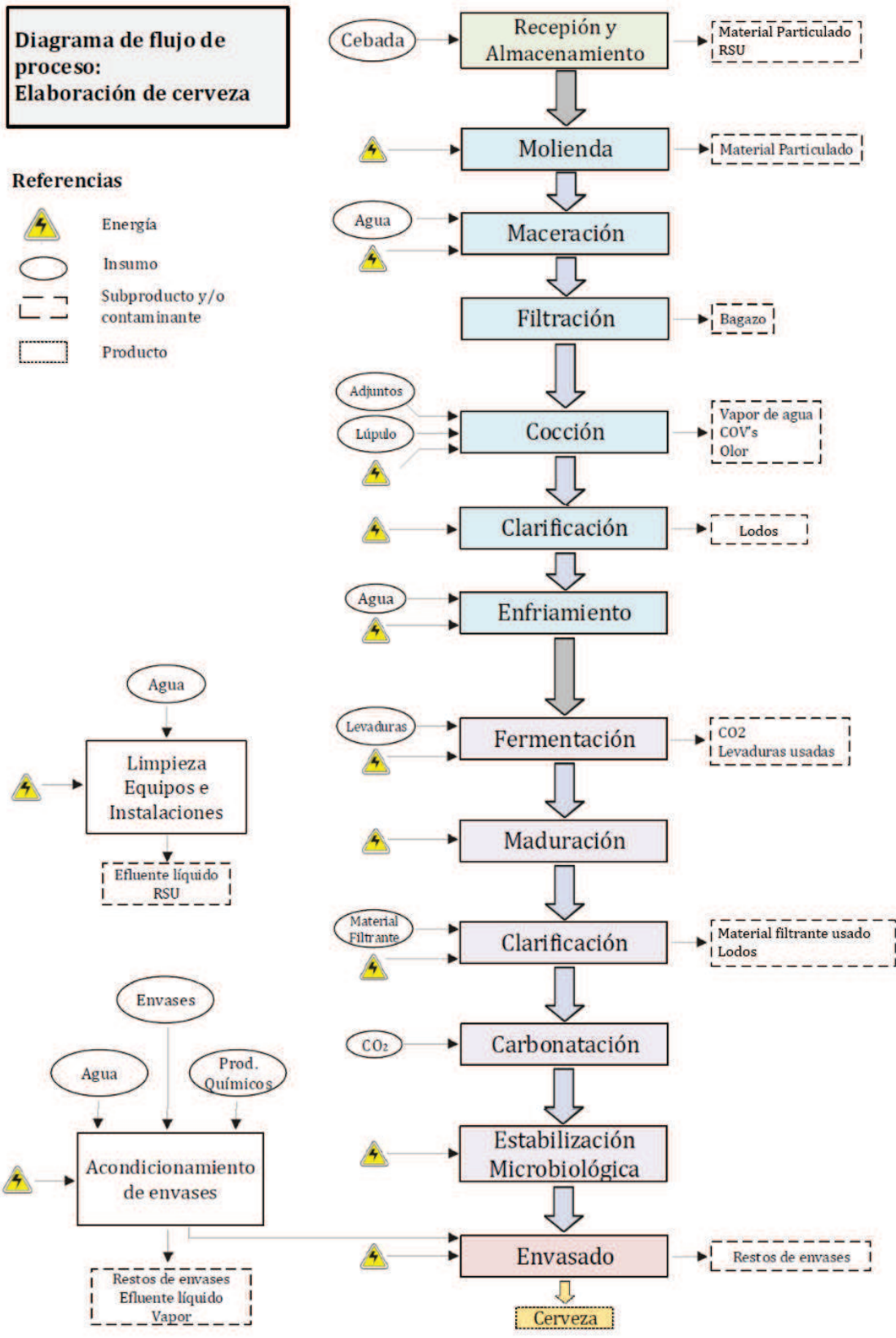


Figura 2.9: Diagrama de flujo del proceso general de elaboración de la cerveza y principales contaminantes. Fuente: Elaboración propia

2.2.1 Residuos sólidos

La mayoría de los residuos generados durante la elaboración de la cerveza y en la limpieza de los equipos y instalaciones son de carácter orgánico (bagazos, lodos, material filtrante y levaduras) que pueden ser valorizados por otras industrias si se los comercializa como subproductos (agropecuaria, alimenticia, farmacia, entre otras) (AINIA, 2003). Es importante aclarar que si bien usualmente se refiere a estos como subproductos sólidos, todos poseen un alto contenido de agua, entre 80 y 90%, y son responsable de la pérdida de aproximadamente 20 L cada 100 L de agua utilizada durante la producción (Thiago et al., 2014).

Debido a su alta carga orgánica se recomienda mezclarlos lo menos posible con los efluentes líquidos y proporcionarles un destino y/o un tratamiento adecuado. También en menor medida, se generan residuos de envase (plásticos, papel, cartón, vidrio) derivado de la etapa de recepción y almacenamiento y envasado y residuos como metales, aceites usados, solventes provenientes del mantenimiento común a un proceso industrial.

A continuación se describen brevemente los principales residuos sólidos generados:

- **Bagazo**

El proceso de macerado solubiliza los azúcares y componentes solubles en agua presentes en el grano de malta. Luego de esta extracción, los granos usados y el mosto son separados y el semisólido remanente es denominado bagazo. El bagazo es el más abundante subproducto generado durante el proceso de elaboración de cerveza, correspondiendo al 85% del total de los residuos. Su generación es de aproximadamente 20 kg cada 100 litros de cerveza producida, saliendo del macerador con un 80% de contenido de humedad (Reinold, 1997 & Lima, 2010). Dependiendo de la zona y tamaño de la industria, suele comercializarse a bajo costo o sin costo como alimento suplementario animal, como fertilizante, en pocos casos como insumo en industrias alimenticias o farmacéuticas, o en caso contrario retirado por una empresa transportista para su disposición final.

La composición del bagazo varía según el tipo de cebada utilizada, el tiempo de cosecha, las condiciones de malteado y maceración y la calidad y tipo de adjuntos incluidos en el proceso (Huige, 1994), pero en general, el bagazo es un material lignocelulósico rico en proteínas y fibras (Mussatto et al., 2006). En la **Tabla 2.1** pueden observarse las propiedades físico-químicas del bagazo cervecero seco:

Tabla 2.1: Propiedades físico-químicas del bagazo cervecero en base seca. Fuente: Thiago et al., 2014.

| Parámetro | Bagazo Cervecero |
|------------------|------------------|
| Proteínas (%) | 15-26,2 |
| Fibra* (%) | 70 |
| Celulosa (%) | 15,5-25 |
| Hemicelulosa (%) | 28-35 |
| Lignina (%) | 28 |
| Lípidos (%) | 3,9-10 |
| Cenizas (%) | 2,5-4,5 |

*Fibra incluyen en su contenido a la Celulosa, Hemicelulosa y Lignina

- **Lodo “turb”**

Durante la cocción se produce la formación de un lodo conocido como “turb” originado principalmente por la coagulación de las proteínas de alto peso molecular presentes en el mosto debido a las altas temperaturas. También incluye la presencia de complejos, altas concentraciones del catión Ca^{+2} y los compuestos insolubles producto de la cocción del lúpulo. Se forman aproximadamente entre 0,2-0,4 kg de turb al 80-90% humedad cada 100 litros de cerveza producida (80-90% humedad) (Thiago et al., 2014).

Una vez terminada la etapa de hervor, el mosto se separa de este residuo debido a que en caso contrario provocaría deposiciones en las tuberías y equipos, cambios en el pH y sabores indeseados (**Tabla 2.2**).

Tabla 2.2: Composición general de lodos “turb” en base seca. Fuente: Thiago et al., 2014.

| Parámetro | Lodo "turb" |
|------------------------------|-------------|
| Proteínas (%) | 50 - 70 |
| Sustancias no isomeradas (%) | 10 - 20 |
| Polifenoles (%) | 5 - 10 |
| Carbohidratos (%) | 4 - 8 |
| Minerales (%) | 3-5 |
| Ácidos grasos (%) | 1-2 |

- **Levaduras**

Las levaduras aumentan su masa entre 3-5 veces durante el proceso, por lo que los fondos de los tanques de maduración y fermentación constituyen otra fuente de lodos. En el tanque fermentador es donde el 90% de la materia fermentable es consumida y el

rápido enfriado posterior detiene dicha fermentación, causando a su vez, la floculación de las partículas insolubles y su sedimentación con las levaduras (Fillaudeau, 2006).

El fondo del tanque queda entonces lleno de levadura y “cerveza verde”. La pérdida de cerveza que se separa junto con los extractos de levadura es alrededor del 1-2 % de la producción (Nielsen 1989). Parte de la levadura es recolectada para su reutilización, y el lodo con la levadura restante, posee una concentración cercana al 10% m/m (Fillaudeau, 2006) y aproximadamente 0,64 kg de extracto de levadura cada 100 litros de cerveza producida (AINIA, 2003). Este lodo se comercializa de manera similar o en conjunto con el bagazo, o se disponen a través de una empresa transportista (**Tabla 2.3**).

Tabla 2.3: Composición general de extracto de levaduras en base seca. Fuente: Thiago et al., 2014.

| Parámetro | Extracto de levaduras |
|-------------------|------------------------------|
| Proteínas (%) | 35-60 |
| Carbohidratos (%) | 35-45 |
| Minerales (%) | 5-7,5 |
| Lípidos (%) | 4-6 |

- **Material filtrante**

El lodo generado por la tierra de diatomeas tiene varias ventajas para el proceso de filtración utilizado en la elaboración de la cerveza. Su uso viene siendo una práctica industrial hace más de 100 años en los procesos de elaboración de vino, cerveza, jugos y licores (Fillaudeau, 2006). La filtración convencional “dead-end” consume una gran cantidad de tierra de diatomeas, entre 1-2 g /l de cerveza producida (Fisher, 1992) y al finalizar el proceso, el lodo conformado por la tierra de diatomeas, agua y compuestos orgánicos, supera el triple del peso inicial (Fillaudeau, 2006).

La tierra de diatomeas es un material rico en silicatos provenientes de fósiles de algas prehistóricas (diatomeas). Estas presentan una gran superficie de área debido a su alta porosidad actuando como un gran agente de filtración siendo especialmente efectiva en la retención de materia orgánica como levaduras, proteínas y polifenoles (Thiago et al., 2014). Sin embargo, debido a los riesgos asociados a la salud por los polvos con silicatos, la legislación Argentina define la tierra de diatomeas como un residuo peligroso, por lo que su tratamiento y/o disposición adecuada implican costos adicionales.

2.2.2 Efluentes líquidos

En la industria cervecera se genera un gran volumen de aguas residuales, la mayor parte debido a las operaciones de limpieza. El vertido de aguas residuales puede representar entre el 65-80% del total del agua consumida (AINIA, 2003). La composición

depende del grado de mezcla con los lodos extraídos, el tipo y calidad de filtros utilizados durante el proceso y cuanta cerveza residual ingresa como efluente. Sin embargo generalmente estas aguas presentan una carga orgánica elevada y muy biodegradable, sólidos en suspensión y el agregado de los compuestos químicos utilizados para limpiar los equipos, instalaciones y envases (detergentes, sosa, ácido clorhídrico) que suelen aportar un pH altamente alcalino.

En la **Tabla 2.4** se observa la composición general de las aguas residuales de la industria cervecera:

Tabla 2.4: Composición de aguas residuales de la industria cervecera. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos proporcionados por los autores..

| Parámetro | Aguas Residuales cervecería | | | | |
|---------------------------------|-----------------------------|-----------|--------------------|----------------------|------------------|
| | Autor | RAO, 2007 | Enitan et al, 2015 | Parawira et al, 2005 | Ahn et all, 2010 |
| pH | | 3-12 | 4,6-7,3 | 3,3-6,3 | 6,3-6,9 |
| Temperatura (°C) | | 18-40 | 24-30,5 | 25-35 | - |
| DQO (mgO ₂ /L) | | 2000-6000 | 1096-8926 | 8240 | 910-1900 |
| DBO (mgO ₂ /L) | | 1200-3600 | - | - | - |
| Relación DQO/DBO | | 1,6 | - | - | - |
| AGV's (mg/L) | | 1000-2500 | - | - | - |
| Fosfatos (mgPO ₄ /L) | | 10-50 | - | 16-124 | 8,4-17 |
| TKN (mg/L) | | 25-80 | 0-5,36 | 0,0196-0,0336 | 17-36 |
| ST (mg/L) | | 5100-8750 | 1289-12248 | 5100-8750 | 1300-2000 |
| TSS (mg/L) | | 2901-3000 | 530-3728 | 2020-5940 | 140-320 |
| TDS (mg/L) | | 2020-5940 | - | - | - |

La carga orgánica varía mucho entre las distintas fuentes de generación; mientras que la limpieza de los tanques involucrados en la elaboración del mosto, fermentación y maduración representan el mayor aporte de carga orgánica, el lavado de botellas, máquinas y planta aportan el mayor volumen de agua, con una carga orgánica mucho menor (Simate, 2011). En la siguiente **Tabla 2.5** se encuentra un estimativo del consumo específico por tipo de operación del proceso de fabricación de la cerveza, y valores aproximados de los efluentes líquidos generados.

Tabla 2.5: Consumo específico de agua y efluentes por operación productiva durante el proceso cervecero. Fuente: Olajide, 2012 & Water and Wastewater: Treatment/Volume Reduction Manual, 2013.

| Fuente | Consumo específico de agua (m ³ /hl cerveza producida) | Operación | Valores Estimados de efluente (m ³ /hl cerveza producida)** | Características Efluente |
|--------------------|---|---|--|---|
| Brewhouse* | 0,13 - 0,26 (Combinados) | Enjuague/limpieza macerador | 0,10 - 0,20 (Combinados) | Fibra, azúcares y restos de bagazo. 3 g/l SS, 10 g/l DBO |
| | | Lavado de grano gastado | | Fibra, compuestos nitrogenados. 30 g/l SS, 100 g/l DBO |
| | | Enjuague/limpieza de unidad de cocción y filtración | | Proteínas, mosto y residuos nitrogenados. 35 g/l SS, 85 g/l DBO |
| Fermentación | 0,03 - 0,08 | Enjuague/limpieza | 0,02 - 0,06 | Restos de levadura, cerveza. 6 g/l SS, 100 g/l DBO |
| Madurado | 0,01 - 0,07 | Enjuague/limpieza | 0,01 - 0,05 | Restos de levadura, cerveza. 4 g/l SS, 80 g/l DBO |
| Filtración | 0,01 - 0,12 | Limpieza, inicio, fin y pérdidas | 0,01 - 0,09 | Restos de levadura, proteínas y cerveza. 60 g/l SS, 135 g/l DBO |
| Embotellado | 0,06 - 0,16 | Descargas durante la operación | 0,05 - 0,12 | pH altos, valores bajos de SS y DBO |
| Embarrilado | 0,01 - 0,12 | Descargas durante la operación | 0,01 - 0,09 | 0,4 g/l SS y DBO |
| Operaciones Varias | 0,03-0,40 | - | 0,02 - 0,30 | - |
| Total | 0,4 - 1,3 | | 0,3 - 1,0 | |

*Compuesta por las etapas de maceración, cocción y filtración. ** Basado en las estimaciones de Water and Wastewater: Treatment/Volume Reduction Manual, 2013

Las características de aguas residuales generadas por la industria cervecera hacen necesario su tratamiento previo al vertido en la red de alcantarillado o cauces naturales.

2.2.3 Emisiones a la atmósfera

Los gases emitidos por el proceso de elaboración cervecera son gases productos de la combustión (CO₂, NO_x, SO_x, material particulado), el polvo producido durante la recepción y manipulación del grano de malta, el vapor de agua y VOCs producto de la etapa de cocción y CO₂ y VOCs generados durante la fermentación y maduración (AINIA, 2003).

2.2.4 Olores

Los olores característicos de las cervecerías se producen en las etapas de cocción y fermentación, o en caso de existir, en la planta depuradora de aguas residuales. También los residuos sólidos orgánicos generados (bagazo, levaduras, lodos) pueden generar olores si su almacenamiento previo a la disposición o tratamiento no es el adecuado.

2.2.5 Consumo de agua

Las industrias cerveceras consumen grandes volúmenes de agua, siendo el ingrediente mayoritario que incorpora el producto donde el 95% del peso de la cerveza es agua que se añade durante el proceso de elaboración (AINIA, 2003). El rango de consumo específico suele oscilar entre 4 a 11 L agua/L cerveza, siendo el promedio de consumo entre 5 a 6 L agua/L cerveza en la producción industrial (Perry, 2003) donde, en la elaboración de cerveza artesanal, es esperable que estos valores sean superiores debido a la menor inversión y escala utilizada en su producción. El consumo de agua se divide aproximadamente en $\frac{2}{3}$ utilizados durante el proceso y el tercio restante en las operaciones de limpieza (Moll, 1991).

2.2.6 Consumo de energía

Los consumos energéticos durante el proceso productivo se deben principalmente a las etapas de macerado, cocción, enfriamiento, fermentación, maduración, pasteurización, y en algunos casos con mayor grado de automatización, durante el proceso de envasado.

Según Conduah (2019), a nivel industrial, el consumo aproximado de energía es de 43 kWh por hectolitro de cerveza producida, a lo que se agrega al consumo piso mínimo de 8250 kWh mensual propio de los equipos e instalaciones industriales requeridos, por lo que se estima que el requerimiento de energía en las microcervecías sea significativamente superior. En su auditoría en una cervecía artesanal ubicada en Bloemfontein, Sudáfrica, el consumo por hl de cerveza es de 65 kWh de energía, siendo el 5,2% del costo total de producción.

En la **Tabla 2.6** puede observarse a modo de ejemplo el consumo energético por cada bach productivo de 800 l de cerveza de la microcervecía auditada por Conduah y los porcentajes de energía requerida por cada etapa:

Tabla 2.6: Resultados de la auditoría de la microcervecía ubicada en Bloemfontein, Sudáfrica. Fuente: Conduah, 2019

| Proceso | Duración del proceso (hs) | Consumo de energía (kWh) | Porcentaje (%) |
|------------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------|
| Calentamiento de agua (85°C) | 7 | 83 | 16.0 |
| Macerado (65-78°C) | 3 | 25.7 | 5.0 |
| Cocción (97°C) | 1.67 | 60 | 11.6 |
| Enfriamiento (a 18°C) | 1.3 | 1.8 | 0.3 |
| Fermentación (18°C) | 336 | 31.9 | 6.2 |
| Maduración (0°C) | >4360 | 304.7 | 58.8 |
| Envasado (0-18°C) | 4 | 11.12 | 2.1 |

Aproximadamente el 80% de la energía utilizada por las cervecías se debe a procesos térmicos, estos incluyen los sistemas de calentamiento y refrigeración para incrementar o disminuir la temperatura del agua, el mosto y la cerveza (Nassary, 2019).

Usualmente la refrigeración implica el mayor consumo eléctrico, especialmente debido a la etapa de maduración, mientras que el macerado y cocción consumen la mayor parte del gas natural utilizado para generar calor (Energy Usage, GHG Reduction, Efficiency and Load Management Manual, 2015). Abajo se encuentran los porcentajes utilizados para cada tipo de energía (**Figura 2.10**).

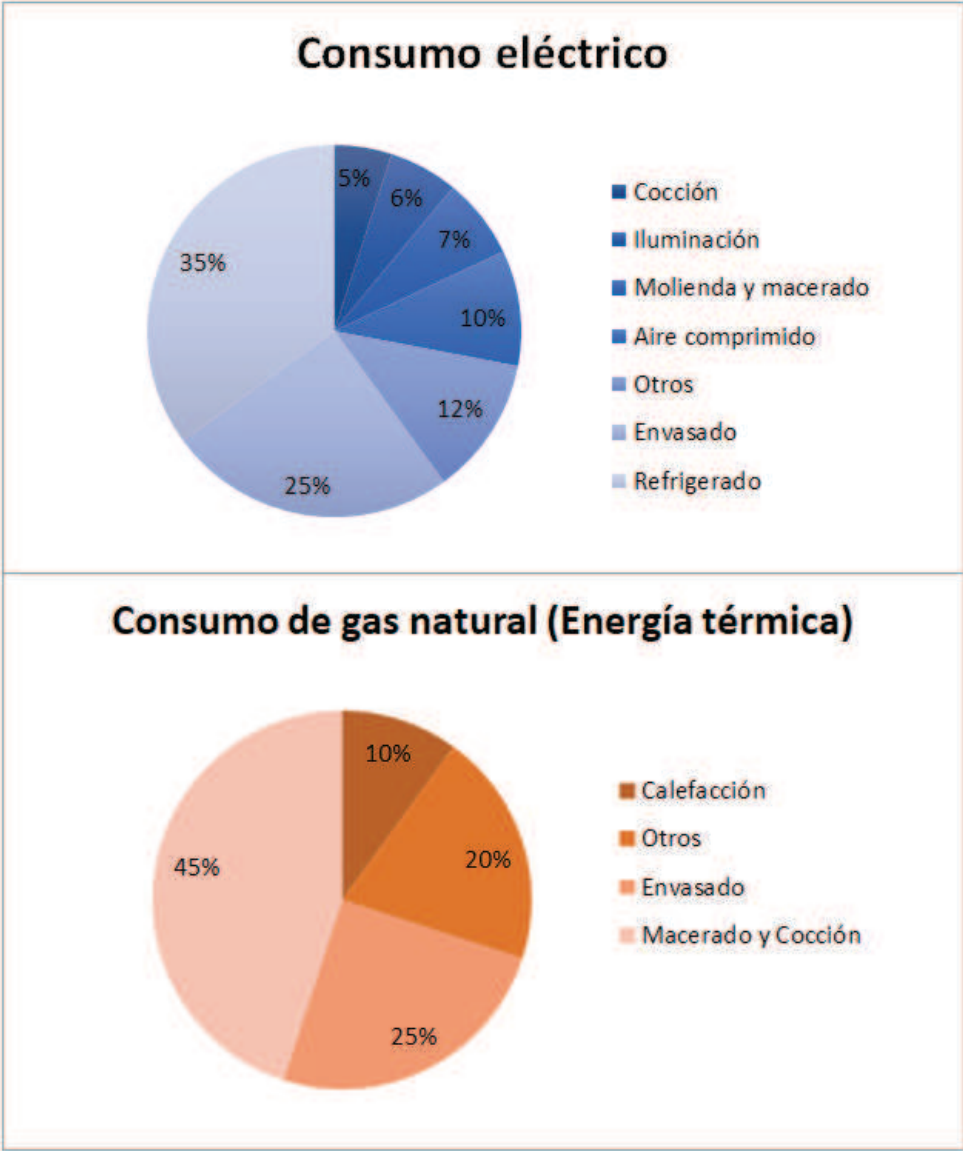


Figura 2.10: Porcentajes del consumo general de energía eléctrica y térmica. Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos de Energy Usage, GHG Reduction, Efficiency and Load Management Manual, 2015.

El uso de energía depende mucho del tamaño de la cervecería, localización y producto, los distintos autores suelen divergir en los rangos establecidos. Esto puede deberse a que dichos valores están sujetos a su vez a la potencia administrada, tipo y grado de optimización del proceso, equipo utilizados y la eficiencia de ellos (**Tabla 2.7**).

Tabla 2.7: Rangos de consumo de energía para cervecerías según distintos autores

| Rangos de consumo de energía en cervecerías | | | |
|--|-----------------------------|-------------------------------|---|
| Eléctrico (kWh/hl) | Térmico (kWh/hl) | Combinado (kWh/hl) | Referencia |
| 22-40 | 68-80 | 90-120 | Energy Usage, GHG Reduction, 2018. "Efficiency and Load Management Manual" |
| 7,5-11,5 | 23,6-33 | 31-44,5 | Funk, 2008. "Efficient Use of Energy in the Brewhouse" |
| - | - | 65 | Conduah, 2019. "Energy Efficiency Improvements in a Microbrewery in South Africa" |

CAPÍTULO 3

Relevamiento de información

3.1 Bagazo: subproducto

El grano de malta usado o bagazo, está compuesto por las capas que cubren el grano de malta y es el primer residuo sólido orgánico generado a través del proceso. Proviene del macerado donde se agotan los granos de malta molidos extrayéndoles todos los compuestos solubles que constituyen el mosto. En esta etapa el bagazo es formado, utilizado como filtrante y retirado.

Este residuo corresponde cerca del 85% del total de residuos generados durante el proceso de elaboración de cerveza (Lima, 2010) compuesto principalmente por fibras y proteínas presenta un gran valor nutricional. Debido a su alto contenido de humedad y presencia de azúcares residuales fermentables, tiende a comenzar su descomposición rápidamente, liberando olores y lixiviados molestos. A su vez puede volverse contaminante en contacto con agua debido a su alta carga orgánica y su transporte y disposición suelen ser de un elevado costo. Por ello, el aprovechamiento de este subproducto es el primer paso para reducir los gastos y mejorar la calidad ambiental del proceso.

3.1.1 Características fisicoquímicas del bagazo

El bagazo es un subproducto que capta el interés para su aprovechamiento debido a su valor nutricional y su volumen de generación, constante a lo largo del año, con bajo o nulo costo de adquisición (Aliyu and Bala, 2011). Normalmente, cada 100 kg de granos de malta procesados se generan entre 125 a 130 kg de bagazo húmedo, con un contenido entre el 80 y 85 % de humedad al utilizar tanques de filtrado, o 50 a 55 % de humedad utilizando un filtro prensa (Thiago et al., 2014) y una temperatura inicial, al salir del macerador, entre 65 a 80 °C.

La cantidad neta generada oscila entre 14 a 20 kg de bagazo por cada hectolitro de cerveza producido (Fillaudeau et al., 2006), el cual arrastra el 0.5 y 1 % del mosto (Priest & Stewart, 2006), lo cual explica el remanente de azúcares en su composición. Su composición es relativamente constante, aunque puede variar según la especie de cebada empleadas, adjuntos añadidos y por el proceso de malteado, molienda, macerado y filtrado utilizados (Celus et al., 2006)

El grano de malta usado es un material predominantemente fibroso, con un significativo contenido en proteínas. Debido a que consiste principalmente en la cáscara, pericarpio y cubierta de la semilla proveniente del grano de cebada original, su composición es rica en celulosa, polisacáridos no celulósicos y lignina, y suele contener cantidades significativas de proteínas y lípidos, no así de almidón, ya que su mayor parte

se elimina durante la maceración (Mussatto et al., 2006). Al ser un residuo de origen vegetal, presenta valores altos de sólidos volátiles, carbono orgánico total (COT) y nitrógeno orgánico (Tabla 3.1).

Tabla 3.1: Caracterización fisicoquímica del bagazo en base húmeda según distintos autores. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos proporcionados por los autores..

| Parámetro | Unidad** | Referencia | | |
|----------------------------------|----------------------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|
| | | Panjičko et al., 2015 | Capurro Navarro et al., 2018 | Oliveira et al., 2018 |
| Humedad | % m/m | 76,8 | 78 | 78,1 |
| Sólidos Totales (ST) | % m/m | 23,2 | 22 | 21,9* |
| Sólidos Volátiles (SV) | % m/m | 22,3 | 20,74 | 21* |
| Sólidos Fijos (SF) | % m/m | 0,9 | 1,26 | 0,9 |
| Carbono Orgánico Total (COT) | g C/kg | 156,6* | 112,7 | n.d |
| Demanda Química de Oxígeno (DQO) | g O ₂ /kg | n.d | n.d | 316* |
| Nitrógeno Total Kjeldahl (TKN) | % m/m | n.d | 0,83 | 1,0 |
| Relación C/N | | n.d | 13,58 | n.d |
| pH | | n.d | 6,04 | n.d |

*Valor extraído del rango expuesto por el autor. **Todos los valores son expresados por masa de sustrato. n.d.:no disponible

El contenido del bagazo es aproximadamente entre un 15 a 26% de proteínas y un 70% de fibras, las cuales se dividen en 3 grupos: celulosa (15 a 25%), hemicelulosa (28 a 35%) y lignina (cerca al 28%) y en su contenido presenta pequeñas cantidades de lípidos, cenizas y vitaminas (Thiago et al., 2014). También incluye minerales como calcio, cobalto, cobre, hierro, magnesio, manganeso, potasio, selenio, sodio, azufre y fósforo todos en concentraciones menores al 0,5% (Mussatto et al., 2006) (Ver Tabla 3.2).

Tabla 3.2: Composición del bagazo según distintos autores. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos proporcionados por los autores.

| Componentes (% m/m en base seca) | Thiago et al., 2014 | Mussato et al., 2006 | Panjičko et al, 2017 |
|-------------------------------------|---------------------|----------------------|----------------------|
| Proteínas | 15-26,2 | 24,2 | 15,2-24 |
| Fibra* | 70 | 70 | n.d. |
| Celulosa | 15,5-25 | n.d. | 16,8-25,4 |
| Hemicelulosa | 28-35 | n.d. | 21,8-28,4 |
| Lignina | 28 | n.d. | 11,9-27,8 |
| Lípidos | 3,9-10 | 3,9 | <10 |
| Cenizas | 2,5-4,5 | 3,4 | 2,4-4,6 |
| Minerales | n.d. | <0,5 | n.d. |

*Fibra incluye en su contenido a la Celulosa, Hemicelulosa y Lignina. n.d.: no disponible

3.1.2 Alternativas de tratamiento del bagazo

El destino más usual del bagazo es su comercialización como alimento para ganado, generalmente en conjunto con otros residuos sólidos del proceso (lodo trub, extracto de levaduras usado y tierra de diatomeas). Sin embargo, su naturaleza rica en ciertos componentes presta a muchas otras aplicaciones: nutrición animal y humana, producción de energía por combustión directa o la producción de biogás por fermentación anaeróbica; producción de carbón vegetal; material adsorbente en tratamientos químicos; cultivo de microorganismos; obtención de bioproductos por fermentación; soporte para inmovilización celular, entre otros (Thiago et al., 2014). En la Tabla 3.3 se resumen varias de las aplicaciones potenciales del bagazo:

Tabla 3.3: Aplicaciones potenciales del bagazo cervecero. Elaboración propia a partir de los estudios de Mussato et al., 2006 y Thiago et al., 2014.

| Aplicación | Referencia* |
|---|--|
| Alimentación animal y nutrición humana | Gupta et al., 2013; Steinmacher et al., 2012; Kaur and Saxena, 2004. |
| Producción de energía y biogás | Gopi and Sang, 2013. |
| Producción de carbón | Okamoto et al., 2002. |
| Concentrados proteicos | Niemi et al., 2013; Faulds et al., 2009; De-Song et al., 2009; Treimo et al., 2008; Markovic et al., 1995. |
| Fabricación de ladrillos | Russ et al., 2005 |
| Fabricación de papel | Ishiwaki et al., 2000 |
| Adsorbente | Low et al., 2000 |
| Obtención de productos de fermentación como: | |
| Etanol | Gencheva et al., 2012 |
| Ácido láctico | Mussato et al., 2008 |
| Gomas | Stredansky and Conti, 1999 |
| Antibióticos | Stredansky and Conti, 1999 |
| Enzimas | Hashemi et al., 2011; Adeniram et al., 2010; Gregori et al., 2008. |
| Soporte para la inmovilización celular | Kopsahelis et al., 2007; Plessas et al., 2007; Dragone et al., 2007. |
| Producción de mosto de cerveza para obtener cervezas bajas en alcohol | Briggs et al., 2004 |
| Sustrato para cultivo de microorganismos | Wang et al., 2001 |
| Extracción de aceite | Priest and Stewart, 2006. |

*Las referencias citadas se encuentran en la bibliografía del presente proyecto

Desde el punto de vista ambiental, debido al alto contenido de humedad, valor nutricional y presencia significativa de azúcares fermentables residuales, el bagazo de malta es muy inestable y susceptible a la contaminación microbiana, principalmente por hongos filamentosos, por lo cual debe eliminarse de inmediato de la cervecería (Mussatto et al., 2006). Por estos motivos, dependiendo su destino, el bagazo suele secarse para su conservación y disminución de costos de transporte y almacenamiento. Para ello usualmente se utiliza una prensa, para eliminar el exceso de humedad, hasta alcanzar valores cercanos al 65% y luego se introduce en tanques de secado rotatorios o en hornos de secado a temperaturas inferiores a 60°C (Thiago et al., 2014).

A continuación se describen brevemente sus principales aplicaciones:

- **Alimentación animal**

Hasta la actualidad, la principal aplicación del bagazo fue y es como alimento animal (ganado bovino y porcino principalmente), debido a su alto contenido en proteínas y fibra. Este puede ser utilizado tanto húmedo, sin requerir su secado, apenas es separado del mosto y transportado a su destino, o como material seco. El bagazo es un excelente ingrediente alimenticio especialmente cuando se lo combina con fuentes adicionales de nitrógeno de bajo costo como la urea, para proveer todos los aminoácidos esenciales (Reinold, 1997). Actualmente existen en curso varias investigaciones para utilizarlo también como alimento de aves y peces (Mussatto et al., 2006).

- **Nutrición humana**

Debido a su relativo bajo costo y su alto valor nutritivo, el bagazo puede utilizarse para producir harina, y con ella, pan, galletas, bizcochos o snacks. Sin embargo existen ciertas limitaciones para su uso como adjunto proteico o parcial reemplazo de las actuales harinas debido a su color, gusto y textura, permitiendo solo pequeñas adiciones entre el 5 y 10% (Ikram et al., 2017). La ingesta de bagazo y sus productos derivados, provee beneficios a la salud: mejora el tránsito intestinal, baja los niveles de colesterol y disminuye la formación de cálculos biliares.

- **Producción de carbón**

Algunos estudios evalúan las propiedades físicas y químicas del bagazo para producir carbón. Para ello debe secarse el bagazo, carbonizarse a alta presión y baja concentración de oxígeno. El carbón producido posee un alto contenido calórico (27 MJ/kg) siendo similar o superior a la mayoría de los carbones producidos a partir de sustratos alternativos (Okamoto et al., 2020). Sin embargo, debido a sus contenidos de nitrógeno y azufre, durante su combustión pueden formarse compuestos NO_x y SO_x, los cuales tienen implicancias ambientales (Muenchow, 2019).

- **Fabricación de ladrillos**

El bajo contenido de sólidos fijos y su alta proporción de fibras hacen del bagazo, una opción potencial como material de construcción. Sus características aumentan la porosidad de los ladrillos, sin influenciar en el color, sin comprometer la calidad del ladrillo ni alterando significativamente el proceso productivo (Russ et al., 2005).

- **Sustrato para cultivo de microorganismos**

El bagazo tiene eficiencia biológica y alto valor nutritivo como sustrato para especies de hongos como *Pleurotus*, *Agrocybe* y *Lentinus*. Su contenido proteico, humedad, tamaño de partícula, densidad específica y capacidad de retención de agua favorece el crecimiento de éstos, ofreciendo un potencial uso en producciones comerciales de dichos microorganismos (Wang et al., 2001).

- **Producción de energía**

Otra aplicación del bagazo es la producción de energía, tanto por combustión directa, como por descomposición en anaerobiosis para producir biogás.

La combustión directa requiere el drenado del bagazo hasta alcanzar una humedad del 55% y su valor calorífico bruto es de 18,65 MJ/kg (Russ et al., 2005). Sin embargo esta alternativa presenta problemas debido a la emisión de compuestos NOx y material particulado. La emisión de estos gases nocivos son aproximadamente entre 1000 y 3000 ppm de NOx y alrededor de 500 ppm de SOx por kilogramo de bagazo (Keller-Reinspach, 1989).

La descomposición anaeróbica, permite la producción de biogás a partir del bagazo, y es especialmente útil si se lo integra al propio proceso de la cervecería para reemplazar parcialmente la energía térmica y/o eléctrica. Su poder calorífico es entre 6,0 y 6,5 kWh/m³ con una composición entre 55-70% de CH₄ y 30-45% de CO₂, equivaliendo a 0,6 m³ de gas natural (Manual de Biogás, 2011).

La principal dificultad de esta alternativa se debe al alto contenido en fibras, en especial lignina, que contiene el bagazo. La estructura molecular, peso molecular, estabilidad química e insolubilidad de la lignina, hace que la biodegradación de este material lignocelulósico sea bastante difícil (Panjicko et al., 2015). Se trata de polímeros fenólicos reticulados que componen las paredes celulares vegetales, proporcionando estructura, rigidez, impermeabilidad y también resistencia a los ataques de microorganismos (Lebo, 2001).

Estas características de la lignina hacen que su degradación anaeróbica ocurra lentamente. Una de las posibles soluciones a este problema es realizar pretratamientos sobre el bagazo, tanto físicos, químicos, biológicos o combinados, para aumentar la biodisponibilidad del sustrato para los microorganismos, y así, elevar su tasa de descomposición (Mussato et al., 2006 & Koss, 2019). En la **Tabla 3.4** se indican valores bibliográficos del potencial del bagazo como productor de biogás.

Tabla 3.4: Valores de generación de metano por sustrato y sólidos volátiles (SV). Fuente: Elaboración propia a partir de los datos proporcionados por los autores.

| Pretratamiento | Volumen de CH4 productivo | Pureza | Potencial de biometano (BMP) | Referencia |
|---|---|-------------------|---|-----------------------|
| | Ndm ³ CH ₄ /kg Bagazo | % CH ₄ | Ndm ³ CH ₄ /kg SV | |
| Bagazo Crudo | 87,4 | 59,4 | 386 | Panjičko et al., 2015 |
| Bagazo con pretratamiento ácido-térmico | 89,1 | 62,1 | 389 | |
| Bagazo Crudo | 57,7* | 56,5 | 271 | Čater et al., 2015 |
| Bagazo Crudo | n.d. | n.d. | 410 | Bochmann et al., 2015 |
| Bagazo Tratado térmicamente (160°C) | n.d. | n.d. | 468 | |
| Bagazo Crudo | 63,2* | n.d. | 301 | Oliveira et al., 2018 |

*Valor calculado a partir de los resultados expuestos por el autor. n.d.: no disponible

Las altas temperaturas (entre 70 a 200°C) y condiciones ácidas o alcalinas, permiten estimular la hidrólisis química de la celulosa y hemicelulosa formando compuestos de menor peso molecular y más accesibles para su degradación. Entre otras alternativas de pretratamiento se encuentra la molienda por diferentes métodos, aplicación de ultrasonido y uso de enzimas a través de hongos productores de celulasa con bagazo como único sustrato (Muenchow, 2019; Panjičko et al., 2015).

Distintos especialistas cuestionan la eficiencia de los pretratamientos, su eficacia depende de muchas variables: las condiciones iniciales del sustrato, tipo pretratamiento seleccionado y condiciones empleadas. Por otra parte, todos estos procesos requieren energía adicional, sea eléctrica o térmica, contraponiéndose directamente con el grado de eficiencia. Antes de integrar pretratamientos, deben realizarse estudios adicionales sobre el sustrato tratado, a fin de estimar el grado de eficiencia agregado, y realizar un balance del punto de vista económico para determinar su viabilidad (GIZ, 2010).

Otra consideración en investigación es el uso de co-sustratos en conjunto con el bagazo para mejorar el rendimiento en su digestión; existen diversos estudios analizando el potencial de biogás para diversos porcentajes de mezcla entre el bagazo cervecero y extractos de levadura propios del proceso, o con subproductos, generalmente, del sector agropecuario, tales como heces de ganado, rastrojo de maíz, entre otros.

3.2 Marco legal

La normativa aplicable al presente proyecto se divide en dos aspectos:

En primero trata sobre el uso de las energías renovables y su promoción (**Ley Nacional n°26.093, modificada por la Ley 27.191**), donde explica la normativa, ausencias y criterios aplicados respecto a la implementación y uso de plantas generadoras de biogás en nuestro país. Además, con respecto a la combustión, transporte por cañerías y emisiones gaseosas, se desarrolla la normativa existente referida al uso de instalaciones de gas natural establecidas por el Ente Nacional Regulador del Gas (ENERGAS) en las disposiciones **NAG-200, NAG-201 y NAG-602**.

El segundo aspecto refiere a la normativa enfocada al medio ambiente, residuos generados y los límites de vuelco permisibles para la red domiciliaria en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (**Ley N°26.221, CABA**). También incluye la descripción de la Ley Nacional de Gestión Integral de Residuos Industriales y de Actividades de Servicios (**Ley N°25.612**), entre otras.

3.2.1 Normativas de Energías Renovables y Plantas Generadoras de Biogás

La normativa aplicable para la producción y utilización de biogás está regulada a través del Régimen de regulación y promoción para la producción y uso sustentables de biocombustibles presente en la **Ley Nacional n° 26.093** (2006), modificada a su vez, por la **Ley 27.191** Régimen de fomento para el uso de fuentes renovables (2015). Estas establecen la Comisión Nacional Asesora para la Promoción de la Producción y Uso Sustentable de los Biocombustibles para asistir y asesorar a la autoridad de aplicación, conformada por el Ministerio de Planificación Federal, Inversión Pública y Servicios, a través de la Secretaría de Energía. A su vez establece el marco regulatorio de los biocombustibles en Argentina, para las actividades de producción, mezcla, distribución, comercialización, consumo y autoconsumo de biocombustibles, entre ellos el biogás generado a partir de desechos orgánicos, dejando a cargo de dictar la normativa técnica aplicable y fijar las especificaciones técnicas de los biocombustibles a la autoridad de aplicación.

La **Ley Nacional n° 26.093** define como biocombustibles al bioetanol, biodiesel y biogás que se produzcan a partir de materias primas de origen agropecuario, agroindustrial o desechos orgánicos, que cumplan los requisitos de calidad que establezca la autoridad de aplicación. Establece a su vez, que solo podrán producir biocombustibles las plantas habilitadas que cumplan con los requerimientos fijados en cuanto a la calidad y su producción sustentable y que deben someterse a un procedimiento de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA), incluyendo el tratamiento de efluentes y residuos del proceso.

Sin embargo esta ley tiene sus limitaciones respecto al caso de estudio, debido a dos motivos: 1) su orientación aplica principalmente a la producción de biodiesel, y 2) se enfoca a su vez en la generación de energía eléctrica a partir del uso de fuentes de energía

renovable. Esto resulta en que la normativa correspondiente a la producción de energía térmica a partir de los biocombustibles no posee un marco legal concreto.

Lo que sí define esta ley son las competencias correspondientes a plantas de generación de energía eléctrica respecto al diseño, emplazamiento, construcción, operación y mantenimiento de plantas de producción de biogás que quedarían en la órbita de la actual Secretaría de Gobierno de Energía. Y, por otra parte, el Ente Nacional Regulador del Gas (ENARGAS) queda como responsable de fijar la normativa técnica y de seguridad para las actividades de transporte, distribución y almacenamiento de biogás (FAO, 2019). Durante el 2019, en la resolución **NAG 602**, se detallaron por primera vez algunos aspectos referidos al uso y transporte del biogás. Sin embargo aún se encuentran varios aspectos sin detallar tales como almacenamiento, medidas de seguridad, entre otros.

La **NAG-602** (2019) establece las especificaciones de calidad para el transporte y la distribución de gas natural y otros gases análogos, entre los que se incluye el biogás. Respecto al biogás la norma indica: “El biogás podrá ingresar únicamente en redes aisladas, dedicadas a su distribución de manera exclusiva, sin mezclarse con otros combustibles desde el sitio de generación hasta el sitio de consumo, siempre que cumpla con las especificaciones establecidas en el Anexo A. El operador de la red de distribución deberá efectuar una presentación al ENARGAS, detallando la fuente de obtención del biogás, su composición y propiedades, y un plan de monitoreo de los parámetros enunciados en el Anexo A (Ver **Tabla 3.5** y **Tabla 3.6**). El consentimiento prestado por la Autoridad tendrá vigencia siempre y cuando se mantenga el cumplimiento de los puntos señalados anteriormente, conforme la presentación realizada...”.

Tabla 3.5: Especificaciones de calidad para biogás en redes aisladas de distribución. Fuente: ENARGAS - NAG 602.

| Parámetro | Unidad | Condición |
|--|---------------------|-----------|
| Metano (CH₄) | % molar | Mín. 55 |
| Dióxido de carbono (CO₂) | % molar | Máx. 45 |
| Sulfuro de hidrógeno (SH₂) | mg/m ³ | Máx. 3 |
| Vapor de agua (H₂O) | mg/m ³ | Máx. 65 |
| Poder calorífico superior (PCS) | kcal/m ³ | Mín. 5000 |
| | MJ/m ³ | Mín. 20,9 |
| Índice de Wobbe (IW) | kcal/m ³ | Mín. 5025 |
| | MJ/m ³ | Mín. 21,0 |

Tabla 3.6: Especificaciones adicionales para el biogás proveniente de fuentes residuales, industriales y urbanas. Fuente: ENER GAS - NAG 602.

| Parámetro | Unidad | Condición |
|------------------------|-------------------|-----------|
| Siloxanos | mg/m ³ | Máx. 10 |
| Compuestos halogenados | mg/m ³ | Máx. 1 |

Para completar las ausencias en normativa legal y técnica que regulen aspectos de la actividad relacionada al biogás que no se encuentran detallados en la **NAG 602**, ni en ninguna otra resolución, (ni tampoco reguladas por la Secretaría de Gobierno de Energía) se decidió adoptar adicionalmente normativa relacionada al manejo y transporte del Gas Natural establecida a nivel nacional por ENARGAS. Para ello se seleccionaron entre sus Normas Técnicas aquellas competentes con el caso de estudio (**NAG 200 y 201**).

La **NAG-200** (2019) establece el Reglamento Técnico para la ejecución de instalaciones internas domiciliarias de gas así como sus condiciones mínimas de seguridad y conservación. Esta prescribe los requerimientos mínimos para la instalación de medidores, equipos individuales o colectivos de gas envasado, prolongaciones domiciliarias, cañerías internas, instalaciones de artefactos y evacuación de productos de combustión en instalaciones domiciliarias, con presiones menores a 2 kg/cm² (0,196 MPa).

La **NAG-201** (1985) establece las Disposiciones, Normas y Recomendaciones para uso de Gas Natural en Instalaciones Industriales. Compone los reglamentos técnicos para las instalaciones de gas comprendidas entre las líneas de gas natural municipales y el equipo consumidor en el establecimiento. Define también, la aplicación para aquellas instalaciones que se abastezcan desde redes que operen en media presión en las que la distribución de gas dentro del establecimiento se realice a una presión superior a los 19 mbar (0,020 kg/cm²).

Aunque no son en esencia el caso de estudio, adoptar estas normas técnicas diseñadas para el gas natural, sirve como guía para la acumulación, transporte y consumo del biogás generado para uso interno. Respecto al diseño e implementación de plantas de biogás se destaca la ausencia de un marco regulatorio para su habilitación, en especial la normativa técnica y de seguridad para las plantas (FAO, 2019). Para compensar dicha falencia, el presente trabajo incluye en el **Capítulo 8** el Manual de Seguridad para la Planta de Biodigestión basado en las recomendaciones de seguridad establecidas por el Organismo Alemán de la Seguridad Social para la Agricultura, la Silvicultura y la Horticultura (SVLFG, por sus siglas en alemán) de reconocimiento internacional, lo que constituye una fuente esencial de información para la planificación, construcción, operación, mantenimiento y puesta a prueba de la planta de biogás del presente proyecto.

3.2.2 Normativas Ambientales

La cervecería utilizada como caso de estudio se encuentra en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, en el territorio correspondiente a la cuenca Medrano-Vega-Maldonado donde, respecto al vuelco de efluentes líquidos, rige la **Ley 3.295** de la Ciudad de Buenos Aires (2010). Esta establece como autoridad de aplicación a la Agencia de Protección Ambiental del Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires y regula la gestión ambiental del agua de dominio público en dicha jurisdicción. Establece que los efluentes líquidos generados por el proceso industrial (en este caso la fracción líquida del digerido provenientes de el biodigestor) no pueden ser vertidos en la red pluvial, cursos de agua superficiales o subterráneos y para el vuelco en la red domiciliaria, deben cumplir con la normativa, reglamento y control establecido por la autoridad de aplicación: la empresa Aguas y Saneamientos Argentinos (AySA).

Los valores de vuelco cloacal (sistema receptor de los efluentes líquidos del caso de estudio) se encuentran regulados por los valores indicados por el anexo B de la **Ley 26.221** de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (2007). En el plausible caso de que en corto o mediano plazo la normativa de la Ciudad defina una normativa más exigente y completa, también se añaden los valores límites provistos por la Prov. Buenos Aires en la **Resolución N°336/03** (2003) para colectora cloacal, para así, completar y utilizar como referencia aquellos parámetros aún no regulados en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Los valores con relación al proyecto se detallan en la **Tabla 3.7** (los valores de la normativa completa se encuentran en **Anexo 3.1a**).

Tabla 3.7: Valores de vuelco máximos establecidos por el anexo B de la Ley 26221 y la Resolución N°336/03 de la Prov. de Buenos Aires. Elaborado a partir de los valores extraídos de servicios.infoleg.gob.ar

| Límite de Descarga a Colectora Cloacal | CABA Anexo B – Ley N°26.221 | Prov. Buenos Aires Resolución N°336/03 A colectora cloacal |
|---|-----------------------------|--|
| pH | 6,5-8 | 7-10 |
| Temperatura (°C) | 45 | 45 |
| DBO (mg/l) | 300 | 200 |
| DQO (mg/l) | - | 700 |
| OC – Oxígeno Consumido – del KMnO4 (mg/l) | 120 | - |
| Sólidos Sedimentables 2 hs (ml/l) | - | 5,0 |
| Nitrógeno Total (mg/l) | - | 105 |
| Nitrógeno Orgánico (mg/l) | - | 30 |
| Fósforo Total (mg/l) | - | 10 |
| Coliformes fecales (NMP/100ml) | - | 20000 |

A continuación se describe el resto de la normativa Ambiental con relación a la gestión de los residuos generados por el biodigestor del presente trabajo.

La **Ley Nacional 25.612** de Gestión Integral (2002) establece los presupuestos mínimos de protección ambiental para la gestión integral (generación, manejo, almacenamiento, transporte y tratamiento o disposición final) de residuos de origen industrial y de actividades de servicios generados en todo el territorio nacional. Esta ley define como residuo industrial a todo elemento sólido, líquido o gaseoso que el generador no pueda utilizar y que sea obtenido como un resultado del proceso industrial, por la

realización de una actividad de servicio, o por estar relacionado, directa o indirectamente, con esa actividad. En cuanto a los generadores, dispone que los mismos son responsables por el tratamiento adecuado y disposición de sus residuos. Bajo este marco, los residuos y efluentes generados por el proceso de generación de biogás quedan incluidos, sin embargo esta Ley aún no fue reglamentada.

La **Ley Nacional 24.051** Residuos Peligrosos (1992), reglamentada por el **Decreto 831/93**, define como residuos peligroso a “todo residuo que pueda causar daño, directa o indirectamente, a seres vivos o contaminar el suelo, el agua, la atmósfera o el ambiente en general”. Los residuos generados por la planta de biogás no se hallan enmarcados en ninguna de las categorías ya que no hay una definición para residuos orgánicos digeridos, a excepción tal vez de la clasificación Y18 “Residuos resultantes de las operaciones de eliminación de desechos industriales”. Lo mismo ocurre en la **Ley 2.214** Residuos Peligrosos de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (2007), ya que utiliza la misma categorización que la ley nacional.

La **Ley Nacional 20.466** Elaboración, fraccionamiento, distribución, importación y exportación de fertilizantes y enmiendas (1973), reglamentada por el Decreto 4830/1973, define al Ministerio de Agricultura y Ganadería como autoridad de aplicación y dice que “los fertilizantes y enmiendas que se elaboren, fraccionen, vendan, importen o exporten, estarán sujetos al requisito de la certificación de aptitud para su empleo como tales, registro y control de calidad, a cargo de los servicios técnicos de la autoridad de aplicación, conforme lo establezca su reglamentación”.

El **Decreto 674/89** (1989), reglamentación de la **Ley Nacional 13.577**, establece un régimen general de protección de las aguas, incluyendo el concepto de calidad. Solo comprende establecimientos de tipos industriales y especiales que produzcan en forma continua o discontinua vertidos o barros originados por la depuración de aquellos a conductos cloacales, pluviales o a un curso de agua de modo que directa o indirectamente puedan contaminar las fuentes de agua, dañar las instalaciones de la Empresa Aguas y Saneamientos Argentinos (ex Obras Sanitarias de la Nación) o afectar la salud de la población.

La **Resolución 097/01** (2001) contiene el reglamento para el manejo sustentable de barros generados en plantas de tratamiento de efluentes líquidos sean cloacales, industriales, mixtos, agroindustriales y/o especiales creado en su momento por el Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente. Establece el uso de los barros tratados como abonos o productos fertilizantes donde sus procesos de elaboración y características de productos finales y sus usos quedan sujetos a la regulación vigente.

Por último, la **Ley 4120** de la Ciudad de Buenos Aires (2011) marco regulatorio del Servicio Público de Higiene Urbana (SPHU) hace referencia al manejo sustentable de residuos y las acciones de disposición inicial selectiva, recolección diferenciada, transporte, tratamiento y transferencia, manejo y aprovechamiento, reducción progresiva de la disposición final, reciclado y minimización de la generación, teniendo en consideración la generalidad, integridad y coherencia del servicio público de higiene

urbana en todos sus aspectos, sistemas y servicios. En su Art. n° 7 define al residuo industrial como todo residuo sólido generado de todo proceso de producción, transformación, utilización, consumo, disposición, limpieza o mantenimiento de bienes y servicios, o actividades conexas.

3.3 Caso de estudio

El fin de esta sección es describir brevemente las características de la cervecería seleccionada como caso de estudio, en cuanto a el proceso productivo, consumo energético, caudales productivos, residuos de interés generados y sus costos de disposición. También se describe su ubicación y la distribución de la planta, incluyendo el área disponible para la instalación de la planta de biogás.

3.3.1 Características generales

Para el caso de estudio se seleccionó una PyME (Cervecería A) con una producción de 20.000 litros de cerveza/mes, ubicada en la Ciudad Autónoma de Buenos Aires (CABA), en el barrio de Chacarita (**Figura 3.1 y 3.2**). El predio es cubierto y posee un área de 920 m² (azul) de los cuales 100 m² (verde) están disponibles para ubicar el tratamiento de bagazo y efluentes debido a que el resto del área está ocupada por el proceso productivo o como sector de almacenaje.



Figura 3.1: Ubicación general de la Cervecería A en Ciudad Autónoma de Buenos Aires



Figura 3.2: Vista superior del predio utilizado como caso de estudio, donde se visualiza delimitados el área total (azul) y el área disponible para el tratamiento (verde).

3.3.2 Producción

La Cervecería A utilizada como caso de estudio, consiste en una industria de fabricación de cerveza tipo artesanal con 6 tipos distintos de cerveza de producción fija y 3 gustos más que rotan mes a mes. Cuenta con equipos de fabricación industrial que permiten un volumen de producción de 1000 litros por cocción.

La empresa trabaja 6 días a la semana, 5 jornada completa y sábados media jornada. Se realizan cocciones todos los días de semana, es decir 20 cocciones mensuales, con lo cual actualmente no se producen residuos sólidos durante los fines de semana. Sin embargo, planean una expansión en la producción a 7 cocciones por semana.

En el **Capítulo 2** se describió el proceso general de producción de una cervecería. A grandes rasgos el proceso productivo de la **Cervecería A** cuenta con los siguientes pasos:

- Recepción y Almacenamiento de materias primas
- Molienda de malta (**Figura 3.3**)
- Macerado y Filtración (**Figura 3.3**)
- Cocción (**Figura 3.4**)
- Clarificación y Enfriado (**Figura 3.4**)
- Fermentación (**Figura 3.5**)
- Maduración (**Figura 3.5**)
- Carbonatación
- Envasado (**Figura 3.6**)

- Limpieza de envases (**Figura 3.7**)

El proceso de la **Cervecería A** no posee las etapas finales de clarificación por filtración en tierra de diatomeas y estabilización microbiológica, reservadas comúnmente para industrias de mayor volumen productivo.



Figura 3.3: Dispositivos de molienda (izq.) y macerador con plato falso (der.) de Cervecería A



Figura 3.4: Olla de cocción y filtración (izq.) y enfriador (der.) de Cervecería A



Figura 3.5: Fermentadores (izq. y tanques de maduración (der.) de Cervecería A

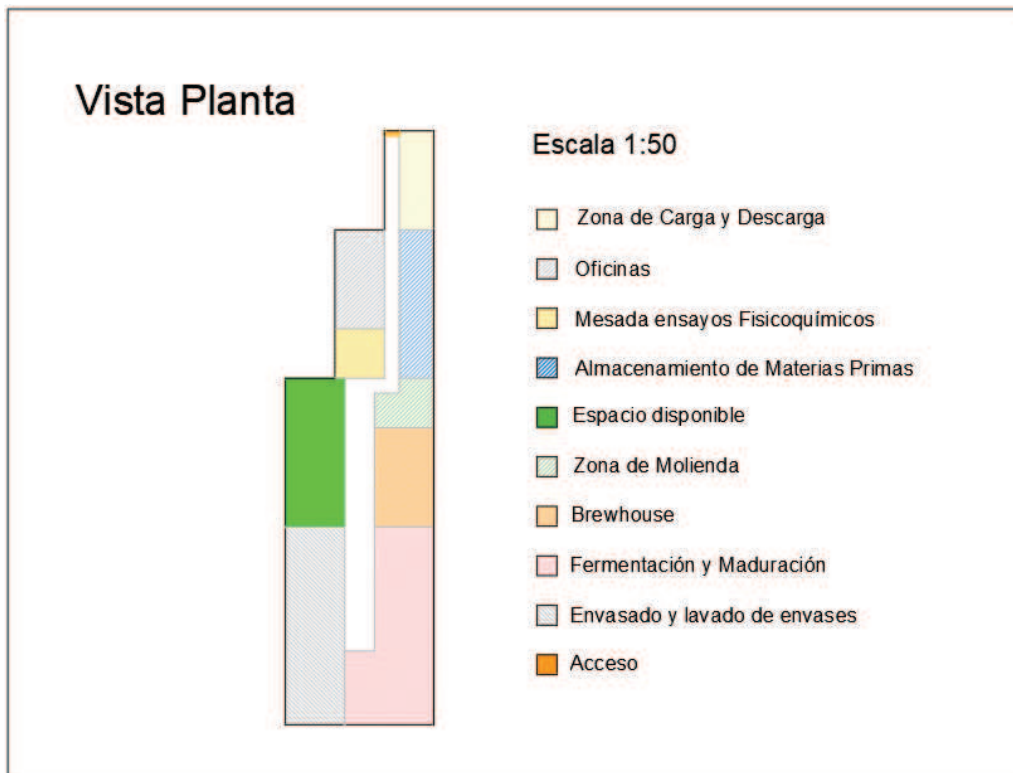


Figura 3.6: Envasadora de barriles de Cervecería A



Figura 3.7: Máquina limpiadora de envases de Cervecería A

La distribución de la planta de la **Cervecería A** se detalla a continuación en la **Figura 3.8**, donde se destaca el espacio libre disponible para la planta de biogás:



3.8: Vista planta de la Cervecería A

Figura

3.3.3 Consumo energético

Los equipos que consumen energía eléctrica y térmica en la producción de cerveza artesanal son variados y corresponden a las distintas etapas del proceso productivo mencionadas anteriormente. Debido a la imposibilidad de relevar los datos reales de consumo energético del caso de estudio, se estimaron a partir de los datos de consumo expuestos por Conduah (2019) en la **Tabla 2.6** de la **Sección 2.2.6**, y las proporciones de consumo promedios de una industria cervecera, discriminados por tipo de energía (térmica o eléctrica) y proceso, indicadas por Energy Usage, GHG Reduction, Efficiency and Load Management Manual (2015), en la **Figura 2.10** de la **Sección 2.2.6**.

A partir de los datos bibliográficos mencionados y el caudal del caso de estudio se estimaron los datos de consumo que se exponen a continuación en la **Tabla 3.8**:

Tabla 3.8: Valores de consumo de energía térmica y eléctrica para la Cervecería A

| Eléctrico (kWh/mes) | | | Térmico (kWh/mes) | | | | Combinado (kWh/mes) |
|---------------------|----------|-------|-------------------|----------|-------------|-------|---------------------|
| 1850 | | | 4700 | | | | 6550 |
| Refrigerado | Envasado | Otros | Brewhouse | Envasado | Calefacción | Otros | |
| 650 | 460 | 740 | 2100 | 1200 | 500 | 900 | |

3.3.4 Generación de residuos y costos de disposición

Los residuos de la **Cervecería A** se dividen en sólidos (bagazo, extractos de levadura usados y lodos “turb”) o líquidos (efluentes provenientes principalmente de operaciones de limpieza del proceso). El bagazo constituye el principal residuo sólido, se colecta en un container al finalizar el proceso de macerado y se dispone a través de una empresa transportista, que lo retira diariamente. Los efluentes líquidos se colectan a través del sistema de canaletas dispuesto en el predio industrial y se disponen por gravedad en la red de aguas domiciliarias de la ciudad sin ningún tratamiento previo.

El bagazo generado no presenta gran variabilidad en la cantidad generada y en su composición ya que la producción de cerveza es constante durante el año y solo se ve afectado por los cambios en las maltas utilizadas para la producción de cada cerveza, aunque estas se repiten en ciclo de manera constante durante cada mes. La temperatura del bagazo al momento de su extracción es aproximadamente de entre 70 y 80 °C con un pH de 5,3-5,4 y una densidad aproximada de 0,6 kg/dm³ (mediciones obtenidas in situ en la cervecería con el equipamiento disponible).

La **Cervecería A** posee un caudal productivo de 20.000 litros de cerveza/mes, con proyección de aumentar la producción en aproximadamente un tercio. Actualmente se generan entre 8-9 m³ de bagazo/mes, siendo un total de 4800-5400 kg, con un costo mensual total de AR\$ 32.000 para disponer el bagazo a través de una empresa transportista privada que lo retira diariamente (02/21).

CAPÍTULO 4

Determinación del BMP

El diseño y construcción de biodigestores anaeróbicos a escala industrial basados en sustrato específicos requiere un buen entendimiento de las características físicas y bioquímicas de cada sustrato. El análisis del Potencial Bioquímico de Metano (BMP, por sus siglas en inglés Biochemical Methane Potential) provee de información preliminar sobre la biodegradabilidad y el potencial de generación de metano de un sustrato en condiciones anaeróbicas, a escala de laboratorio.

Este método hace referencia a la cantidad de metano (CH₄) que puede producir cada sustrato por unidad de masa o volumen en condiciones anaeróbicas a escala laboratorio, bajo diferentes condiciones de operación (temperatura, agitación, relación de sólidos volátiles de sustrato/inóculo, otros), expresado en $\text{Nm}^3 \text{CH}_4 / \text{g}_{\text{SVsustrato}}$ o en términos de volumen de gas total producido en función de la masa total $\text{Nm}^3 \text{CH}_4 / \text{Ton}_{\text{sustrato}}$.

Para ello el método se basa en medir el biometano producido en viales que contienen una pequeña cantidad del sustrato inicial e inóculo anaeróbico. Se setean las condiciones iniciales y se los incuba a temperatura controlada durante cierto periodo de tiempo, mientras se chequean de forma periódica el volumen de metano generado (BioProcess Control, 2016).

En las últimas décadas, numerosos estudios de BMP a lo largo de todo el mundo han generado una gran cantidad de datos bibliográficos, debido a su practicidad, relativa rapidez y bajo costo, para numerosos tipos de sustratos, incluyendo entre ellos el bagazo cervecero. Sin embargo, la comparación de dichos datos de biodegradabilidad es muy difícil debido no solo al tipo de equipamiento utilizado, sino también a las variaciones que presentan los distintos estudios en cuanto a metodología y condiciones planteadas. A su vez, la información brindada en referencia a la metodología utilizada y parámetros aplicados en los ensayos, resultan muchas veces poco detallados, disminuyendo la

confiabilidad de los valores obtenidos. Dicha problemática decanta en la necesidad de realizar una determinación del BMP propia a través de una metodología detallada para facilitar futuras comparaciones y replicaciones.

En el presente trabajo, la determinación del BMP del bagazo cervecero se realizó en modo batch utilizando el equipo AMPTS II de Bioprocess Control, siguiendo el protocolo de uso interno del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), basado a su vez, en el procedimiento desarrollado en el manual del equipo.

Este capítulo describe las condiciones y metodologías empleadas en la determinación del Potencial de Biometano (BMP) del bagazo proveniente de una industria cervecera artesanal, los resultados asociados para el bagazo crudo y dos pretratamientos, cada uno con dos relaciones de sustrato/inóculo distintas y el posterior análisis de los resultados obtenidos.

4.1 Potencial de Biometano (BMP)

Los ensayos de determinación del potencial de biometano se aplican de forma rutinaria para determinar la producción de metano a partir de distintos compuestos, tanto sólidos como líquidos. Sin embargo, no se trata de un ensayo sencillo: el sustrato, tamaño de partícula, inóculo, nutrientes, blancos y controles, número de replicas, sistema de mezcla, el “*set up*” del ensayo, es decir, los cálculos previos, concentraciones y diluciones utilizadas, la atmósfera inicial en cada reactor, el método de colección de datos, la presión y temperatura durante el ensayo, unidades y convenciones en las que se expresan los valores obtenidos y la interpretación de los resultados son los principales aspectos a tener en cuenta (Angelidaki, et al., 2009).

Para organizarlo en un modo mas sencillo, todos lo factores mencionados pueden agruparse en cuatro grandes grupos: aquellos relacionados al sustrato, aquellos relacionados al inóculo, a las condiciones experimentales y a las operacionales (**Figura 4.1**), los cuales según Cardenas et al., (2016) es recomendable reportar con claridad, a fin de garantizar la posibilidad de comparación con otros estudios y resultados reportados, y al mismo tiempo, para aportar a la unificación de protocolos y procedimientos del ensayos.

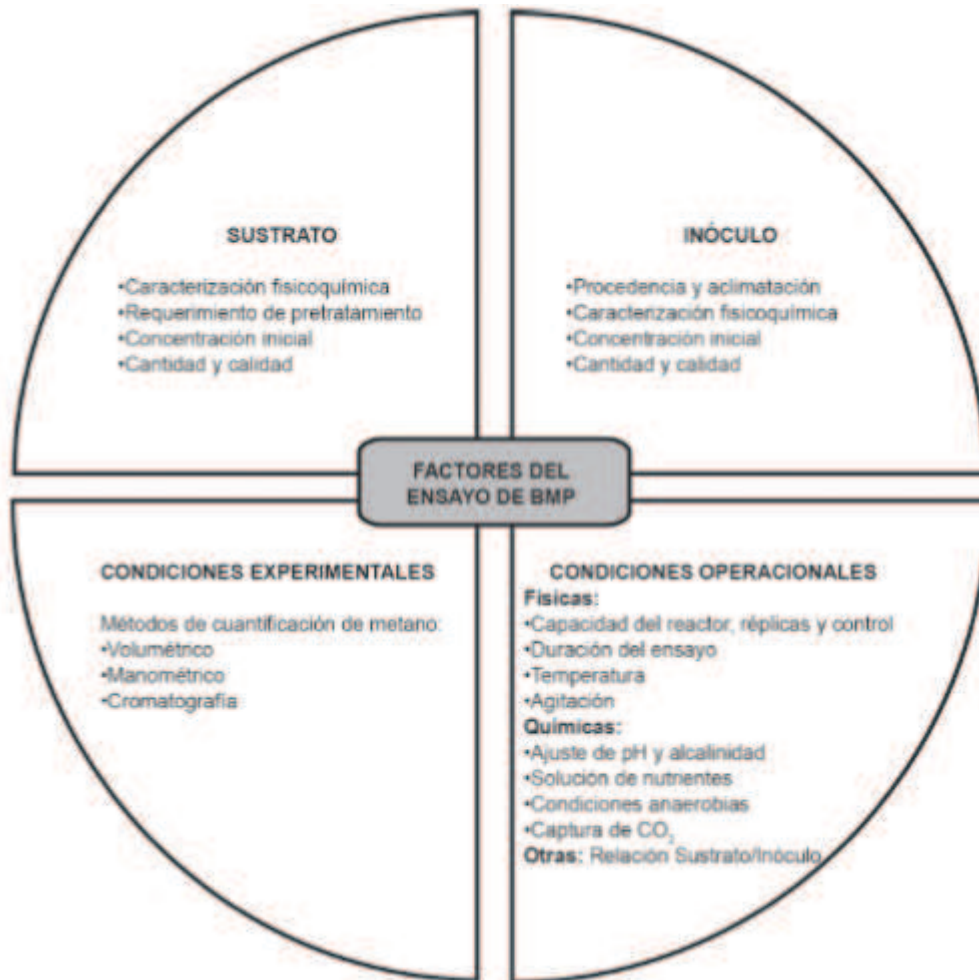


Figura 4.1: Esquema de los principales factores de desempeño de un BMP. Extraído de Cárdenas, et al., 2016.

4.1.1 Sustrato

Los sustratos deben caracterizarse lo más detalladamente posible. Los sólidos totales (ST) y sólidos volátiles (SV), la demanda química de oxígeno (DQO), nitrógeno y fósforo deben ser determinados. Para los sustratos sólidos heterogéneos se dificulta muchas veces la determinación precisa de DQO, dejando cierta incertidumbre en su valor (Angelidaki, et al., 2009).

La composición y concentración del sustrato pueden ocasionar fenómenos indeseados de inhibición, influyendo sobre los microorganismos y afectando a la cantidad y calidad de CH₄ final producido (Cardenas et al., 2016). Por esta razón, ciertos sustratos pueden requerir estudios adicionales sobre su composición y algún tipo de pretratamiento. Un claro ejemplo es la importancia en analizar el contenido de lignina, hemicelulosa y celulosa para sustratos como granos y otros residuos agrícolas, debido a que la degradabilidad de la lignina no contribuye al potencial de biogás (Buffiere, et al., 2006).

Respecto al tamaño de partícula, en especial para el caso de los residuos sólidos orgánicos, se recomienda que el tamaño de partícula sea menor o igual a 1 cm, debido a que la hidrólisis es considerada la etapa limitante influyendo directamente sobre la cinética del proceso (Raposo, et al., 2012). En cuanto a la cantidad de sustrato a adicionar, se contempla en las recomendaciones establecidas para la relación sustrato/inóculo (S/I).

4.1.2 Inóculo

En los ensayos de digestión anaeróbica es importante tanto la cantidad como la calidad del inóculo disponible. Es recomendable que sea fresco y en lo posible, que se encuentre activo, a fin de que la descomposición del sustrato no enfrente ninguna limitación y se reduzcan los tiempos hasta su estabilización (Cardenas et al., 2016). Los inóculos más empleados son los provenientes de lodos anaeróbicos en sistemas de tratamiento de aguas domésticas, debido principalmente a su amplia disponibilidad y biodiversidad de microorganismos implicados. En caso de utilizar inóculos provenientes de una alimentación simple, conviene utilizar mix de inóculos (Angelidaki, et al., 2009).

Aunque la aclimatación generalmente no es un proceso obligatorio, el origen del inóculo y la afinidad al nuevo sustrato son aspectos importantes a tener en cuenta para garantizar tiempos de arranque menores durante el ensayo, así como mayor actividad biológica y por lo tanto mayor producción de metano (Cardenas et al., 2016). Para asegurar la idoneidad respecto al inóculo en referencia a la capacidad de producción de CH_4 , puede realizarse un ensayo previo de Actividad Metanogénica Específica (AME) empleando como sustrato una mezcla de ácidos grasos volátiles (AGV's) comúnmente constituida por acetato, propionato y butirato en una proporción similar a la del sustrato a evaluar (Raposo, et al., 2006).

Antes de su uso en el ensayo, el inóculo debe ser “desgasificado”, es decir, durante su preincubación eliminar la alimentación entre 2 a 5 días antes del arranque del ensayo, manteniendo la agitación y temperatura constantes a fin de eliminar todo material orgánico residual presente en el inóculo. Se deben caracterizar los parámetros físico-químicos del inóculo lo más cerca posible al arranque a fin de que los resultados sean lo más representativos posibles y no debe lavarse el inóculo para eliminar el material residual inorgánico en forma de sedimentos una vez realizada dicha caracterización. También la temperatura de la preincubación durante la activación del inóculo debe ser la misma a la que se utilizará durante el ensayo.

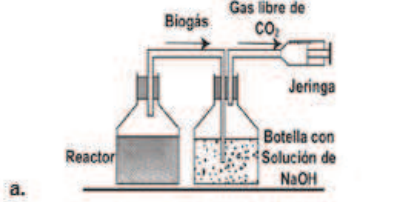
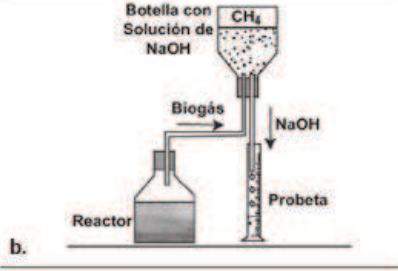
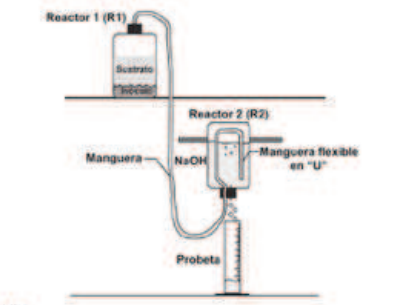
Otro aspecto importante del inóculo durante su preincubación es aquel relacionado a su capacidad buffer y a su alimentación, por lo cual es recomendable determinar la alcalinidad total (AT) y la alcalinidad debida al bicarbonato (AB) y la relación AGV's/AT respectivamente. Los ácidos grasos volátiles generados por el propio proceso anaeróbico, pueden volverse inhibidores de la metanogénesis si el pH disminuye demasiado. Por ello, la capacidad de neutralizar ácidos que posea el inóculo es fundamental para garantizar la estabilidad durante el ensayo de BMP. Esta capacidad puede estimarse a través de una

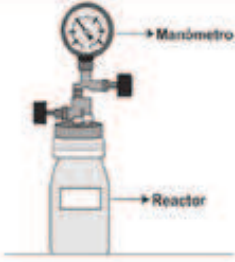

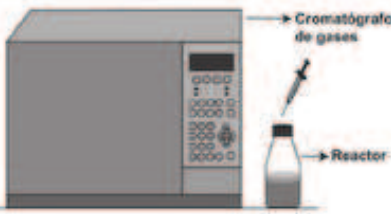


relación específica entre AT y AB. Por otra parte, el cociente entre la concentración ácida y la capacidad compensadora del sustrato de fermentación AGV's/AT o la relación FOS/TAC son valores guía para detectar si el rango de producción de biogás del lodo esta en condiciones óptimas, subalimentado o sobrealimentado poniendo en riesgo su estabilidad (Lossie & Pütz, 2011).

4.1.3 Condiciones experimentales

Los métodos volumétricos y manométricos con diversos grados de automatización son los sistemas mas usuales en los ensayos de BMP. Algunos de ellos, dada su configuración, sólo miden el biogás generado por el reactor anaeróbico requiriendo una posterior cromatografía de gases para determinar la cantidad de CH₄. Otros diseños pueden medir directamente el CH₄ al emplear una solución alcalina que capture el CO₂ y SO₂ previo a la medición, sea por desplazamiento de volumen o presión (Cardenas et al., 2016). En la **Tabla 4.1** se resumen las configuraciones más frecuentes para cada método y sus principales ventajas y limitaciones.

Tabla 4.1: Métodos aplicados para la determinación de BMP. Modificado de Cardenas et al., 2006.

| MÉTODO | CONFIGURACIÓN BÁSICA | VENTAJAS | LIMITACIONES |
|-------------|---|---|---|
| VOLUMETRICO |  <p>a.</p> | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Simplicidad y bajos costos. ✓ Medición directa del contenido de CH₄ en el biogás empleando una solución alcalina que captura el CO₂. | <ul style="list-style-type: none"> ✗ Microfugas en los equipos pueden incrementar la producción real de CH₄. |
| |  <p>b.</p> | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Configuraciones experimentales de bajo costo que pueden ser implementadas en cualquier laboratorio | <ul style="list-style-type: none"> ✗ Requiere medición constante del volumen desplazado (al menos 3 veces al día) y agitar los reactores para mejorar el contacto entre el sustrato e inóculo y favorecer evacuación del biogás. |
| |  <p>c.</p> | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Capacidad de trabajar por largos periodos sin necesidad de mantenimiento. ✓ La configuración C. evita que R1 se vea afectado en el caso que ocurra succión del NaOH por presiones negativas; adicionalmente, la manguera en forma de "U" ubicada en R2 fue ideada para actuar como un sifón, evitando el paso del NaOH hacia R1. | <ul style="list-style-type: none"> ✗ Verificación continua de la cantidad y el pH de la solución alcalina desplazante. |

| | | | |
|---|---|--|--|
| MANOMÉTRICO |  <p>Manómetro Reactor</p> | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Reducción de errores debido a interferencias humanas. | <ul style="list-style-type: none"> ✗ Medida indirecta del CH_4, por lo que se requiere realizar cálculos para obtener el volumen. |
| |  <p>Cabezal de medición OxiTop® Boquilla de muestra Depósito para perlas de NaOH Reactor</p> | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Registros continuos y automáticos de la presión, por lo cual no se requiere de un control estricto. ✓ Automatización para la recolección de datos. | <ul style="list-style-type: none"> ✗ Pueden presentarse inconvenientes en algunos equipos de acuerdo con la presión límite de funcionamiento. ✗ Mayores costos de adquisición y mantenimiento. |
| CROMATOGRAFÍA |  <p>Cromatógrafo de gases Reactor</p> | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Permite conocer la composición del biogás. ✓ Proporciona información cualitativa (identificación de componentes desconocidos en la muestra de biogás) y cuantitativa (cantidad de cada componente). ✓ Permite realizar mediciones en tiempos cortos. | <ul style="list-style-type: none"> ✗ Altos costos de adquisición, mantenimiento y operación. ✗ Requerimientos de personal calificado para el manejo del cromatógrafo. |
| | VOLUMÉTRICO AUTOMATIZADO |  <p>Cabezal con motor Sistema de agitación Reactor</p> | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Reducción de errores debido a interferencias humanas ✓ Medición directa de volumen de CH_4, con registros continuos ✓ Automatización para la recolección de datos |
|  <p>Reactores en baño termostático Unidad de absorción de CO_2 Equipo medidor de volumen de CH_4</p> <p>Biogás CH_4</p> | | <ul style="list-style-type: none"> ✓ Permite correr varios ensayos similares al mismo tiempo ✓ Fácil "set up" del ensayo Mayor replicabilidad | <ul style="list-style-type: none"> ✗ No incluye información sobre la composición del biogás generado |

4.1.4 Condiciones operacionales

Las condiciones operacionales son cada una de las variables del test que definen la representatividad del resultado obtenido. Es de suma importancia observar, analizar y, en algunos casos, definir cada una de ellas para garantizar la calidad del ensayo de BMP. A continuación describiremos los aspectos más fundamentales.

- **Réplicas, blancos y control**

El ensayo de BMP se realiza generalmente en reactores batch cuyo volumen oscila entre 100 ml y 2 L (Angelidaki, et al., 2009). En general se recomienda como mínimo, en el número de réplicas, el uso de triplicados para habilitar el análisis estadístico de los resultados. Sin embargo es sabido y aceptado por la comunidad científica que debido a las limitaciones en la disponibilidad de recursos económicos, equipos y tiempo, en muchas ocasiones se condiciona el número de repeticiones posibles, por lo cual, se acepta ensayos por duplicado, siempre y cuando se verifiquen un comportamiento similar en la curva de CH_4 (Cardenas et al., 2016).

Los reactores utilizados como blanco están constituidos únicamente por inóculo, y se los emplea para determinar el CH_4 generado por el sustrato residual presente en el inóculo. La producción de CH_4 por parte de los blancos se espera que sea relativamente baja si el inóculo se desgasificó correctamente. Una vez obtenido su valor de producción, se lo resta a la generación obtenida en los reactores con sustrato en la proporción acorde a la cantidad de inóculo utilizado. De este modo el valor de metano obtenido cuantifica únicamente para el sustrato utilizado en cada reactor.

Los ensayos de control consisten en adicionar al inóculo un sustrato estándar, el cual su producción de CH_4 es conocida. Este procedimiento da una idea acerca de la respuesta del inóculo respecto a la degradación de sustratos estandarizados y presta garantías de su actividad en las condiciones del test. Usualmente suele utilizarse como sustrato de control celulosa, cuando el sustrato testeado es de origen más bien vegetal (granos, residuos agropecuarios o municipales) y gelatinas cuando se tratan de derivados de la carne, pescado y otros residuos similares (Angelidaki, et al., 2009). También, en algunos casos, puede utilizarse como sustrato de referencia acetato de sodio (NaAc), aunque cabe aclarar que solo actúa como control de la fase metanogénica y no de todo el proceso anaeróbico.

- **Duración del ensayo**

La duración del test BMP depende de la biodegradabilidad del sustrato y el grado de activación y adaptación del inóculo, por lo tanto no es posible establecer un período definido, aunque suele encontrarse entre los 15 y 60 días (Alves, 2008). Generalmente la disminución de la producción diaria de CH_4 es paulatina, por lo que comúnmente se establecen valores mínimos de generación de CH_4 debajo de los cuales se da por finalizado el ensayo.

- **Temperatura**

Los ensayos de BMP se realizan en distintos rangos de temperatura según el tipo de microorganismos con los que se desee trabajar: psicrófilos (por debajo de 25°C), mesófilos (entre 25 y 45°C) y termófilos (entre 45 y 65°C), donde para los rangos mesofílico y termofílico las temperaturas óptimas son de 35°C y 55°C, respectivamente. (Manual de Biogás, 2011).

La velocidad de descomposición de la materia orgánica es proporcional a la temperatura, con lo cuál los procesos termófilos alcanzan la estabilización del sustrato más rápidamente. Sin embargo es usual trabajar con el rango mesofílico debido a que posee ventajas respecto al termófilo debido a la reducción del requerimientos energéticos y una menor sensibilidad a la cargas de choque o sustancias tóxicas, teniendo a su vez un rendimiento sustancialmente superior al psicrófilo. Otro concepto que influencia la selección del rango de temperatura en la que se debe realizar el tratamiento es la temperatura del sustrato con la que sale del proceso productivo (Cardenas et al., 2016).

- **Agitación**

La mezcla facilita el contacto entre los microorganismos y el sustrato, previniendo la acumulación de sustratos inhibidores intermedios (por ejemplo, ácidos grasos) y garantizando las condiciones homogéneas durante el ensayo. La agitación puede ser continua o intermitente y de variada intensidad y su elección puede influir sobre el rendimiento del ensayo. La recopilación de Cardenas et al., (2016) señala que la agitación continua puede dañar las asociaciones sintróficas que se establecen entre los microorganismos y que la producción de CH₄ se reduce cuando se realiza agitación magnética continua, por lo que recomienda utilizar durante los ensayos de BMP agitación manual intermitente.

- **pH y alcalinidad**

El rango de pH para un ensayo de BMP que garantice un buen funcionamiento de los microorganismos acidogénicos y metanogénicos (procesos fundamentales para la degradación del sustrato y la generación de biogás) se encuentra entre 6,8 y 7,4, siendo el pH neutro el ideal (Manual de Biogás, 2011).

Para ajustar el pH se adicionan alcalinizantes, usualmente Na₂CO₃, NaHCO₃ y NaOH. Los carbonatos y bicarbonatos aportan a la capacidad buffer del sistema y son claves para garantizar la neutralización de los AGV's y de ese modo evitar la inhibición de la metanogénesis por acidificación. Por esta misma razón es importante evaluar el pH, AGV's, alcalinidad total (AT) y bicarbonática (AB) del sistema (sustrato e inóculo) en estudio.

- **Solución de nutrientes**

Ciertos macronutrientes (nitrógeno y fósforo), micronutrientes (minerales traza: níquel, hierro, cobalto, molibdeno, selenio, calcio, magnesio, zinc, cobre, manganeso, tungsteno y boro a niveles de mg/L) y vitaminas (e.g. vitamina B12 en niveles de µg/L)

son requeridos para un funcionamiento óptimo de los microorganismos anaeróbicos (Manual de Biogás, 2011). Esto es particularmente importante de tener en cuenta para ciertos sustratos sólidos y granos que suelen tener déficit en algún micronutriente (Angelidaki, et al., 2009). Debido a esto, muchas veces en los test de BMP se adicionan soluciones de nutrientes para garantizar un buen desempeño, y asegurar la comparabilidad del ensayo.

- **Condiciones anaerobias**

A pesar de que aun no existe consenso sobre la purga de oxígeno previa a iniciar el ensayo de BMP, muchas veces se realiza un burbujeo con gases libres de O₂ para generar condiciones anaerobias desde el inicio. Los gases usados son nitrógeno (N₂), dióxido de carbono (CO₂), helio y combinaciones entre ellos, siendo la mezcla mas usada N₂/CO₂ en proporciones de 70-80% y 20-30% respectivamente (Cardenas et al., 2016). Algunos estudios indican que la presencia de CO₂ en la mezcla del gas incrementa la producción de CH₄, mientras que otros, aseguran que la concentración de oxígeno inicial no tiene ningún impacto negativo sobre el proceso.

- **Captura de CO₂**

Para los métodos de BMP volumétricos, suele utilizarse una solución alcalina de NaOH con pH mayor a 12 para garantizar la captura del CO₂ generado por el proceso y de este modo poder medir directamente el CH₄, ahorrando la necesidad de realizar el análisis de la composición de biogás. Con similar objetivo, en los métodos manométricos existen reactores con depósitos de NaOH en perlas, que permiten captar el CO₂ antes de efectuar la lectura de presión.

- **Relación Sustrato/Inóculo y diluciones**

La relación sustrato/inóculo (S/I) se expresa en términos de sólidos volátiles ($\text{gSV}_{\text{Sustrato}}/\text{gSV}_{\text{Inóculo}}$) y en algunos casos en términos de DQO ($\text{DQO}_{\text{Sustrato}}/\text{DQO}_{\text{Inóculo}}$) e indica la relación entre la cantidad de sustrato y biomasa encargada de su degradación. Muchos estudios presentan la relación como I/S lo cual equivale al valor inverso de la relación S/I. Los rangos recomendados por la bibliografía son variados, dependiendo del criterio del autor y la metodología empleada para el ensayo, oscilando generalmente entre 0,5 y 2.

La relación recomendada para cada ensayo depende del tipo de sustrato e inóculo y debe evaluarse en cada caso: mientras menor sea la relación, la masa de microorganismos sera mayor en relación a la masa de sustrato disponible, disminuyendo la posibilidad de inhibición del inóculo por parte del sustrato y acelerando la degradación. En cambio, si la relación es mayor (es decir aumenta la cantidad de sustrato), el riesgo de inhibición aumenta, así como también los tiempos para completar la degradación, sin embargo permite en el diseño de el biodigestor encargado de degradar el sustrato a escala piloto o industrial, un volumen de reactor menor, disminuyendo los potenciales costos. Por lo

tanto es importante encontrar la relación óptima para cada sustrato, considerando la producción potencial de AGV's, capacidad de amortiguamiento y tiempos disponibles.

Para aquellos sustratos que se desconocen sus características al degradarse en condiciones anaeróbicas, deben realizarse varias relaciones S/I o diluciones en simultáneo. Si el resultado de BMP es el mismo para dos series de relaciones o diluciones, puede asumirse que el inóculo no está sobrecargado ni inhibido. Si el potencial continúa aumentando al subir la relación o al diluir (disminución de la concentración del sustrato) se requieren ensayos adicionales (Angelidaki, et al., 2009).

Otro factor de importancia a la hora de determinar la relación y la dilución es la limitante mecánica por parte de los sistemas de mezcla y bombeo a escala industrial. Estos tienen un máximo de sólidos totales (ST) bajo el cual funcionan eficientemente, por lo que para facilitar el posterior escalado del digestor anaeróbico, conviene tener en cuenta dicho criterio al definir las concentraciones del ensayo.

4.1.5 Determinación de BMP

Para evaluar el Potencial Bioquímico de Metano (BMP) del sustrato, el parámetro más significativo es la cantidad de gas producido por gramo de sólidos volátiles añadido (SV). Para un resultado más preciso, es necesario determinar los sólidos volátiles en el reactor y luego trabajar con la diferencia del gas producido por los blancos, tal como se expresa a continuación:

$$\text{Ecuación} \quad mSV_{\text{Reactor}} = \frac{SV_{\text{Sustrato}} \cdot m_s}{100} + \frac{SV_{\text{Inóculo}} \cdot m_i}{100} \quad 4.1$$

$$\text{Ecuación} \quad BMP = \frac{V_s - V_B \cdot \frac{m_i}{m_{iB}}}{mSV_{\text{Reactor}}} \quad 4.2$$

Donde:

mSV_{reactor} es la masa de sólidos volátiles en la mezcla del reactor, expresado en gramos

SV_{Sustrato} es la concentración de sólidos volátiles del sustrato, expresado en % m/m

$SV_{\text{Inóculo}}$ es la concentración de sólidos volátiles del inóculo, expresado en % m/mm_i; es la masa de inóculo agregada en el reactor, expresada en gramos

m_s es la masa de sustrato agregada en el reactor, expresada en gramos

m_i es la masa de inóculo agregada en el reactor, expresada en gramos

m_{iB} es el valor medio de la masa de inóculo colocada en los blancos, expresada en gramos

V_s es el volumen acumulado de metano proveniente del reactor con muestra, expresado en ml

V_B es el valor medio del volumen acumulado de metano proveniente de los blancos, expresado en ml

BMP es el valor normalizado de volumen de metano producido por gramo de sólidos volátiles agregado (Nml/g SV)

Otra manera útil de expresar los resultados obtenidos es expresar la relación entre el volumen de metano acumulado respecto a la cantidad de sustrato utilizado:

4.2 Ecuación
$$Volumen_{CH4\ Productivo} = \frac{(V_s - V_B \cdot \frac{m_i}{m_{iB_s}})}{m_s} * \frac{g * m3}{Ton * ml}$$

Donde:

$Volumen_{CH4\ Productivo}$ es el volumen de metano generado por tonelada de sustrato expresado en Nm³/ ton

V_s es el volumen acumulado de metano proveniente del reactor con muestra, expresado en ml

V_B es el valor medio del volumen acumulado de metano proveniente de los blancos, expresado en ml

m_i es la masa de inóculo agregada en el reactor, expresada en gramos

m_{iB} es el valor medio de la masa de inóculo colocada en los blancos, expresada en gramos

V_s es la masa de sustrato agregada en el reactor, expresada en gramos

4.2 Materiales y métodos

A continuación se exponen los materiales y métodos aplicados para la determinación del Potencial de Biometano del bagazo cervecero del caso de estudio.

4.2.1 Equipo

Para su determinación, el ensayo de BMP del bagazo cervecero se realizó a través de un método volumétrico automático utilizando el equipo AMPTS II (*Sistema de determinación automática de Potencial de Biometano*) de Bioprocess Control.

Este equipo cuenta con tres estaciones o módulos (**Figura 4.2**):

- 1) Sistema de medición de volumen de gas (**Módulo A**)
- 2) Unidad de absorción de CO₂ (**Módulo B**)
- 3) Unidad de incubación de muestras (**Módulo C**).

Su funcionamiento se basa en la medición del número de desplazamientos de las celdas móviles, que vienen calibradas de fábrica, generados por la fuerza de empuje que realiza el gas en un seno líquido presente en el Módulo A. De ese modo puede determinar con gran precisión el volumen de metano liberado, producido en cada uno de los quince reactores que se encuentran ubicados en el baño termostático con los correspondientes sistemas de agitación en el Módulo C. Para impedir el error por exceso sobre el volumen de metano medido debido a la producción de CO₂ y H₂S, el equipo cuenta con el Módulo B, un sistema captador previo conformado por una solución NaOH 3 M, que permite únicamente el paso de CH₄ hacia el equipo medidor de volumen de gas.

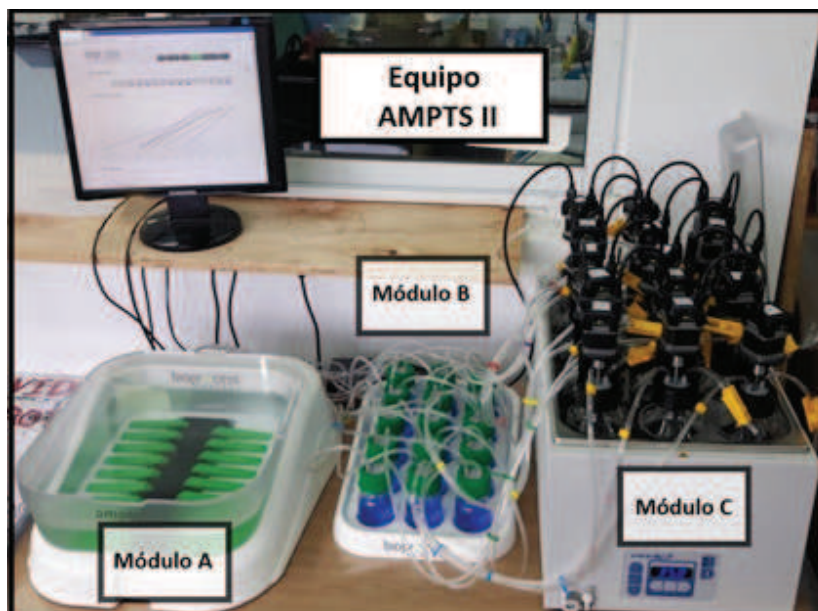


Figura 4.2: Equipo AMPTS II de BioProcess utilizado compuesto por los Módulos A, B y C

4.2.2 Inóculo

El inóculo fue obtenido a partir de un pul form lodos anaeróbicos y lodos crudos provenientes de una planta de tratamiento domiciliarios de Aguas y Saneamientos Argentinos (AySA) y la planta de la cooperativa COMACO, ubicada en Martín Coronado, Provincia de Buenos Aires. Para garantizar su actividad se lo alimentó en un reactor anaeróbico de escala piloto de 18 litros de capacidad y sistema de mezcla continua (**Figura 4.3**), sosteniendo una temperatura de 35°C y una alimentación semicontinua con Acetato de Sodio (NaAc) 12,8 % m/v. Se controló periódicamente alcalinidad total (AT), bicarbonática (AB) y se determinó la relación AGV's/AT para regular la dosis y frecuencia de alimentación. Estas actividades se realizaron durante un lapso total de activación de dos semanas.

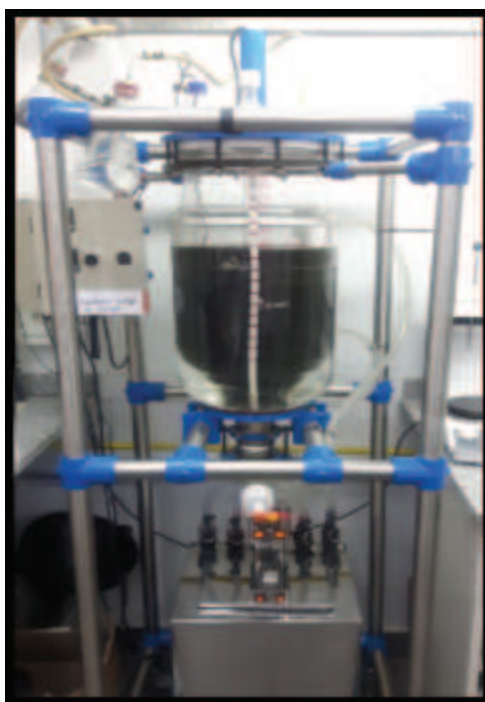


Figura 4.3: Reactor anaeróbico a escala piloto utilizado para activar el inóculo.

Durante la activación se determinó en repetidas ocasiones la concentración de sólidos presente y se realizaron diluciones paulatinas para alcanzar una concentración de sólidos totales menor a la establecida como limitante mecánica de diseño para sistemas de mezcla (<1,2 % m/m ST). Previo al ensayo se dejó desgasificar durante tres días para agotar toda materia orgánica residual biodegradable presente.

4.2.3 Sustrato

El residuo semisólido (bagazo) subproducto proveniente del proceso de macerado, considerado como sustrato en estudio, fue provisto por la Cervecería A proveniente de el proceso usual de preparación de cerveza artesanal del tipo BAPA (Composición de maltas: 60% Pale Ale, 40 % Munich). El bagazo fue recolectado en un envase plástico hermético y refrigerado a 4°C el día previo al comienzo del ensayo para ser utilizado lo más fresco posible.

4.2.4 Pretratamiento

Además de utilizar el bagazo sin ninguna modificación, es decir en crudo (B_C), se realizaron dos tipos de pretratamiento para estudiar la variación de la biodegradabilidad del bagazo bajo distintas condiciones, basadas en las aplicadas por Panjičko et al., (2015): 1) Mecánico (B_M); y 2) Mecánico y ácido-térmico (B_{M+AT})

Para ello se colocaron 100 g de bagazo crudo en 100 g de agua para permitir la mezcla (dilución 1:2 m/m) y se molió en una procesadora/licuadora Moulinex Optimix Plus de 550 Watt durante 60 segundos (B_M , dilución respecto al crudo 1:2). Se separó una porción del bagazo pretratado mecánicamente, se volvió a diluir para permitir una mezcla homogénea (1:2 m/m) y se lo acidificó con Ácido Clorhídrico 37 % m/v hasta alcanzar un pH <2. Luego se lo llevó a 95°C durante 4 hs manteniendo el volumen de la mezcla constante por agregado de alícuotas de agua destilada. Una vez finalizado el tratamiento térmico se llevó la mezcla resultante a pH 7 utilizando una solución de Hidróxido de Sodio 2.5 M (B_{M+AT} , dilución respecto al crudo 1:4) (Ver **Figura 4.4**).



Figura 4.4: Bagazo BAPA crudo (izq.) Bagazo BAPA tratado mecánicamente (cen.) y con posterior tratamiento ácido-térmico (der.)

4.2.5 Caracterización

El día previo al arranque del ensayo de BMP se caracterizaron los sólidos totales, fijos y volátiles, contenido de humedad, demanda química de oxígeno y pH para el inóculo, bagazo y sus dos pretratamientos.

Diversos autores recomiendan también determinar la composición de biogás, la concentración de nitrógeno y relación C/N, así como un ensayo de Actividad Metanogénica Específica (AME) para el inóculo. Sin embargo por limitante de equipos disponibles y tiempo, éstos no pudieron realizarse. Para el análisis y diseño del biodigestor, se adoptarán los valores de nitrógeno y composición del biogás propuestos por la bibliografía consultada.

En la **Tabla 4.2** se observan los valores de ingreso para el ensayo de BMP, obtenidos a partir de cada uno de los criterios expuestos a continuación, basados el manual del equipo y la bibliografía consultada:

- La masa total de la mezcla por reactor es de 400 g.
- Las relaciones S/I seleccionadas fue de 0,5 para B_C (reactores 4-5) y de 0,5 y 1 para tanto B_M (reactores 6-7 y 8-9) como B_{M+AT} (reactores 10-11 y 12-13).
- El control se realizó con Acetato de Sodio (NaAc). La cantidad de NaAc surge a partir del resultado DQO (96,1 g O_2/L) obtenido experimentalmente para la solución 12,8 % m/v de NaAc disponible en el ensayo. Utilizando la relación teórica de 1,07 g DQO/g SV para el NaAc se calculó una concentración teórica de % SV del NaAc de 8,64. A partir de ese valor se decidió una relación S/I de 0,5 g $SV_{NaAc}/g SV_{inóculo}$, obteniendo para el control un valor de ingreso 8,5 g de solución.
- Todos los ensayos y el control se realizaron por duplicado (reactores 4-15).
- Los blancos se realizaron por triplicado (reactores 1-3).
- El porcentaje de sólidos totales de la mezcla para todos los reactores debe ser menor a 1,2% m/m.

Tabla 4.2: Valores de ingreso y de control de criterios establecidos para el ensayo de BMP.

| Reactor | Masa (g) | | | Relación S/I (g SVs/gSVi) | Concentración (gSV/kg) | | % ST en reactor (<1,2%) | Observaciones |
|---------|----------|---------|--------|---------------------------|------------------------|---------|-------------------------|----------------|
| | Sustrato | Inóculo | Mezcla | | Sustrato | Inóculo | | |
| 1-2-3 | 0 | 400 | 400 | | | | 0,75 | Blancos |
| 4-5 | 3,1 | 396,9 | 400 | 0,5 | 1,9 | 3,7 | 0,94 | Bc S/I=0,5 |
| 6-7 | 11,9 | 388,1 | 400 | 1 | 3,7 | 3,7 | 1,11 | BM S/I=1 |
| 8-9 | 6,1 | 393,9 | 400 | 0,5 | 1,9 | 3,7 | 0,93 | BM S/I=0,5 |
| 10-11 | 21,5 | 378,5 | 400 | 1 | 3,6 | 3,6 | 1,10 | BM+AT S/I=1 |
| 12-13 | 11,0 | 389,0 | 400 | 0,5 | 1,8 | 3,7 | 0,93 | BM+AT S/I=0,5 |
| 14-15 | 8,5 | 391,5 | 400 | 0,5 | 0,0 | 3,7 | 0,92 | NaAc (CONTROL) |

Al finalizar el ensayo se midieron nuevamente los valores de pH, ST, SF, SV y DQO para cada uno de los reactores, se dejó sedimentar las mezclas durante 24 hs a fin de lograr la separación del sobrenadante líquido del lodo, (ver **Figura 4.5**) y se midió ST, SF, SV y DQO del sobrenadante para un análisis mas exhaustivo.

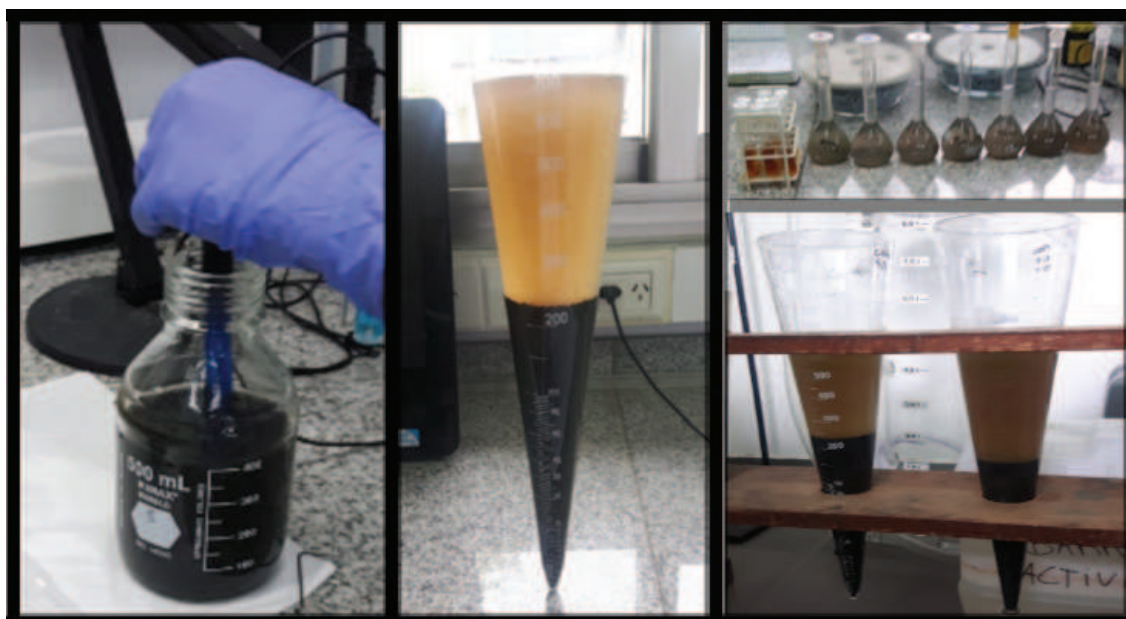


Figura 4.5: Imagen ilustrativa de los ensayos de salida del BMP para la mezcla y el sobrenadante: medición de pH de la mezcla (izq.), sedimentación de lodos (cen. y der. abajo) y diluciones para medir DQO (der. arriba).

4.2.6 Ensayo de Potencial de Biometano

A partir de los valores de ingresos obtenidos (**Tabla 4.2**) y utilizando el equipo AMPTS II, se prepararon 15 trenes de ensayo compuestos por reactores de 500 ml, con un volumen de inóculo + sustrato de aproximadamente 400 ml (**Figura 4.6**) y sus respectivos

cabezales con motor y agitador. Los reactores se conectaron individualmente a las correspondientes botellas de absorción de CO₂ de 100 ml, con un contenido de 80 ml de solución NaOH 3M y solución indicadora Timolftaleína (Módulo B). Se llevó cada reactor a a pH 7,0 y se colocaron en el baño térmico (Módulo C). Por último se configuró una temperatura de ensayo de 35°C y agitación discontinua de 80 segundos cada 30 minutos a 160 rpm (40 seg en sentido horario y 40 seg en sentido antihorario). Se revisaron las conexiones para evitar cualquier fuga indeseada de biogás y se inició el ensayo.



Figura 4.6: Imagen ilustrativa de la carga del reactor con el sustrato (izq.) y con el posterior llenado del inóculo (der.).

El volumen de metano generado fue registrado de forma automática por el Módulo C del equipo AMPTS II, el cuál contabiliza los pulsos de metano generado por medio de la elevación de sus piezas móviles en el seno líquido, producto de la fuerza de empuje del gas obtenido, y registra dichos valores haciendo la conversión directa a volumen de CH₄ producido por unidad de tiempo.

Se estableció como criterio de finalización de la contabilización de metano una generación mínima de **5 Nml CH₄/día** (valor recomendado por el Manual del equipo AMPTS II). Luego de 18 días se dió por finalizado el test de BMP.

4.3 Resultados

4.3.1 Caracterización inicial

Los resultados de las caracterización inicial del bagazo crudo, bagazo pretratado mecánicamente, bagazo con pretratamiento mecánico, ácido y térmico e inóculo activado y diluido, utilizados a su vez para los calcular los valores de ingreso del BMP previamente expuestos, se presentan en la **Tabla 4.3**.

Tabla 4.3: Resultados caracterización inicial previa al ensayo de BMP

| Caracterización Inicial | | | Resultados | | | |
|----------------------------------|--------|-----------------------|--------------|------------|-------------------|---------|
| Parámetro | Unidad | Método | Bagazo Crudo | Bagazo Mec | Bagazo Mec+Ter+Ac | Inóculo |
| pH | - | PEF 19.33* | 5,40 | 6,12 | 7,04 | 8,11 |
| Sólidos totales (ST) | % m/m | SM 21° ed. Mét 2540 G | 25,35 | 12,67 | 7,14 | 0,75 |
| Sólidos fijos (SF) | % m/m | SM 21° ed. Mét 2540 G | 0,85 | 0,42 | 0,49 | 0,38 |
| Sólidos Volátiles (SV) | % m/m | SM 21° ed. Mét 2540 G | 24,50 | 12,25 | 6,65 | 0,38 |
| Humedad | % m/m | SM 21° ed. Mét 2540 G | 74,65 | 87,33 | 92,86 | 99,25 |
| Demanda Química de Oxígeno (DQO) | g/kg | PEF 19.01* | 163,3 | 81,7 | 76,3 | 6,5 |

*Procedimiento Especifico para determinación, protocolo de uso interno del INTI basado en SM 21° ed.

4.3.2 Producción de metano

A continuación se detallan los resultados obtenidos por el ensayo de Potencial de Biometano realizado para el bagazo cervecero sin pretratar, sus dos pretratamientos y los correspondientes controles y blancos. También figuran los valores de remoción obtenidos a partir de la comparación de los parámetros obtenidos previa y posteriormente al ensayo.

- **Consideraciones generales**

De acuerdo con la descripción del ensayo, se midió volumen de metano generado durante el periodo de producción, dando inicio el 10/10/19 y finalizando el 28/10/19.

Los blancos liberaron metano diariamente por encima de los 5 Nml CH₄ pautados sólo durante el primer día, los controles durante los dos primeros días y los ensayos con bagazo crudo y sus correspondientes pretratamientos durante un rango de 6 a 11 días. Es importante remarcar que el ensayo para todos los reactores se finalizó a los 18 días de haber iniciado el experimento, lapso durante el cual no se observó, en ninguno de los casos, un repunte en la producción de metano una vez traspasado el piso de 5 Nml CH₄/día. En todos los casos los picos de generación de CH₄ ocurrió durante el primer día, y fueron disminuyendo su producción paulatinamente.

Todos los duplicados y triplicados obtuvieron resultados con una variación aceptable dentro del rango <10%, a excepción del B_{M+AT} con una relación S/I de 0,5 (reactores 12 y 13), donde la diferencia de volumen total acumulado entre los duplicados fue del 13,4 %.

Las curvas de generación de metano acumulado para el bagazo crudos, los bagazos pretratados y el control presentan sus valores directos, es decir, sin la sustracción correspondiente del metano aportado por el inóculo, para el caso de las **Figuras 4.7 a 4.13**, al igual que entre las **Tablas 4.1a y 4.5a** presentes en el **Anexo**. La corrección se realiza a partir de la **Tabla 4.4** y subsiguientes.

Debido a que sólo se realizó la relación S/I de 0,5 para el B_C , se vieron limitadas las comparaciones de remoción del bagazo crudo respecto a sus dos pretratamientos con S/I =1. Esto se decidió previo al ensayo, debido a la limitación en el número de reactores y tiempo disponible, y a la hipótesis de que la biodegradabilidad del bagazo crudo esperada fuera significativamente menor a la de los bagazos pretratados, lo cuál no resulto de este modo.

- **Blancos**

Los reactores 1, 2 y 3 que solo contenían inóculo, tuvieron una producción de metano baja y de corta duración (solo liberaron metano durante el primer día del ensayo), con un total promedio de 24 Nml CH_4 (ver **Figura 4.7** y **Tabla 4.1a** en **Anexos**). El resultado fue predecible debido a que corrobora la baja la influencia de la biomasa sobre el volumen de metano generado en ausencia de un sustrato, indicando que la degasificación del inóculo previa al ensayo se realizó correctamente.

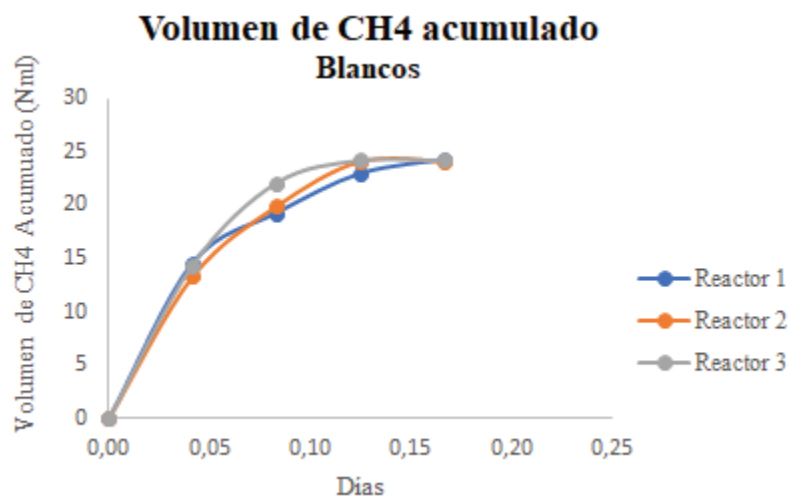


Figura 4.7: Volumen de metano acumulado - Blancos

- **Bagazo sin pretratamiento**

El bagazo crudo (B_C) con relación de $S/I=0,5$ (reactores 4 y 5) generó en promedio un total de 232,0 Nml de CH_4 en un período de 6-7 días (ver **Figura 4.8** y **Tabla 4.2a** en **Anexos**).

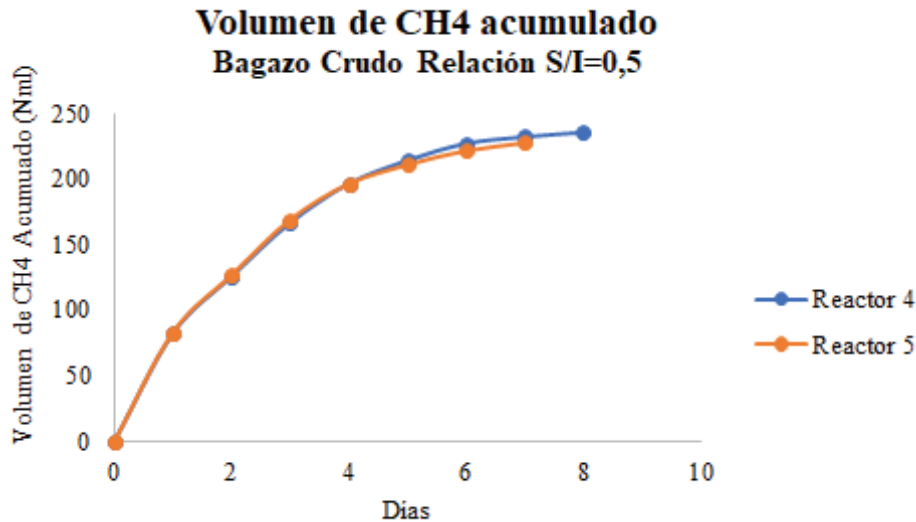


Figura 4.8: Volumen de metano acumulado - Bagazo Crudo relación 0,5

- **Bagazo con pretratamiento mecánico**

El bagazo procesado mecánicamente (B_M) con relación de $S/I=1$ (reactores 6 y 7) generó en promedio un total de 434,9 Nml de CH_4 en un período de 6-11 días (ver **Figura 4.9** y **Tabla 4.3a** en **Anexos**), mientras que el bagazo con el mismo pretratamiento en relación $S/I=0,5$ (reactores 8 y 9) produjo un promedio de 227,1 Nml de CH_4 durante un período de 6 días (ver **Figura 4.10** y **Tabla 4.3a** en **Anexos**).

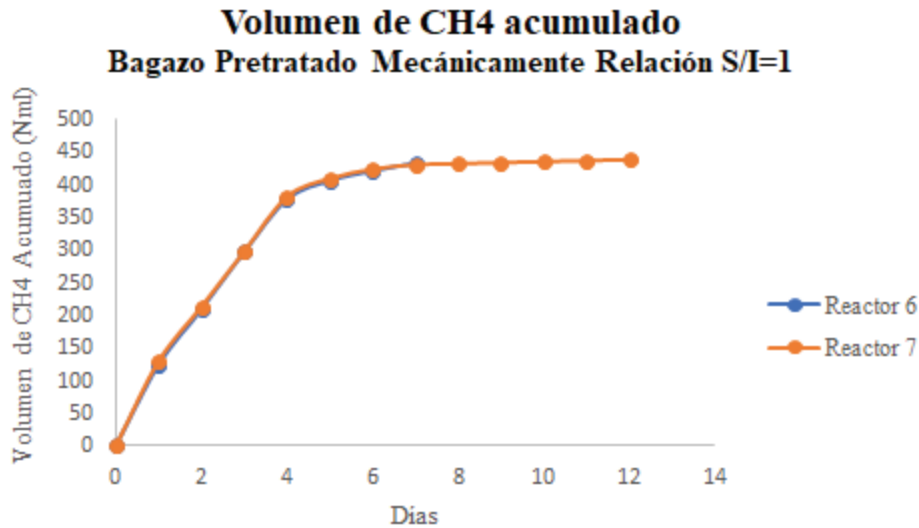


Figura 4.9: Volumen de metano acumulado - Bagazo pretratado mecánicamente relación 1

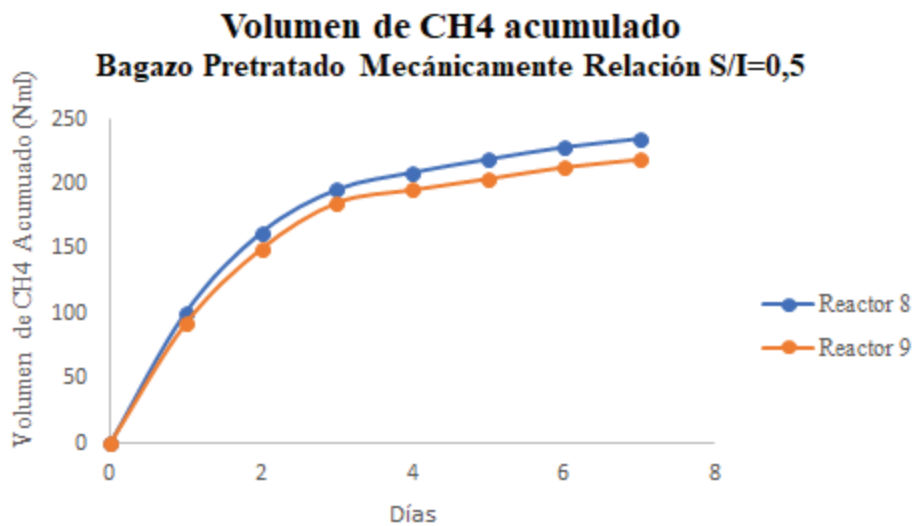


Figura 4.10: Volumen de metano acumulado - Bagazo pretratado mecánicamente relación 0,5

- **Bagazo con pretratamiento mecánico y ácido-térmico**

El bagazo con pretratamiento mecánico y posterior tratamiento térmico a 95°C en condiciones ácidas de $\text{pH} < 2$ ($\text{B}_{\text{M+AT}}$) con relación de S/I=1 (reactores 10 y 11) generó un promedio de 440,2 Nml de CH₄ en un período de 10 días (ver **Figura 4.11** y **Tabla 4.4a** en **Anexos**), mientras que el bagazo con el mismo pretratamiento en relación S/I=0,5 (reactores 12 y 13) produjo un promedio de 233,8 Nml de CH₄ durante un período de 8 días (ver **Figura 4.12** y **Tabla 4.4a** en **Anexos**).

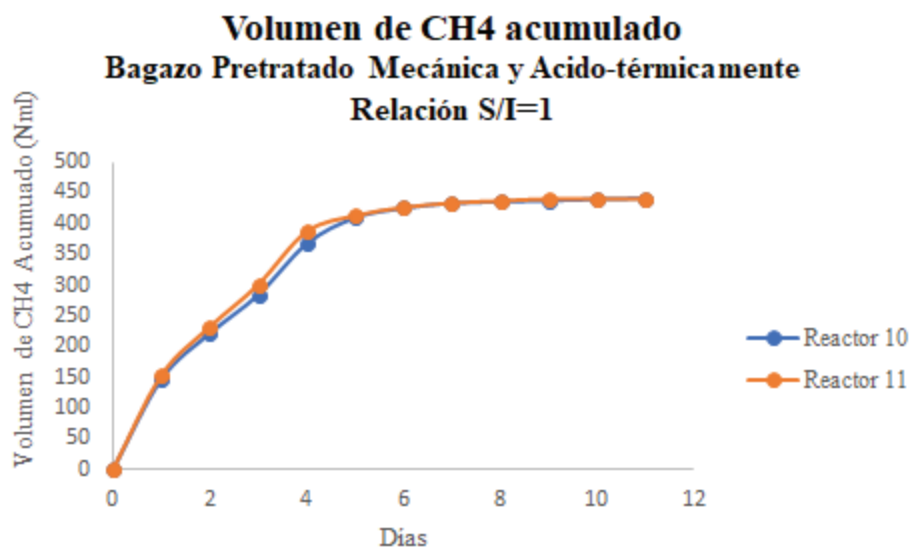


Figura 4.11: Volumen de metano acumulado - Bagazo pretratado mecánicamente y ácido-térmicamente relación 1

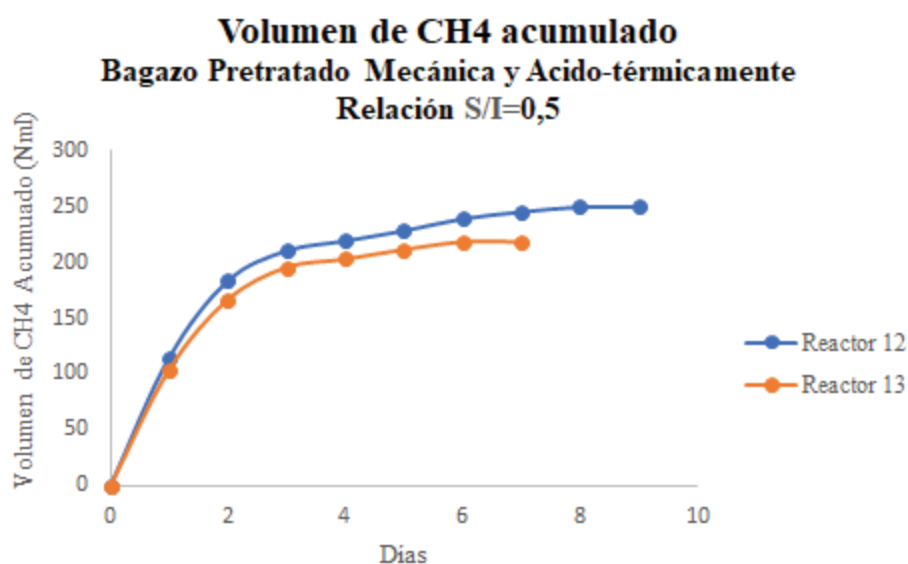


Figura 4.12: Volumen de metano acumulado - Bagazo pretratado mecánicamente y ácido-térmicamente relación 0,5

- **Control**

El control de Acetato de Sodio (reactores 14 y 15) produjo en promedio un total de 221,4 Nml de CH₄ durante los dos primeros días del ensayo (ver **Figura 4.3** y **Tabla 4.5a** en **Anexos**).

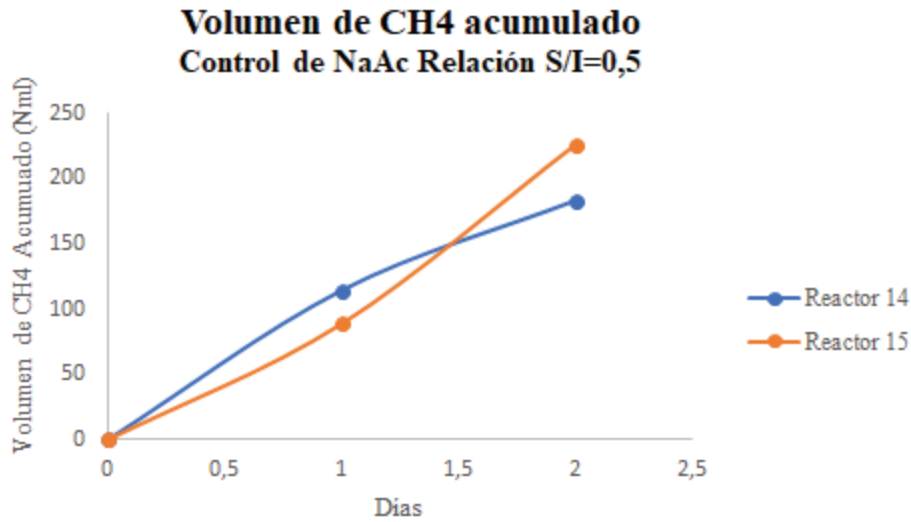


Figura 4.13: Volumen de metano acumulado - Control

A continuación en la **Tabla 4.4** se resumen los resultados obtenidos y la corrección del volumen aportado por el inóculo correspondiente:

Tabla 4.3: Resumen de resultados obtenidos con corrección de volumen del ensayo de BMP.

| Reactor | Tiempo de generación | Volumen acumulado de CH4 | Volumen acumulado de CH4 por sustrato (corregido) |
|-----------------|----------------------|--------------------------|---|
| | | | Nml |
| Unidad | Día | Nml | Nml |
| Blanco | 1 | 24 | - |
| Bc S/I=0,5 | 8 | 232 | 208 |
| BM S/I=1 | 10 | 436 | 412 |
| BM S/I=0,5 | 7 | 227 | 203 |
| BM+AT S/I=1 | 11 | 441 | 418 |
| BM+AT S/I=0,5 | 8 | 234 | 210 |
| Control S/I=0,5 | 2 | 221 | 198 |

4.3.3 pH

La acidez se midió al inicio del ensayo y al finalizarlo. Los valores obtenidos para cada reactor se indican en la **Tabla 4.6a** presente en el **Anexo**. Se observó un ligero aumento del pH en todos los reactores, pasando de la neutralidad inicial a pH entre 7,5 y 8,0 una vez finalizado el proceso. A pesar de que no se pudo medir la acidez durante el proceso, los resultados probablemente sean indicio de que la amortiguación del sistema fue suficiente, y no hubo inhibición de los microorganismos metanogénicos por exceso de AGV's o NH_3 .

4.3.4 Sólidos y Demanda química de Oxígeno

Para conocer la capacidad degradativa del proceso anaeróbico sobre el bagazo cervecero se determinaron los sólidos y demanda química de oxígeno antes y después del ensayo, así como también para el sobrenadante producto de la sedimentación del lodo obtenido.

Se realizó la sedimentación para conocer el grado de remoción del proceso en caso de que se decida realizar una separación de fases en el tratamiento propuesto en los siguientes capítulos. Se incluyen en el **Anexo** los valores de lodos y sobrenadante generados para cada ensayo (ver **Tabla 4.7a**).

Por una cuestión de practicidad no se midieron los valores de DQO de la mezcla de inóculo y sustrato previa al arranque del ensayo, sino de éstos por separado, por lo cual los valores de DQO de entrada son una estimación a partir de los resultados obtenidos.

Los valores de ST y SV obtenidos se encuentran en la **Tabla 4.8a** en el **Anexo**. La disminución de los SV (referencia aproximada de la materia orgánica presente en la muestra) fue de un 20,4% para \mathbf{B}_C , 41,0 y 24,4% para \mathbf{B}_M con relación S/I de 1 y 0,5 respectivamente y de 37,6 y 59,0% para \mathbf{B}_{M+AT} con S/I de 1 y 0,5. Los blancos presentaron una remoción promedio de sólo 1,9%.

Los valores obtenidos para DQO se encuentran en la **Tabla 4.9a** en el **Anexo**. La disminución de DQO durante el ensayo fue de 12,0% para \mathbf{B}_C , de 7,8 y 11,3 % para el \mathbf{B}_M con relación S/I de 1 y 0,5 respectivamente y de 35,0 y 11,7% para \mathbf{B}_{M+AT} con S/I de 1 y 0,5.

En todos los casos se observa una disminución de SV y DQO, siendo generalmente superior para la relación S/I=1, indicando que el inóculo no presentó inhibición por parte del sustrato y que la degradabilidad aumenta a mayor disponibilidad de SV aportados por el bagazo. Cabe destacar que la remoción de SV de los blancos fue baja, demostrando la baja influencia del inóculo en la variación de la materia orgánica presente en el propio inóculo.

Respecto a los tipos de pretratamientos, hay una clara mejoría en la remoción de SV de el bagazo con pretratamiento. La máxima remoción corresponde, con un 35,9%, al

B_{M+AT} respecto al B_C (20,4%) y al B_M (24,4%) para la misma relación de S/I. Sin embargo, esta mejoría no se observa en el análisis de DQO donde los resultados para la S/I=0,5 son muy similares, oscilando todos entre un 11,3 a 12,0%.

4.3.5 Potencial de biometano (BMP)

A partir de los cálculos desarrollados en este capítulo en la **Sección 4.1.5**, se obtuvieron los siguientes resultados de BMP (ver **Tabla 4.5**):

Tabla 4.5: Valores de BMP y volumen de metano productivo para el bagazo cervecero y sus dos pretratamientos en relaciones de S/I de 0,5 y 1.

| Sustrato | Relación S/I | BMP | Volumen de CH4 |
|--|---------------------|-------------|---------------------------------|
| Unidad | (g SVs/gSVi) | (Nml/g SVs) | (Nm ³ /ton sustrato) |
| Bagazo sin pretratamiento (B_C) | 0,5 | 274 | 67,1 |
| Bagazo con pretratamiento mecánico (B_M) | 1 | 283 | 69,3 |
| | 0,5 | 272 | 66,6 |
| Bagazo con pretratamiento mecánico y ácido-térmico (B_{M+AT}) | 1 | 293 | 77,8 |
| | 0,5 | 288 | 76,5 |

La producción de metano fue similar para todos los ensayos con valor de BMP máximo obtenido de 293 Nml CH₄/gSV_{sustrato} y un volumen de metano productivo de 77,8 Nm³/ton_{sustrato} para B_{M+AT} con relación S/I=1.

El B_C obtuvo un total de 274 Nml CH₄/gSV_{sustrato} y un volumen de metano productivo de 67,1 Nm³/ton_{sustrato} en una relación S/I=0,5 y el B_M obtuvo su valor más alto en la relación S/I=1 con un total de 283 Nml CH₄/gSV_{sustrato} y un volumen de metano productivo de 69,3 Nm³/ton_{sustrato}.

Los ensayos realizados con una relación de sustrato/inóculo igual a 1, presentaron una leve mejoría con respecto a la relación 0,5, indicando que los microorganismos no sufrieron bajo inhibición e por parte del sustrato, condictiendo con los resultados obtenidos para pH, sólidos y DQO.

Los valores de BMP y volumen de metano productivo del bagazo cervecero obtenidos se encuentran dentro del rango expuesto por la bibliografía en la **Sección 4.1.2**.

La diferencia de potenciales de biometano para el bagazo pretratado mecánicamente y ácido-térmicamente y el bagazo pretratado solo mecánicamente respecto al bagazo sin pretratamiento fue sólo del 6,7% y 3,2%.

4.4 Conclusiones del ensayo de BMP

El ensayo se realizó adecuadamente sin presentar inconvenientes. Se obtuvieron los valores de BMP para el bagazo cervecero crudo y sus dos pretratamientos, así como también los valores de remoción de sólidos y DQO del proceso a escala laboratorio.

Los valores obtenidos de volumen de metano productivo son relevantes y habilitan el estudio de prefactibilidad técnico y económico para el aprovechamiento energético del bagazo cervecero a través del diseño y escalado de un biodigestor anaeróbico.

Respecto a los beneficios en la aplicación de pretratamientos, corroborando lo expuesto por Panjičko (2015), tanto el pretratamiento mecánico (B_M) como el mecánico y ácido-térmico (B_{M+AT}) del bagazo, presentaron mejoras en la remoción, BMP y volumen de metano productivo respecto al bagazo sin pretratar (B_C). Esto cumple con la hipótesis de que los pretratamientos aumentan el acceso al material lignocelulósico que compone el bagazo cervecero por parte de los microorganismos, facilitando su hidrólisis y degradación. Al igual que en las investigaciones de Bochmann (2015) y Panjičko (2017), esta mejoría fue poco significativa, no justificando los costos asociados a el uso a nivel industrial de pretratamientos de esta clase, dejando como mejor opción la biodigestión directa del bagazo sin pretratar.

A lo largo del tratamiento se observaron mejoras en los parámetros indicadores de materia orgánica. Sin embargo el grado de remoción fue bajo, mejorando considerablemente luego de la sedimentación. De todos modos, los valores del sobrenadante obtenido no son suficientes para cumplir con la normativa de vuelco sin un tratamiento previo. A esto se suma la necesidad de un análisis y toma de decisión respecto a los lodos generados. Estos resultados eran de esperarse dado que los criterios y condiciones operacionales fueron seleccionados en pos de optimizar la generación de metano y no de la remoción de materia orgánica.

Según los estudios sobre el tratamiento del bagazo cervecero a distintas relaciones S/I presentados por Fernandez, et al., (2001), la descomposición del bagazo ocurre en dos etapas: la primera es donde ocurre la hidrólisis de los compuestos más solubles presentes en el bagazo, tales como azúcares y otras sustancias de fácil degradación, lo que se traduce en un alto pico inicial en la producción de biogás y su posterior disminución. En la segunda etapa ocurre cuando la generación de metano vuelve a aumentar lentamente debido a que la digestión de los metabolitos mas complejos toma lugar. Los picos de generación de CH_4 en el presente trabajo, ocurrieron durante los primeros 2-5 días de tratamiento y luego la producción disminuyó hasta detenerse sin observarse ningún

repunte, lo cuál indica que probablemente la estabilización del bagazo durante el ensayo de BMP no se haya completado.

La falta de un segundo aumento en la generación de metano durante los ensayos ocurridos puede explicarse por varios motivos: 1) las bajas relaciones S/I utilizadas; 2) una duración del ensayo insuficiente; 3) la alimentación a base de NaAc durante la activación (el NaAc estimula el desarrollo de los microorganismos metanogénicos, pero no de el resto de los involucrados en la digestión anaeróbica, ver **Sección 5.1**); 4) la falta de adaptación previa del inóculo al sustrato. La suma de estos eventos puede haber provocado una baja actividad hidrolítica por parte de los microorganismos, ocasionando que la actividad del inóculo fuera insuficiente para digerir los compuestos mas complejos durante el lapso del ensayo, impidiendo así, la estabilización completa del sustrato.

Estas razones implican potencialmente que si se aumentan la relación S/I y los tiempos de retención, y a su vez, se utiliza un inóculo adaptado al bagazo cervecero, el BMP sea superior al resultado obtenido en el presente informe, dejando abierta la posibilidad de ejecutar futuros ensayos para obtener resultados más precisos. Debido a que realizar otro ensayo de BMP bajo otras condiciones operacionales escapa a los alcances del presente proyecto, y que los resultados obtenidos entran dentro del rango esperado, se procede a utilizar los valores obtenidos para el diseño y escalado del biodigestor planteado.

CAPÍTULO 5

Planta de generación de biogás

La digestión anaeróbica es un proceso biológico en ausencia de oxígeno donde muchos grupos de microorganismos interactúan para convertir materia orgánica compleja (residuos animales y vegetales) en biogás, es decir, una mezcla de CO_2 (30% a 45%) y CH_4 (55% a 70%), con ligeras trazas de otros compuestos, y posee un contenido energético equivalente a 0,60-0,65 litros de petróleo por m^3 de biogás (Manual de Biogás, 2011).

En la digestión anaerobia un 90% de la energía disponible por oxidación directa se transforma en biogás, consumiéndose sólo un 10% de la energía en crecimiento bacteriano, comparado a un proceso aeróbico que consume un 50% de la energía en generar biomasa, provocando un gran volumen de lodos.

La respiración anaeróbica puede utilizar como aceptores de electrones al CO_2 , SO_4^{2-} o NO_3^- y la energía liberada al generar metano es mucho mayor a la que se produce durante la fermentación anaeróbica (proceso donde el sustrato es metabolizado anaeróbicamente utilizando la propia materia orgánica como dador y aceptor de electrones, provocando que el sustrato sea parcialmente oxidando y conserve una parte de la energía como ocurre, por ejemplo, en la transformación de glucosa en etanol).

El proceso de la digestión anaeróbica puede dividirse en dos etapas: la primera un grupo de bacterias facultativas y anaeróbicas convierten, a través de hidrólisis y fermentación, los compuestos orgánicos complejos (carbohidratos, proteínas y lípidos) en compuestos orgánicos más simples, principalmente ácidos grasos volátiles (AGV's), y también dióxido de carbono e hidrógeno. La segunda etapa, los ácidos orgánicos y el hidrógeno se convierten en metano y dióxido de carbono. Esta transformación ocurre a través de un grupo de microorganismos denominados metanogénicos. Estos microorganismos anaeróbicos procariontes dependen del sustrato provisto por los microorganismos formadores de ácidos, lo que provoca una relación sintrófica.

Cuando ocurre la digestión anaeróbica en un sistema de alta carga orgánica, no sólo se produce biogás, sino también lodos digeridos o semidigeridos según la etapa del proceso. La composición del biogás y del lodo digerido dependen del material digerido, el tipo de tecnología utilizada y del funcionamiento del proceso. Las propiedades específicas del biogás se indican en la **Tabla 5.1**. En el caso del lodo digerido, el contenido de materia orgánica es menor al de las materias primas originales y aumentando el contenido de nitrógeno amoniacal y disminuyendo el nitrógeno orgánico.

Tabla 5.1: Características generales del biogás. Extraído de: Manual de Biogás, 2011.

| Características generales del biogás | |
|---|--|
| Composición | 55-70% CH ₄ |
| | 30-45% CO ₂ |
| | Trazas de H ₂ O, O ₂ , N ₂ , NH ₃ y H ₂ S |
| Contenido energético | 6,0-6,5 kWh/m ³ |
| Equivalente de combustible | 0,60-0,65 L petróleo/m ³ biogás |
| Límite de explosión* | 6-12% de biogás en aire |
| Temperatura de ignición* | 650-750 °C |
| Presión crítica* | 74-88 atm |
| Temperatura crítica | -82,5°C |
| Densidad normal | 1,2 kg/m ³ |
| Olor** | Huevo podrido |
| Masa molar | 16,043 kg/kmol |

*Para el rango de composición de CH₄ mencionado. **Si se realiza la desulfuración el olor del biogás es imperceptible.

5.1 Proceso de tratamiento anaeróbico

La digestión anaeróbica involucra un gran número de microorganismos y reacciones bioquímicas muchas de las cuales ocurren en simultáneo, haciendo de éste un proceso muy complejo. Para una mayor comprensión y facilitar su estudio, el proceso puede dividirse en cuatro etapas:

1. Hidrólisis
2. Etapa fermentativa o acidogénica
3. Etapa acetogénica
4. Etapa metanogénica

En la **Figura 5.1** se muestra esquemáticamente las distintas etapas del proceso de digestión anaeróbica, los microorganismos que intervienen en cada una de ellas y los productos intermedios generados. A continuación se describen brevemente cada una de las etapas:

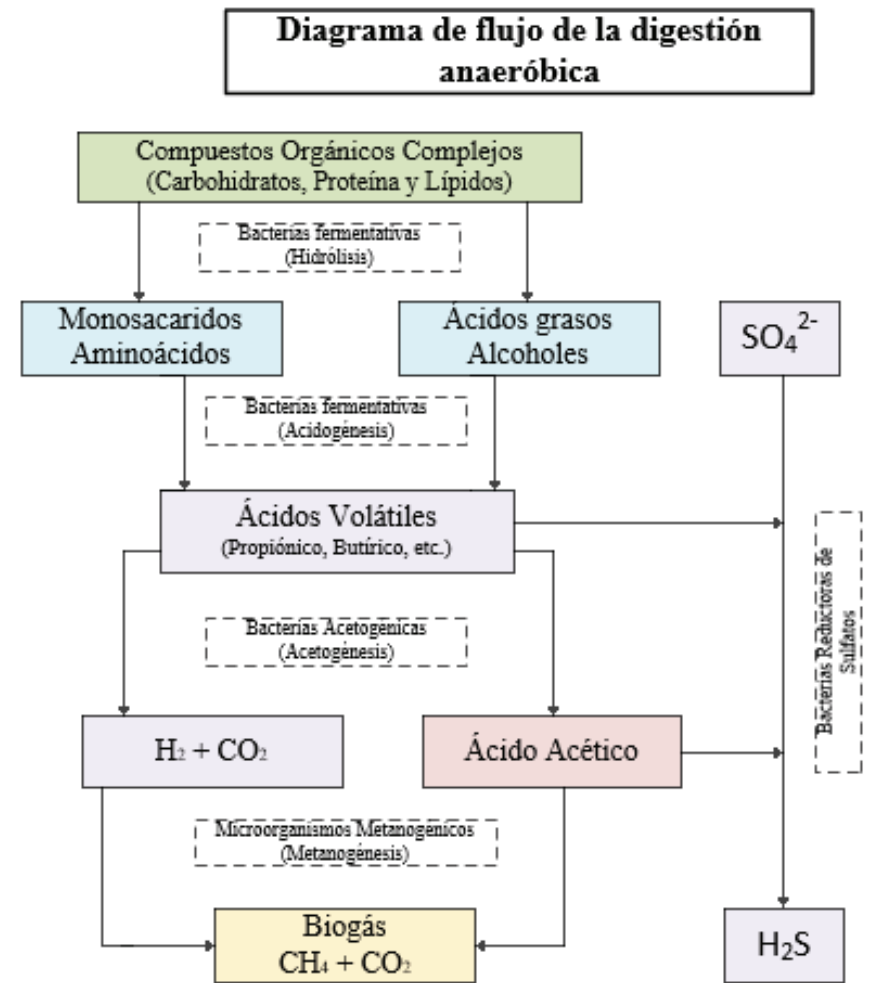


Figura 5.1: Diagrama de flujo general del proceso de digestión anaeróbica. Elaboración propia

5.1.1 Hidrólisis

Los compuestos orgánicos complejos, tales como hidratos de carbono, proteínas y lípidos son descompuestos a sustancias menos complejas como aminoácidos, azúcares y ácidos grasos. Esta etapa es fundamental para que la materia orgánica en forma de grandes polímeros, se hidrolice en forma de compuestos solubles de menor tamaño, y de ese modo, pueda ser accesible como sustrato para las bacterias fermentativas presentes en las siguientes fases.

La hidrólisis de estas moléculas complejas es llevada a cabo por la acción enzimática extracelular de microorganismos hidrolíticos y en el proceso proporciona sustratos orgánicos para la digestión anaeróbica. Debido a esto, la hidrólisis puede ser la etapa limitante en la cinética global del proceso principalmente cuando se tratan residuos con alto contenido de sólidos. Su eficiencia también depende de la temperatura, el tiempo de retención hidráulico, la composición del sustrato (porcentaje de lignina, carbohidratos,

proteínas y grasas), el diámetro de las partículas, el pH, cantidad de NH_4^+ presente y la concentración/acumulación de los productos de la hidrólisis.

La velocidad de degradación de los materiales lignocelulósicos compuestos principalmente por lignina, celulosa y hemicelulosa, es tan lenta que suele ser el factor limitante durante esta etapa. Esto se debe a que la lignina es muy resistente a la degradación por parte de los microorganismos anaeróbicos, aunque su degradación mejora con la temperatura. El tamaño de partículas influye durante esta etapa debido a la disponibilidad de superficie para la actividad enzimática. Los pretratamientos fisicoquímicos sobre el sustrato producen un aumento en la tasa de hidrólisis, debido principalmente, a la reducción del tamaño de las partículas, y en el caso de que esta fase fuera la limitante del proceso, supone un beneficio a todo el proceso, generando menores tiempos de retención y tamaños de reactores menores.

5.1.2 Acidogénesis

Por medio de las bacterias fermentativas acidogénicas, los compuestos intermediarios productos de la hidrólisis son metabolizados en el interior de las células en forma de ácidos grasos de cadena corta (ácido acético, propiónico, butírico, etc.), dióxido de carbono e hidrógeno. Adicionalmente se forman pequeñas cantidades de ácido láctico y alcoholes. La importancia de esta etapa radica no solo en el hecho de que produce el alimento para los grupos de microorganismos que actúan posteriormente sino que, además, eliminan todo rastro de oxígeno disuelto en el sistema.

5.1.3 Acetogénesis

Durante esta fase ocurre la formación mayoritaria de los sustratos precursores del biogás (ácido acético, hidrógeno y dióxido de carbono) a través de la oxidación de los productos de acidogénesis, tales como etanol, ácidos grasos volátiles y algunos compuestos aromáticos. Las bacterias acetogénicas son parte de un proceso metabólico intermedio que produce el sustrato necesario para los microorganismos metanogénicos.

En el proceso, una gran cantidad de hidrógeno es formada debido a la oxidación. El balance de la concentración de hidrógeno del medio acuoso es decisiva. Una concentración muy elevada impide la conversión de los compuestos intermediario de la acidogénesis y la consecuencia es la inhibición de la metanogénesis debido a la acumulación de compuestos ácidos (ácido propiónico, butírico, etc.).

Por esa razón, las bacterias productoras de hidrógeno deben estar estrechamente asociadas a las bacterias metanogénicas quienes para producir metano consumen hidrógeno y dióxido de carbono (transferencia intraespecífica de hidrógeno) garantizando un medio propicio para las acetogénicas, impidiendo el exceso de acumulación de los AGV's.

5.1.4 Metanogénesis

Los microorganismos encargados de esta etapa están compuestos por un amplio grupo de bacterias anaeróbicas estrictas, que actúan sobre los productos resultantes de las etapas anteriores y se dividen en dos grupos principales:

1) Los metanogénicos acetoclásticos producen biometano del ácido acético, metanol y algunas metilaminas y son encargados de producir cerca del 70% del metano producido por la digestión anaeróbica debido a la descarboxilación de ácido acético. Algunos de los microorganismos presentes en este grupo poseen filamentos claves para la formación de la textura presente en los gránulos

2) Los metanogénicos hidrogenotróficos producen metano a partir de hidrógeno y dióxido de carbono, y en algunos casos de ácido fórmico y son claves para mantener el balance de la digestión anaerobia, debido a que son los responsables de consumir el hidrógeno producido en las fases anteriores.

5.1.5 Reducción de sulfatos

Adicionalmente, durante la digestión anaeróbica las denominadas bacterias reductoras de sulfatos utilizan los sulfatos y sulfitos presentes en el medio como aceptor de electrones durante la oxidación de la materia orgánica. Este proceso es importante durante los procesos anaeróbicos, debido al producto final, el sulfuro de hidrógeno, el cual es el responsable principal en la generación de olores molestos.

Este versátil grupo de microorganismos puede descomponer en condiciones de anaerobiosis los ácidos grasos volátiles, muchos ácidos aromáticos, hidrógeno, glicerol, etanol, azúcares, aminoácidos y muchos compuestos fenólicos. Este proceso es indeseado en los biodigestores debido a que compiten por el sustrato disponible con los microorganismos acidogénicos, acetogénicos y metanogénicos, disminuyendo la eficiencia en la producción de biogás. Por lo cual es especialmente importante de tener en cuenta para aquellos sustratos que poseen una alta concentración de sulfatos y sulfitos presentes.

5.2 Condiciones y parámetros operacionales

Para aumentar la eficiencia en la producción de metano en los sistemas anaeróbicos, se requiere un cuidadoso monitoreo de las condiciones operacionales dentro del biodigestor. Los microorganismos, en especial los metanogénicos, son muy susceptibles a cambios en las condiciones del sistema al que se encuentran expuestos. Algunas de estas condiciones son: temperatura, tipo de sustrato, nutrientes, pH y alcalinidad, tiempo de retención hidráulico, toxicidad y condiciones redox. Estas condiciones se detallan a continuación:

5.2.1 Temperatura

La velocidad de reacción de los procesos biológicos de degradación y transformación dependen de la velocidad de crecimiento de los microorganismos involucrados que a su vez, depende de la temperatura. A medida que aumenta la temperatura se acelera el proceso de digestión, dando lugar a una mayor producción de biogás.

La temperatura de operación del digestor es uno de los principales parámetros de diseño, debido a su gran influencia sobre los tiempos de retención. En función de la temperatura, existen tres grandes grupos de microorganismos anaeróbicos (**Figura 5.2**): psicrófilos (por debajo de 25°C), mesófilos (entre 35 y 45°C) y termófilos (entre 45 y 65°C).

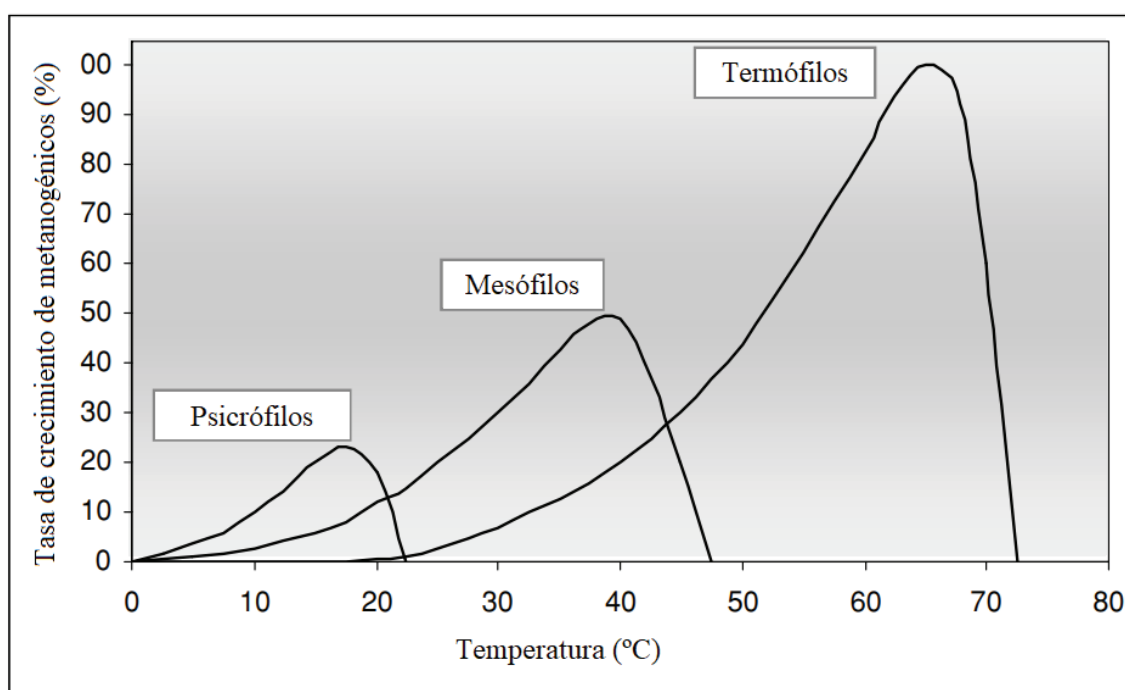


Figura 5.2: Influencia de la temperatura en el crecimiento de la biomasa de microorganismos metanogénicos. Fuente: Chernicharo, (2007).

Dentro de cada rango de temperatura de cada grupo de microorganismos, hay un intervalo para el cual la velocidad máxima específica de crecimiento (μ_{max}) es máxima, determinando de ese modo los valores de temperatura de trabajo óptima para un biodigestor (**Tabla 5.2**).

Tabla 5.2: Rangos de temperatura mínimos, óptimos y máximos según el tipo de microorganismo. Adaptado de: Manual de Biogás (2011) & GIZ (2010).

| Tipo de microorganismos | Temperatura (°C) | | | Tiempo de estabilización (días) |
|-------------------------|------------------|--------|--------|---------------------------------|
| | Mínimo | Óptimo | Máximo | |
| Psicrófilos | 4-10 | 15-18 | 20-25 | >100 |
| Mesófilos | 15-30 | 35-37 | 40-45 | 30-60 |
| Termófilos | 25-45 | 50-60 | 65-80 | 10-15 |

El régimen termofílico es quien posee la velocidad de degradación más alta, así como también, un aumento en la eliminación de organismos patógenos debido a las altas temperaturas. Sin embargo, justamente por esta razón, implica mayores costos energéticos y aumentan los problemas de inhibición del proceso debido a la mayor toxicidad de ciertos compuestos (amoníaco y ácidos grasos de cadena larga).

Los biodigestores mesofílicos son los más comunes ya que a rangos de temperatura entre 35 y 40°C permite rendimientos relativamente elevados y proporciona una buena estabilidad del proceso.

Por otra parte, el rango psicofílico es poco común debido a los problemas de viabilidad debido al gran tamaño de reactor necesario. Sin embargo, presenta menores problemas de estabilidad que en los otros rangos de temperatura de operación.

Un aspecto importante a tener en cuenta es evitar las variaciones de temperatura brusca, ya que pueden acarrear la inhibición de los microorganismos, y en muchos casos, provocar la desestabilización del proceso en formas irreversibles. Debido a esto, es imprescindible asegurar una temperatura homogénea en el sistema a través de una adecuada agitación, aislamiento y control de temperatura. Según el Manual de Biogás (2011), para lograr un óptimo funcionamiento del biodigestor, se recomienda que el tratamiento anaeróbico se diseñe para que opere con variaciones de temperatura que no excedan los 0.6 – 1.2 °C /día.

5.2.2 Características del Sustrato

A pesar de que prácticamente toda la materia orgánica es capaz de producir biogás al ser sometida a fermentación anaeróbica, la calidad y cantidad del biogás producido dependerán de la composición y la naturaleza del residuo utilizado en términos de nutrientes, micronutrientes, relación de sólidos, humedad.

- **Nutrientes y micronutrientes**

Los niveles de nutrientes deben de estar por encima de la concentración óptima para las metanobacterias, ya que ellas se inhiben severamente por la falta de éstos. El proceso microbiológico anaeróbico requiere para la síntesis de biomasa, fuentes de carbono y

macronutrientes, es decir nitrógeno y fósforo, así como también, ciertas sales minerales en concentraciones traza (mg/L) que contengan azufre, fósforo, potasio, calcio, magnesio, hierro, manganeso, molibdeno, zinc, cobalto, selenio, tungsteno, boro y níquel. Usualmente los lodos cloacales y estiércoles presentan estos elementos en las proporciones adecuadas. Sin embargo, otros tipos de residuos utilizados como sustratos de la digestión pueden requerir la adición de compuestos o otros sustratos, que compensen el déficit de nutrientes y micronutrientes.

El carbono y nitrógeno son las principales fuentes de alimento de las bacterias anaeróbicas. El carbono es mayoritariamente la fuente de energía y el nitrógeno es utilizado para la formación de nuevas células. Las bacterias metanogénicas consumen 30 veces más carbono que nitrógeno, por lo que la relación óptima de C/N en el sustrato se considera en el rango de 20:1 a 30/1. Si la relación C/N es mayor a 30/1, es decir para materiales con alto contenido de carbono y bajo nitrógeno, la descomposición ocurre más lentamente debido a que el crecimiento de la biomasa se ve limitado por el nitrógeno, pero el tiempo de producción de biogás es más prolongado. En cambio con una relación C/N menor a 8/1, se inhibe la actividad microbiana debido a la formación de amonio en exceso. Por otra parte, la demanda de fósforo puede aproximarse correspondiendo entre un 1/5 a 1/7 de la demanda de nitrógeno.

- **Sólidos**

El porcentaje de sólidos totales (ST) y la humedad presentes en la mezcla dentro del biodigestor es un factor importante a considerar para que el proceso ocurra satisfactoriamente. Cuanto mayor sea la concentración de sólidos, más afectada se verá la movilidad de las bacterias metanogénicas, y por lo tanto su acceso al sustrato, afectando la eficiencia y producción de biogás. Según el Manual de Biogás (2011), la carga total en digestores semicontinuos no debe tener más de un 8% a 12 % ST y para los digestores discontinuos entre un 40 a 60% de sólidos totales. Por lo cual, es imprescindible conocer el porcentaje de ST presentes en el sustrato fresco, para calcular el volumen de agua que debe adicionarse al sustrato y así alcanzar la proporción adecuada de ST en el biodigestor.

5.2.3 Tiempo de retención

El **tiempo de retención hidráulico (TRH)** indica el lapso de tiempo medio que permanece dentro del biodigestor el líquido/sustrato hasta que sale del mismo. Su valor es equivalente a la relación entre el volumen del reactor y el caudal que ingresa en el mismo:

Ecuación

$$TRH \text{ (días)} = \frac{\text{Volumen del Reactor (m}^3\text{)}}{\text{Caudal de ingreso (m}^3\text{/día)}}$$

5.1

En un digestor que opera a régimen estacionario, batch o “discontinuo”, el THR es el que transcurre entre la carga del sistema y su descarga. En un sistema de carga diaria (régimen semicontinuo), el tiempo de retención va a determinar el volumen diario de carga que será necesario para alimentar al digestor.

Generalmente para reactores anaeróbicos se trabaja con tiempos de retención entre 20 y 55 días y con cargas diarias de 1 a 5 kg de sólidos totales por metro cúbico de digestor. Por lo tanto, mientras menor sea el tiempo de retención, el tamaño del digestor se reduce y también los costos.

El valor de TRH esta ligado a la temperatura del tratamiento. La selección de una mayor temperatura implicará una disminución en los tiempos de retención requeridos y una disminución del volumen de reactor necesario para digerir el volumen de residuos. Se debe analizar la relación costo beneficio al seleccionar la temperatura y TRH óptimas para el sistema, ya que influyen directamente sobre los volúmenes, sistemas de control, calefacción y eficiencia del proceso.

En función al tipo de sustrato, generalmente los materiales con mayor proporción de carbono retenido en moléculas resistentes como la celulosa, hemicelulosa y lignina, demandarán mayores tiempos de retención para poder ser totalmente digeridos. Al aumentar el TRH, aumenta el grado de materia orgánica degradada, así como la producción de metano, aunque este último valor comenzará a disminuir una vez alcanzado la concentración de biomasa óptima.

El **tiempo de retención celular** (θ_c) o también denominado tiempo de retención celular, es el tiempo promedio que las bacterias pasan dentro del digestor. Si el biodigestor no tiene recirculado de biomasa, el tiempo de retención celular y TRH son iguales. Si hay recirculación, es decir retención de la biomasa, el θ_c es mayor al TRH para garantizar que la biomasa dentro del reactor es máxima, acelerando los tiempos de descomposición de la materia orgánica y la producción de metano.

Debido a que el tiempo necesario para duplicar una población de bacterias metanogénicas es mucho mayor al requerido por bacterias facultativas u otras bacterias anaeróbicas, típicamente el θ_c de un digestor anaerobio en el rango mesofílico debe ser mayor a 12 días, aunque este valor depende mucho del tipo de reactor utilizado. El θ_c no es afectado por la naturaleza del sustrato, a menos que presente cierta toxicidad para la población bacteriana. En el caso de los sistemas de alimentación continua o semicontinua de mezcla completa sin recirculación, o para los sistemas discontinuos, el tiempo de retención deberá ser suficientemente largo como para asegurar el crecimiento de la población bacteriana.

La **velocidad de carga orgánica (VCO)** indica la cantidad de materia orgánica en forma de sustrato introducida diariamente en el reactor por unidad de volumen, siendo directamente dependiente de la concentración de sustrato y del tiempo de retención fijado.

En ausencia de inhibidores, altas cargas orgánicas proporcionan altas producciones volumétricas de biogás aunque también aumenta el riesgo de sobrecargas puntuales que conllevan a la inestabilidad del reactor.

5.2.4 pH y Alcalinidad

El proceso anaeróbico puede ser afectado adversamente por pequeños cambios en el pH cuando se encuentra fuera del rango óptimo. Los microorganismos metanogénicos son más susceptibles a las variaciones de pH que otros microorganismos de la comunidad microbiana anaeróbica. Al igual que sucede con la temperatura, los distintos microorganismos anaeróbicos requieren diferentes niveles de pH para su desenvolvimiento óptimo. Para las bacterias hidrolíticas y acidogénicas el pH ideal es entre 5,2 y 6,3, en cambio, los microorganismos acetogénicos y metanogénicos pueden operar en un rango de pH entre 6,2 y 8,0 siendo el ideal para las metanogénicas entre 7,8 y 8,2.

Debido a que las bacterias hidrolíticas y acidogénicas son significativamente menos sensibles a valores más extremos de pH que las metanogénicas, no dependen estrictamente de su rango óptimo, pudiendo operar en presencia de valores de pH ligeramente más elevados, presentando una leve disminución de su actividad. Por lo tanto, el pH óptimo para una actividad mixta se encuentra en el rango entre 6,8 y 7,4, siendo generalmente de común acuerdo utilizar pH neutro.

Para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el pH no debe bajar de 6.0 ni subir por encima de 8,0. El valor del pH en el digestor no sólo determina la producción de biogás sino también su composición. Una de las consecuencias de que se produzca un descenso del pH a valores inferiores a 6 es la disminución de la actividad de las bacterias metanogénicas, provocando un biogás muy pobre en metano disminuyendo sus cualidades energéticas (ver **Figura 5.3**).

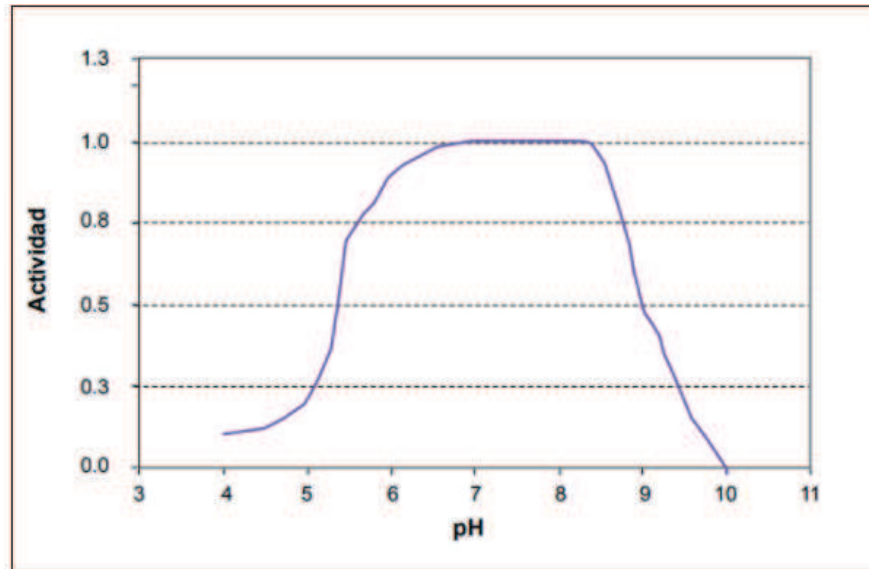


Figura 5.3: Actividad de microorganismos metanogénicos en función del pH. Fuente: Manual de biogás (2011).

Los valores de pH bajos reducen la actividad de los microorganismos metanogénicos, provocando la acumulación de ácido acético y H_2 . El H_2 inhibe las bacterias que degradan el ácido propiónico y butírico generando una excesiva acumulación de ácidos grasos volátiles de alto peso molecular (AGV's). Esto causa una baja en la producción de ácido acético, lo que genera una disminución de pH que, en caso de no corregirse, provocará una eventual falla del proceso. Por otra parte, al aumentar el pH por encima de 8,0 se favorece la transformación de amonio en amoníaco que, en elevadas concentraciones, es inhibidor del crecimiento microbiano disminuyendo drásticamente la actividad metanogénica.

El pH de un sistema anaeróbico, operando dentro de los rangos aceptables, es controlado principalmente por la alcalinidad natural del sistema. La destrucción de la materia orgánica principalmente las proteínas, liberan amoníaco, el cuál reacciona con el dióxido de carbono presente para producir bicarbonato de amonio, el cuál a su vez, aporta a la alcalinidad. Sólo los residuos que presentan altos contenidos de nitrógeno orgánico (e.g. proteínas) pueden contribuir adecuadamente a la alcalinidad. Cuando los AGV's comienzan a acumularse en el reactor anaeróbico, estos son neutralizados por la alcalinidad presente en el reactor y mantienen el pH estable.

Si en un proceso anaeróbico ocurre la caída del pH causada debido a la excesiva acumulación de (AGV's) y/o dióxido de carbono, una de las primeras opciones para resolverlo es reducir la tasa de carga orgánica volumétrica hasta el punto en el cual los AGV's se consuman más rápido de lo que se generan. Una vez que el exceso de AGV se ha agotado, el pH del sistema retorna a los rangos de operación normales y la metanogénesis comienza a repuntar. La carga orgánica volumétrica puede incrementarse gradualmente a medida que el proceso se recupera, hasta completar la capacidad de carga. En circunstancias extremas, además de la disminución de la carga orgánica volumétrica,

para mantener el pH óptimo en el reactor, se puede agregar Na_2CO_3 , NaHCO_3 , NH_4OH ó NaOH .

5.2.4 Tóxicos e inhibidores

La inhibición de la producción de biogás del proceso puede ocasionarse por varios factores. Generalmente esto ocurre debido a la presencia de sustancias inhibitoras que pueden bajar la eficiencia del proceso y en altas concentraciones, detener la digestión por completo. Es importante diferenciar los inhibidores aportados por el sustrato, de los subproductos intermediarios originados durante la actividad metabólica de los microorganismos anaeróbicos. Los metales pesados, compuestos halogenados, cianuro y fenoles, forman parte del primer grupo, en tanto que, sulfuro, amoníaco y ácidos grasos de cadena larga, forman parte del último grupo mencionado. La concentración misma del sustrato puede resultar inhibitoria del proceso debido también a los antibióticos, herbicidas, pesticidas, solventes o desinfectantes que acarrea consigo, así como también que muchos de los nutrientes y micronutrientes esenciales del proceso pueden volverse tóxicos a elevadas concentraciones.

Debido a que la respiración anaeróbica tiene etapas realizadas por microorganismos estrictamente anaeróbicos, el oxígeno es un tóxico más del proceso donde concentraciones de 0,1 mg/l son inhibitoras. En la **Tabla 5.3** se presentan valores de concentraciones de ciertos inhibidores comunes. Estos valores se deben tomar como orientativos, puesto que las bacterias anaeróbicas son capaces de adaptarse, desarrollarse e incluso degradar muchos de los compuestos tóxicos si reciben la aclimatación adecuada.

Tabla 5.3: Principales inhibidores de la digestión anaeróbica. Adaptado de: Manual de Biogás (2011), Guía Práctico do Biogás (2010) & Guía Teórico-Práctica sobre el Biogás y los Biodigestores (2019).

| Inhibidor | Concentración de inhibición | Observaciones |
|---------------------------------|--|--|
| Oxígeno | > 0,1 mg/l O ₂ | Inhibe los microorganismos anaeróbicos estrictos |
| Sulfuro de Hidrógeno | > 50 mg/l H ₂ S | A menor pH, aumenta efecto inhibitorio |
| Ácidos grasos volátiles (AGV's) | > 2000 mg/l Hac (pH=7,0) | A menor pH, aumenta efecto inhibitorio. Alta adaptabilidad de las bacterias |
| Nitrógeno Amoniacal | > 3500 mg/l NH ₄ ⁺ (pH=7,0) | A mayor pH, aumenta efecto inhibitorio. Alta adaptabilidad de las bacterias |
| Metales Pesados | Cu > 50-100 mg/l Zn > 150 mg/l Cr > 100-200 mg/l Ni > 200-500 mg/l | Solo influyen aquellos que estan solubles. Descontaminación por precipitación de sulfatos. Los microorganismos pueden adaptarse. Umbrales de toxicidad estimativos. |
| Otros | SO ₄ > 5,0 g/l NaCl > 40 g/l Na > 3,5-5,5 g/l Ca > 2,5-4,5 g/l Mg > 1,0-1,5 g/l K > 2,5-4,5 g/l NO ₃ - > 50 mg/l CN- > 25 mg/l ABS* > 20-40 mg/l Pesticidas, herbicidas, antibióticos, etc. | Los microorganismos pueden adaptarse. Umbrales de toxicidad estimativos. |

* Detergente Sintético

A continuación se desarrollan brevemente los principales inhibidores de la digestión anaeróbica:

- **Ácidos grasos volátiles**

Los ácidos grasos volátiles (AGV's) son los productos intermedios mayoritarios del proceso anaeróbico y es uno de los parámetros indicadores de la evolución del proceso más eficaz debido a su rápida respuesta ante las variaciones del sistema. Durante la degradación anaeróbica, la materia orgánica compleja es hidrolizada y fermentada en compuestos de bajo peso molecular, incluyendo ácidos grasos de cadena corta (entre 2 y 6 átomos de carbono). Estos incluyen al ácidos acético, propiónico y butírico y en menores cantidades ácidos isobutírico, valérico, isovalérico y caproico.

Cuando un sistema anaeróbico trabaja en condiciones óptimas, la concentración de AGV's es relativamente baja y se encuentra entre los 50-250 mg HAc/l (Manual de Biogás, 2011). Cuando la relación simbiótica entre acidogénicos y metanogénicos se rompe, los AGV's se acumulan. Los microorganismos metanogénicos pueden inhibirse debido a la toxicidad (sulfuro, amoníaco, metales pesados, compuestos orgánicos sintéticos, etc.), cambios en las condiciones del sistema (pH, temperatura) o déficit de nutrientes, y provocar una acumulación de ácido acético e hidrógeno. Una presión parcial de hidrógeno elevada, inhibe las bacterias acetogénicas que utilizan los AGV's como sustrato, resultando en su acumulación. La presencia en exceso de AGV's en formas no ionizadas inhibe a su vez a los microorganismos metanogénicos, provocando la desestabilización del sistema y una consecuente disminución en la producción de biogás.

- **Hidrógeno**

El hidrógeno es también un compuesto intermedio importante del proceso anaeróbico. Su acumulación en el sistema causa la inhibición de la acetogénesis y, en consecuencia, la acumulación de AGV's.

- **Nitrógeno amoniacal**

El nitrógeno amoniacal es un nutriente importante esencial para el crecimiento microbiano, sin embargo una concentración excesiva puede limitar su crecimiento. El nitrógeno amoniacal es la suma del ión amonio (NH_4^+) y del amoníaco (NH_3). Ambas especies se encuentran en equilibrio químico, y la concentración relativa de cada una depende del pH. De las dos especies, la que parece inhibir el proceso es el amoníaco libre ya que varios estudios comprobaron experimentalmente que el efecto inhibitorio por amonio aumenta a pH alcalino. Además del pH, la cantidad de amoníaco libre depende de la concentración del sustrato, de la relación C/N, de la alcalinidad del sistema y de la temperatura en la que el proceso se lleva a cabo.

El nitrógeno amoniacal se encuentra presente en las materias primas que ingresan al biodigestor o son generados durante la degradación anaeróbica de compuestos orgánicos nitrogenados tales como proteínas o aminoácidos. Aquellos residuos que contengan mayores proporciones de proteínas u otros compuestos nitrogenados son los sistemas que presentan mayor riesgo de inhibición por parte del amonio.

- **Sulfatos y sulfuros**

El exceso de sulfato en el sistema afecta el desempeño óptimo de la biodigestión anaeróbica por dos motivos. El primero se debe a que las bacterias sulfo-reductoras compiten contra las metanogénicas por los mismos sustratos (acetato e hidrógeno), siendo más eficientes en su termodinámica y cinética, lo cuál provoca una disminución en la composición de metano en el biogás y un aumento en los valores de ácido sulfhídrico. El segundo motivo es que los sulfuros solubles son un inhibidor para muchos grupos bacterianos. El sulfuro puede producirse durante la degradación de materia orgánica que contiene azufre (proteínas). Los microorganismos metanogénicos son los primeros en inhibirse, comenzando a partir de una concentración de 50 mg/l, si los microorganismos

no se encuentran aclimatados a los sulfuros. La forma más tóxica para los metanogénicos corresponde al H₂S (especie no ionizada), por lo que la inhibición se favorece a pH y temperaturas bajos.

- **Cationes y metales pesados**

Los cationes metálicos alcalinos y alcalinotérreos tienen un efecto benéfico en la actividad de los microorganismos a bajas concentraciones. A partir de ciertos niveles de concentración, pueden causar toxicidad disminuyendo la velocidad de crecimiento. La toxicidad aumenta conforme lo hace el peso atómico, por lo que los metales pesados provocan mayor toxicidad a menor concentración. El orden de toxicidad de los metales pesados es Zn < Pb < Cr < Cu < Ni.

Los niveles de inhibición varían en función de varios factores. Si el catión es introducido en el biodigestor de forma gradual, los microorganismos se adaptan y el efecto tóxico es menor. Los metales con alta solubilidad presentan más problemas para el proceso que aquellos más insolubles ya que aumenta el acceso a los microorganismos. Por el mismo motivo, la presencia de sulfuros disminuye la toxicidad por parte de los cationes metálicos debido a que forma con ellos sulfuros insolubles (con excepción del Cromo). Cuando aparecen elevadas concentraciones de varios cationes al mismo tiempo, el análisis del efecto es más complejo debido a que algunos actúan antagónicamente, reduciendo la toxicidad y otros actúan sinérgicamente aumentando la inhibición.

5.2.5 Inoculación inicial

El crecimiento de los microorganismos puede dividirse en cuatro etapas: la fase latente o lag, fase exponencial, fase estacionaria o de estabilización y fase de decaimiento (**Figura 5.4**). Todo biodigestor al arrancar pasa por las dos primeras fases de crecimiento hasta alcanzar su punto óptimo. El tiempo de arranque depende de las condiciones ambientales, el tipo y edad del inóculo utilizado y la masa de microorganismos inicial presentes en el reactor. Si el sistema no posee recirculado, también ocurren las fases estacionarias y de decaimiento si el tiempo es suficiente.

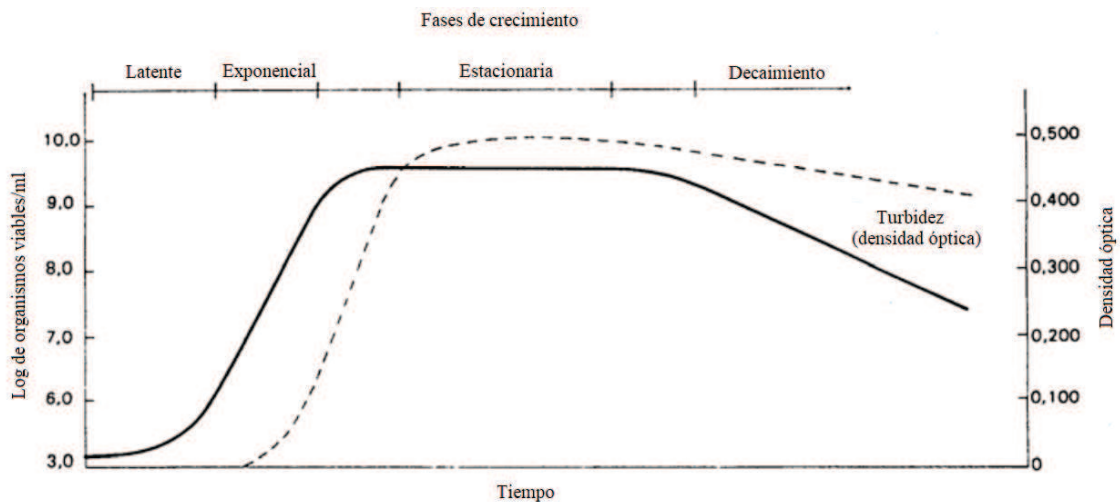


Figura 5.4: Curva de crecimiento típica de población bacteriana.

Para acortar los tiempos necesarios para que el biodigestor alcance los valores óptimos de microorganismos, puede acelerarse la primer etapa mediante la inclusión de un determinado porcentaje de material de otro biodigestor rico en bacterias metanogénicas que se encuentran en plena actividad y, de ser posible, adaptadas al tipo de sustrato. Esto es muy beneficioso en especial en los biodigestores discontinuos que deben ser arrancados frecuentemente. De esta forma se alcanza más rápidamente la etapa de estabilización en la cual incrementa la producción de biogás por masa de sustrato. Mientras mayor sea la proporción del inóculo y menor su edad, mayor será la eficacia en alcanzar los valores óptimos de generación.

5.2.6 Agitación - Mezcla

A pesar de que algunos modelos sencillos de biodigestores no incluyen un sistema de mezcla, ésta aporta numerosos beneficios al proceso, disminuyendo los tiempos de retención, el volumen de reactor necesario y por lo tanto los costos económicos asociados, así como disminuye el riesgo de numerosos problemas operativos.

Una buena agitación aumenta la producción de biogás debido principalmente a cuatro razones: 1) Facilita la remoción de los metabolitos producidos por las bacterias metanogénicas y la distribución uniforme de la temperatura. 2) Evita la formación de costras dentro del biodigestor y espacios “muertos” sin actividad biológica que disminuyen el volumen efectivo del reactor. 3) Previene la acumulación de espumas en la parte superior del biodigestor, que dificultan el intercambio gaseoso. 4) Unifica la densidad bacteriana previniendo la sedimentación del reactor, aumentando su acceso al sustrato fresco y a los metabolitos intermedios de la digestión.

Es importante seleccionar cuidadosamente el tipo de agitación, su frecuencia e intensidad debido a que el proceso anaeróbico involucra un equilibrio simbiótico entre los grupos de microorganismos. Una agitación excesiva impide un intercambio armonioso

entre los complejos celulares, disminuyendo el rendimiento del reactor y aumentando los costos del proceso. Por otro lado, una agitación pobre trae asociado numerosos problemas operativos que alteran el buen rendimiento del sistema.

Existen tres tipos de mezcla: mecánica, a través de agitadores manuales o motores eléctricos; Hidráulica, a través de bombas de flujo lento que recirculan la biomasa y por burbujeo de biogás que recircula el biogás producido al fondo del biodigestor por medio de cañerías, para producir burbujeo y de esta manera movimiento de la biomasa.

5.2.7 Tipo de alimentación

El régimen de alimentación de un biodigestor determina en gran parte la disponibilidad de sustrato por parte de los microorganismos, impactando de ese modo la generación de biogás. Los tipos de alimentación se clasifican en discontinua o batch, semi-continua y continua.

La alimentación continua suele ser utilizada frecuentemente en los tratamientos de aguas domésticas donde siempre hay una entrada constante de efluente. Esta técnica consiste en alimentar constantemente el digestor, permitiendo que opere de forma continua y siempre se encuentre lleno, sólo requiriendo su vaciado para realizar reparaciones. Se caracteriza por producciones uniformes de biogás y un uso eficiente de su volumen. Sin embargo, la operación en continuo es compleja y el riesgo de desestabilizar el proceso es mucho mayor.

La alimentación semi-continua actúa de modo similar a la continua, con la diferencia de que el proceso de carga de sustrato ocurre una o dos veces por día. Esto permite breves lapsos de tiempo sin alimentación lo que aumenta la estabilidad del sistema, así como también el uso más amplio de sustratos.

Los reactores con alimentación discontinua tienen la particularidad de que la biomasa y el sustrato son cargados en su totalidad al inicio y no es retirado ningún efluente hasta completar el proceso de biodigestión.

5.3 Etapas de una planta de biogás

Una planta de biogás puede dividirse a modo general en cuatro etapas de procesamiento diferentes. La primera se relaciona con el manejo del sustrato previo a la digestión, es decir, la recolección, almacenamiento, preparación y pretratamientos, transporte y alimentación. La segunda implica la digestión anaeróbica propiamente dicha, en la cual se degrada el sustrato en ausencia de oxígeno, convirtiéndolo en digestato y generando en simultáneo biogás. La tercera etapa abarca el digerido resultante, su concentración, separación entre fases sólida y líquida y su aplicación o disposición. La cuarta y última etapa implica el tratamiento, almacenamiento, conducción y uso del biogás. En la **Figura 5.5** se muestra el proceso general en mayor detalle:

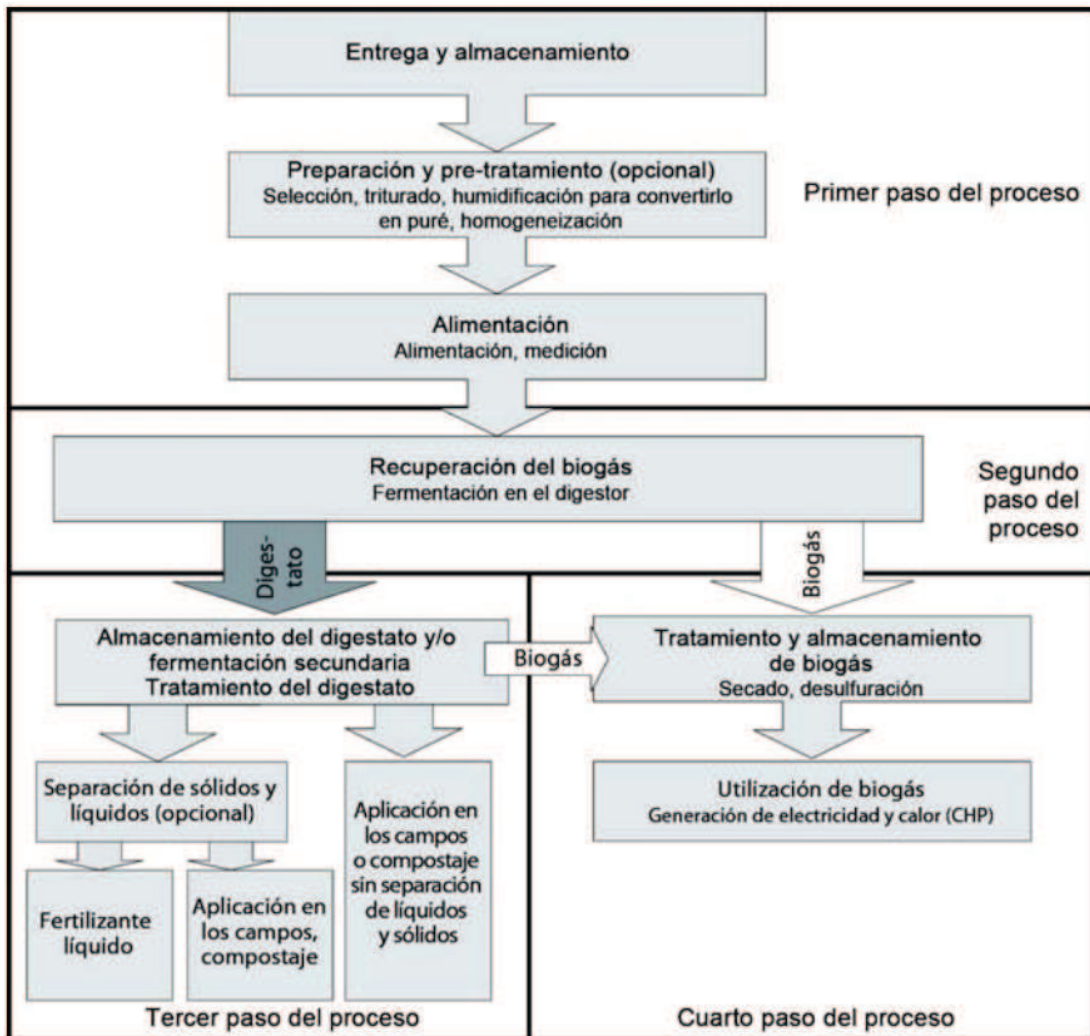


Figura 5.5: Diagrama general de la ingeniería de proceso en una planta o sistema de biogás. Fuente: GIZ, 2010.

Los componentes principales de una planta de biogás pueden dividirse en aquellos pertenecientes a las cuatro etapas descritas. La selección del equipo utilizado para procesar el sustrato depende principalmente de la naturaleza de estos. La selección y diseño de las tecnologías y dimensiones de las plantas de biogás se basan principalmente

en las cantidades de sustrato (ST, SS, SV, DQO, DBO, etc) en términos de la ingeniería del proceso. Muchas veces, dependiendo del sustrato, puede ser necesario eliminar sustancias que interfieran en el proceso, realizar pretratamientos que faciliten su descomposición o diluir para obtener una mezcla apta para el bombeo y mezcla eficiente.

5.3.1. Etapa 1: Pretratamiento

Las instalaciones de pretratamiento tienen como finalidad acondicionar, homogeneizar y ecualizar las cantidades de sustrato necesarias para alimentar el biodigestor. Su diseño depende del sustrato utilizado, la capacidad del biodigestor, el tipo de alimentación, la generación del sustrato en el proceso productivo, así como posibles interrupciones en la operación.

Estas instalaciones deben ser lo más herméticas posibles para disminuir la presencia de malos olores y el ingreso de oxígeno en la mezcla, lo cual favorece la iniciación de la degradación anaeróbica del sustrato al ingresar en el biodigestor. La homogenización y acondicionamiento del sustrato con respecto al contenido del biodigestor es un concepto fundamental a tener en cuenta: las grandes fluctuaciones de carga, cambios en la composición del sustrato, acidez, temperatura y concentraciones de oxígeno requieren que los microorganismos se adapten a las variaciones, lo que genera normalmente caídas en el rendimiento de producción de biogás y calidad del digerido. Si es necesario, se deben ajustar los valores de temperatura, pH, alcalinidad, concentración de sólidos y tamaño de partícula en los tanques de pretratamiento a los valores óptimos de funcionamiento del biodigestor anaeróbico.

5.3.3. Etapa 2: Digestión Anaeróbica

Luego del pretratamiento, la mezcla acondicionada utilizada como sustrato ingresa en el biodigestor donde se descompone en condiciones de anaerobiosis. Los biodigestores son el dispositivo principal donde ocurre la degradación del sustrato, obteniendo biogás y digerido como productos. En términos generales, consisten en un tanque de forma cilíndrica (también existen rectangulares, cubicos u ovoides), herméticos, térmicamente aislados, con sistemas de calentamiento y mezcla adecuados y sistemas de salida para los digeridos y biogás producidos. Pueden estar contruidos por diversos materiales, como hormigón, acero inoxidable, plástico reforzado con fibra de vidrio, membranas de PVC, entre otros (Manual de Biogás, 2011).

5.3.3. Etapa 3: Tratamiento y disposición del digerido

Los lodos producidos por el proceso anaeróbico pueden, en ciertos casos, ser utilizados como fertilizante con muy buenos resultados. Sin embargo, esta opción está sujeta a el desarrollo de la normativa con respecto a partir de qué parámetros está

permitido su aplicación sobre suelos, y el análisis de costos de transporte dados por la distancia entre el punto de generación del digerido y los campos a fertilizar. En caso de que no sea posible utilizarlo como fertilizante, se debe separar la fase líquida del digerido de la fase sólida o lodos biológicos, donde el efluente líquido se descargará en un sistema receptor, y los lodos se dispondrán, ambos según los parámetros y metodología establecidos por la normativa vigente.

Para separar las fases se utilizan tanques denominados sedimentadores donde sus dimensiones dependen de los tiempos de retención hidráulicos, carga de sólidos y de la producción de lodos en el proceso de degradación. Deben tener un cierre hermético para evitar el escape de olores molestos y de pequeñas concentraciones de biogás residual generado en el manto de lodos. Los tanques sedimentadores cumplen con funciones adicionales al proceso cuando una porción de los lodos sedimentados se recirculan nuevamente hacia el biodigestor. Esto aumenta las concentraciones de microorganismos en éste, aumentando la capacidad degradativa del sistema.

5.3.4. Etapa 4: Tratamiento, almacenamiento y uso de biogás

El biogás generado usualmente viene saturado de vapor de agua, lo cual provoca condensaciones en las cañerías y una disminución en su poder calorífico si es usado directamente, así como también concentraciones variables de sulfuro de hidrógeno, responsable de malos olores, corrosión de piezas metálicas del proceso y pudiendo ser muy tóxico a altas concentraciones. Es por ello que es indispensable realizar un tratamiento al biogás producido a fin de remover las concentraciones de agua y H_2S presentes. Para ello existe un amplio espectro de tecnologías de filtros, que varían según los caudales de biogás producidos y las especificaciones de calidad de biogás requeridas.

Debido a que la generación de biogás puede fluctuar en cantidad, es necesario que, una vez tratado el biogás, sea almacenado en sistemas apropiados antes de ser utilizado donde se lo requiera, para garantizar un flujo y presión constantes al momento de su uso. Los tanques de almacenamiento, denominados gasómetros, deben ser a prueba de fugas, a prueba de presión y resistentes al medio ácido, entre otros. Los mismos deben ser probados antes de entrar en funcionamiento y dotados de válvulas de seguridad para la presión exigida. Se recomienda que su capacidad de almacenamiento cubra de dos o tres días de producción. Existen gasómetros de presión baja, media y alta donde por cuestiones de seguridad, son más comunes los modelos de presión baja que operan con presiones entre 0,5 y 30 mbar, hechos generalmente de membranas plásticas impermeables (Manual de Biogás, 2011).

La última etapa del proceso culmina con la utilización del biogás generado, una vez que fue tratado y almacenado para tal fin. El biogás puede ser aprovechado energéticamente mediante el uso de tecnologías que convierten la energía química combustible en energía térmica, eléctrica o mecánica. La generación de energía térmica es el uso más sencillo que se le da al biogás. Los quemadores de gas natural convencionales

pueden ser utilizados para biogás fácilmente si se adapta la relación aire-gas. Su combustión aplica para la quema de gas en calderas o en quemadores directos y puede ser utilizado en sistemas de calefacción y suministro térmico de las operaciones unitarias de la industria, donde la eficiencia usual de conversión y aprovechamiento es entre el 50 y 60% (GIZ, 2010).

5.4 Componentes de una planta de biogás

En esta sección se introducen brevemente algunas de las principales tipos de tecnologías de biodigestión para la generación de biogás y se describen los elementos y accesorios que componen una planta de biogás.

5.4.1. Tecnologías de biodigestión

La selección de la tecnología adecuada utilizada en la planta de biogás es fundamental para maximizar la producción de energía. La capacidad de retención de biomasa es un punto crítico a contemplar debido a que los microorganismos anaeróbicos crecen de forma muy lenta durante el proceso metabólico. Al desacoplar el tiempo de retención hidráulico (TRH) del tiempo de retención celular (θ_c) contribuye en forma a mantener altas concentraciones de microorganismos anaeróbicos dentro del biodigestor previniendo su lavado. Otras consideraciones incluyen el tipo de sustrato utilizado, presencia de inhibidores, recuperación de biogás, espacio disponible para instalar la planta de biogás, complejidad del sistema, costos de inversión y de operación. Dentro de los costos de operación se deben considerar, además del mantenimiento de los equipos, los costos asociados a la necesidad de personal cualificado para operar las instalaciones, los cuales aumentan según aumenta la complejidad de la tecnología seleccionada, así como la dificultad en obtener los repuestos necesarios en caso de precisarse, debido al desgaste normal del equipo.

A continuación, en la **Figura 5.6**, a modo ilustrativo se expone una clasificación frecuente entre las tecnologías de biodigestión anaeróbica, separada entre reactores de baja y alta velocidad:

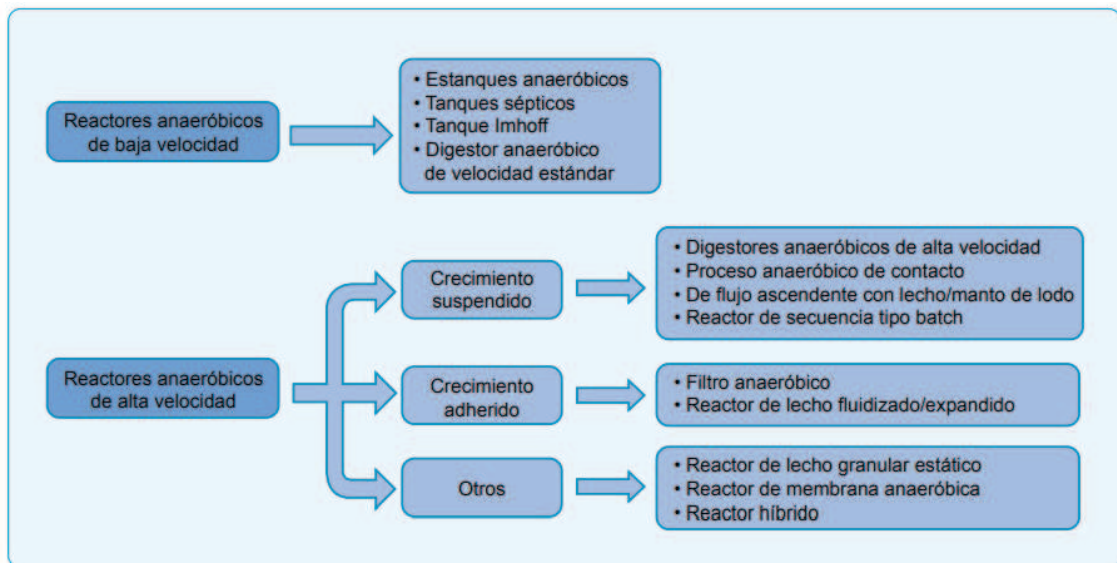


Figura 5.6: Clasificación de tecnologías de biodigestores anaeróbicos. Fuente: Manual de Biogás, 2011.

Los reactores de baja velocidad no poseen sistema de mezcla y las condiciones de temperatura, tiempo de retención celular y acidez, no se encuentran controladas. Son sistemas muy sencillos donde la tasa de carga orgánica (COV) es baja en el rango de 1-2 kg DQO/m³.día. Esta configuración no es adecuada para la producción de energía. Por otra parte, los sistemas anaeróbicos de alta velocidad mantienen un alto nivel de biomasa en el biodigestor, así como condiciones de temperatura, mezcla y sólidos controladas de manera de optimizar su funcionamiento. La tasa de carga orgánica (COV) varía entre 5 a 30 kg DQO/m³.día, siendo mas apropiados para la producción de biogás (Manual de Biogás, 2011).

Entre los reactores anaeróbicos de alta velocidad, algunas de las tecnologías comúnmente aplicadas a casos similares al de estudio son los reactores agitados continuos (CSTR), reactores expandidos granulares (UASB y EGSB) y reactores anaeróbicos en secuencia tipo batch. Existen muchas otras tecnologías pertinentes que pueden ser tomadas en consideración pero que por practicidad no se exponen en el presente proyecto.

- **Reactor CSTR y PAC**

El reactor de Tanque con Agitado Continuo o CSTR por sus siglas en ingles “Continuous Stirred-Tank Reactor”, es un proceso de digestión anaeróbica sencillo con COV moderadas y mezcla completa. Esta tecnología maximiza el contacto entre la biomasa presente en el biodigestor y el sustrato biodegradable, manteniendo una distribución uniforme de ambas concentraciones a través de un sistema de agitación mecánica (agitador tipo turbina o palas) o neumática (recirculación de biogás a presión), que se realiza a baja velocidad (Ver **Figura 5.7**). Este tipo de tecnología no ofrece problemas de diseño y es de las más utilizadas para residuos. Comparativamente con otros

reactores, los TRH necesarios son altos debido a que la concentración de todas las especies, al estar en estado estacionario dentro del reactor, debe ser la misma que se pretenda en el efluente. A medida que aumenta el tiempo de retención hidráulico, la proporción de efluente degradado será mayor y el contenido de carga orgánica en el efluente de salida será menor que cuando se utilizan tiempos de residencia más cortos.

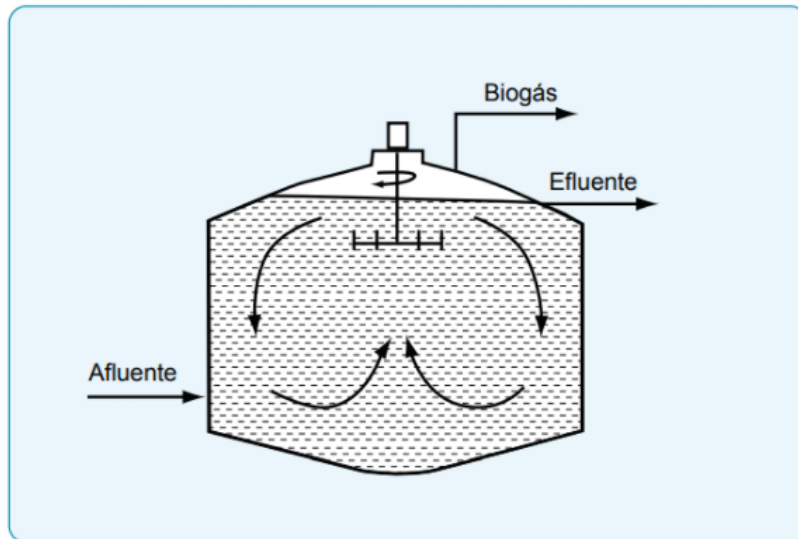


Figura 5.7: Esquema de un sistema CSTR. Fuente: Manual de Biogás (2011)

Es posible reducir los tiempos de retención si junto con el reactor de mezcla completa se instala un sedimentador secundario a la salida del biodigestor, donde se separan los lodos del efluente líquido, y se los recircula para aumentar los tiempos de retención celular dentro del reactor. Este tipo de configuración se la conoce como Procesos Anaeróbicos de Contacto (PAC). Su principal limitación se debe a que en algunas ocasiones la sedimentación es poco eficaz debido a la elevación de lodos debido a pequeñas porciones de biogás generado en el fondo de lodos presente en el fondo del sedimentador provocando pérdida de biomasa y valores muy altos de sólidos en el efluente líquido. Esta consecuencia puede reducirse considerablemente con un buen diseño del sedimentador, caudales de reciclo y purga y la instalación de un sistema de desgasificación (ver **Figura 5.8**).

Esta configuración es particularmente útil para corrientes con alta carga de sólidos suspendidos. La tasa de carga orgánica puede oscilar entre 0.5 a 10 kg DQO/m³.día, con concentraciones de biomasa típicas entre 4 – 6 g/L, con concentraciones máximas alcanzando 25 – 30 g/L, dependiendo de la capacidad de sedimentación de los lodos (Manual de Biogás 2011).

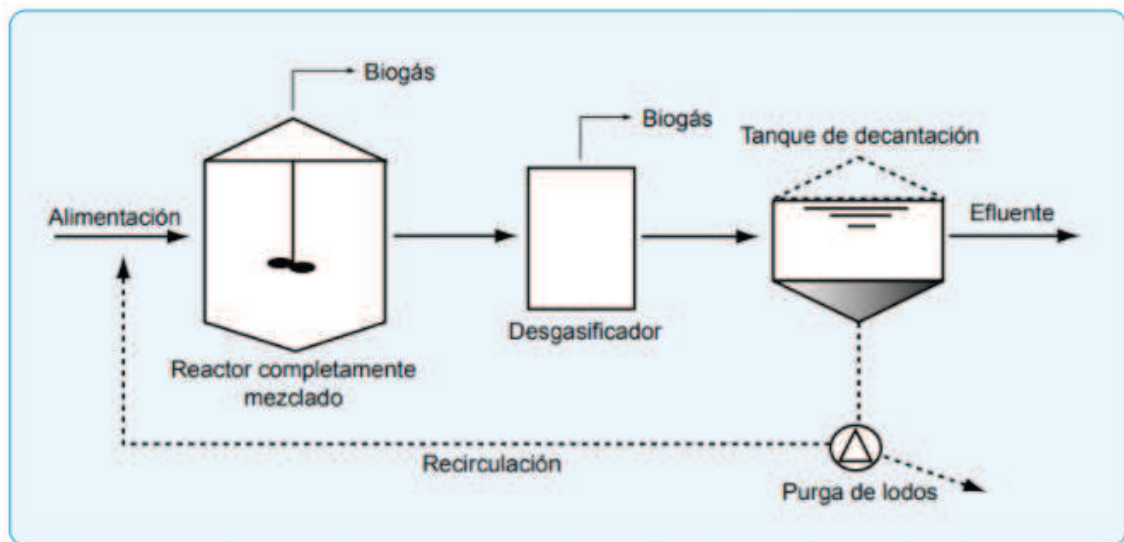


Figura 5.8: Esquema de sistema de Proceso anaeróbico de Contacto. Fuente: Manual de Biogás (2011)

- **Reactores Expandidos Granulares (UASB y EGSB)**

Los reactores del tipo UASB, de sus siglas en inglés Upflow anaerobic sludge blanket (manto de barros de flujo ascendente), es esencialmente un sistema de crecimiento en suspensión en el que se establece un manto de lodos granulados denso en la región inferior del reactor gracias a un cuidadoso balance entre los tiempo de retención hidráulico y tiempo de retención celular. Los lodos granulados concentran los microorganismos anaeróbicos hasta valores de incluso 50 g/L, con lo que degradan el sustrato en muy poco tiempo, siendo especialmente eficiente para aguas con altos contenidos de carbohidratos o azúcares, pero no tanto para aguas con alto contenido de proteínas, las cuales forman flóculos más suaves difíciles de sedimentar (Sanchez, 2018).

El flujo ascendente de sustrato ingresa provocando turbulencias, que sumado al burbujeo provocado por la generación de biogás, asegura un buen contacto entre el sustrato y la biomasa (**Figura 5.9**). El sistema separador de fases o separador trifásico permite que el efluente tratado salga por la parte superior del reactor, mientras que los sólidos sedimentan y el gas generado es recolectado por la campana de gas.

Los sistemas UASB son adecuados para trabajar con sustratos con altas cargas orgánicas y bajo contenido de sólidos, permitiendo tratar grandes volúmenes de efluente en poco tiempo, con TRH entre 4 a 10 hs. Sus volúmenes pueden oscilar entre unos pocos metros cúbicos y hasta 300 m³. Otras ventajas son su tamaño compacto, bajos costos de operación y mantenimiento, bajo consumo de energía y buenos porcentajes de remoción. Entre sus desventajas figuran la baja tolerancia del sistema a efluentes con altos contenidos de sólidos, la posibilidad de liberar olores molestos, la baja capacidad del sistema a tolerar tóxicos y que requiere largos plazos para su puesta en marcha.

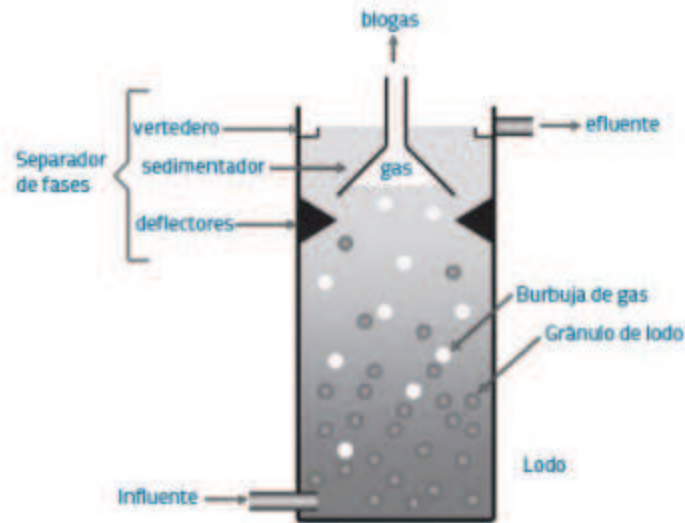


Figura 5.9: Esquema de reactor UASB. Fuente: Sanchez (2018)

Una variante del UASB es el sistema EGSB, de sus siglas en inglés Expanden Granular Sludge Bed (Manto de barro granulado expandido), cuya principal diferencia es la mayor velocidad de flujo ascendente con respecto al primero (**Figura 5.10**). Esto permite una expansión parcial de los gránulos de lodos favoreciendo un mayor contacto entre el sustrato y la biomasa. Son reactores más altos y en ciertos casos requieren un sistema de recirculación para garantizar alcanzar los tiempos de contacto recomendados. Su principal inconveniente se relaciona con su complejidad, lo que favorece obstrucciones que pueden causar los sólidos sedimentados, por lo que se deben controlar cuidadosamente los sólidos que ingresan en el reactor, así como una compleja puesta en marcha que requiere, al igual que para su operación, personal altamente calificado.

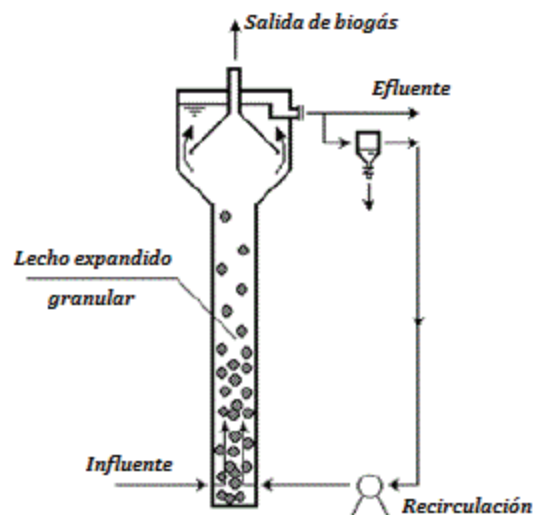


Figura 5.10: Esquema de reactor egsb. Fuente: Taersa (2016)

- **Reactor Anaeróbico en Secuencia tipo Batch**

Este sistema funciona por ciclos y no en flujo continuo, generalmente colocando al menos dos reactores en paralelo, donde el sistema de cada ciclo de operación se divide en cuatro etapas (Ver **Figura 5.11**): 1) Alimentación, donde el sustrato es incorporado en el reactor. 2) Reacción, donde se cierra el reactor y ocurre la degradación de la materia orgánica. 3) Sedimentación, donde se detiene la agitación permitiendo que los lodos decanten, clarificando el efluente. 4) Descarga, donde el efluente y los lodos son retirados del reactor hacia su disposición final o posteriores tratamientos.

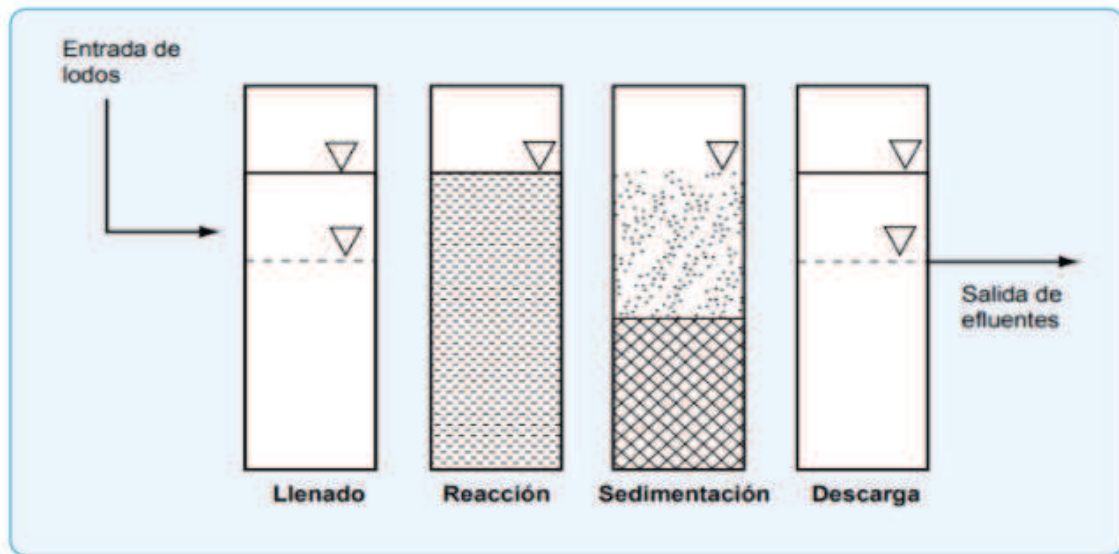


Figura 5.11: Representación del ciclo de cuatro etapas de un reactor tipo Batch. Fuente: Manual de Biogás (2011)

Este tipo de configuración presenta ciertas características que lo hacen ventajoso frente a configuraciones más convencionales:

Presenta una gran flexibilidad de operación, permitiendo la adaptación de la biomasa a un determinado tipo de sustrato si los lodos se van reciclando entre cada Batch. La operación puede llevarse sin recirculación de sólidos o líquidos, donde el único gasto energético está dado por la agitación e intercambio de calor durante la etapa de reacción. La sedimentación ocurre dentro del mismo reactor por lo que no es necesaria la instalación de una unidad aparte (Manual de Biogás, 2011).

Sin embargo, el sistema discontinuo puede presentar varias complicaciones si el objetivo principal es la generación de biogás, debido a que se hace dificultoso controlar las variables operacionales del proceso. Este tipo de configuración suele utilizarse comúnmente en residuos con contenidos de sólidos muy altos, donde el principal objetivo es la estabilización del sustrato y no la producción de energía, por ejemplo en el caso de la estabilización de los Residuos Sólidos Urbanos (RSU).

5.4.2. Elementos y Accesorios de una Planta de Biogás

A partir de las recomendaciones provistas por el Manual de Biogás (2011), respecto a los principales componentes y accesorios de una planta de biogás se detalla a continuación aquellos pertinentes a una planta de biogás similar a la planteada en el presente proyecto:

- **Entrada del afluente**

Generalmente el afluente ingresa al biodigestor luego del pretratamiento, o al sedimentador secundario luego del biodigestor, por el extremo opuesto a la extracción de sobrenadante. Puede introducirse por bombeo o gravedad por la parte superior de la unidad o por debajo de la línea del líquido en su interior.

- **Salida del efluente**

En un biodigestor y en el sedimentador puede haber varias salidas de sobrenadante colocados a distintos niveles, o un único tubo con válvulas a distintos niveles. El principal criterio para seleccionar el nivel es aquel que extraiga un efluente con la menor cantidad posible de sólidos para evitar que se lave el biodigestor o baje la calidad del efluente que se extrae del sedimentador.

- **Extracción de lodos**

El lodo se extrae por la parte central inferior de los tanques utilizados como reactor y sedimentador a través de tuberías entre 110 a 160 mm de diámetro y se utilizan para llevar periódicamente el lodo del sedimentador nuevamente hacia el biodigestor (reciclo), para efectuar la purga requerida para evitar el envejecimiento de los lodos o para el vaciado completo de las unidades para mantenimiento o reparaciones.

- **Muestreador**

El muestreador consiste en una tubería con un dispositivo de cierre que penetra en el tanque de biodigestor y en el sedimentador y que esta sumergido al menos unos 30 cm en los lodos. Esto permite tomar muestras de los lodos del biodigestor, sin pérdida en la presión de gas, y sin crear condiciones peligrosas causadas por la mezcla de aire y gas.

- **Sistema de calentamiento del biodigestor**

Existen diseños de biodigestores para distintas temperaturas. Sin embargo, tal como se describió previamente en el presente Capítulo, para una planta de biogás cuyo objetivo es la generación de energía resulta indispensable proveer de condiciones de temperaturas mesófilas o termófilas. Para ello los reactores se pueden calentar de diversos modos,

aunque en general, se calientan por medio de la circulación de agua caliente, proveniente de una caldera, a través de sistemas intercambiadores en el tanque, generalmente serpentinas, o también se utiliza el calentamiento de los lodos recirculados a través de un intercambiador exterior.

Para el intercambiador se utiliza el mismo gas generado por el biodigestor, donde el agua caliente se bombea desde la caldera hacia el intercambiador de calor, donde cede su calor al lodo recirculante.

- **Sistema de gas**

El sistema de biogás se encarga de colectar el biogás generado a partir del sustrato, conducirlo a través del sistema de filtros que buscan aumentar la calidad del biogás hasta finalmente almacenarlo en el gasómetro y conducirlo hacia el punto de consumo.

El sistema de gas se compone de las siguientes partes:

- Almacenamiento del biogás
- Trampas de agua
- Válvulas de seguridad
- Rompedora de vacío
- Cortallamas
- Condensador
- Medidores de gas.
- Manómetros.
- Quemador de los gases sobrantes
- Filtros

- **Almacenamiento del biogás**

El biogás generado por la digestión anaeróbica puede almacenarse en un gasómetro separado del biodigestor, o bien, en el mismo digestor en la parte superior a través de la instalación de cúpulas o campanas rígidas o flotantes. Este dispositivo permite que en caso de no requerirse la utilización de biogás por algunos días, el biogás pueda acumularse para posteriores usos. A su vez, en el caso de los gasómetros flexibles, permite un flujo de presión de biogás mas constante.

- **Trampa de agua**

Para lograr que el biogás circule en un sentido único, evitando que retroceda en dirección al biodigestor o al sedimentador es necesario instalar dispositivos denominados trampas de agua, cuyo cierre hidráulico permite que el biogás generado burbujee en el líquido y continúe hacia el gasómetro, impidiendo su retroceso.

- **Válvulas de seguridad**

La válvula de seguridad va ubicada en el tanque de biogás y sedimentador o en las tuberías de biogás anexas a éstos. La válvula de seguridad consta de un plato cargado con arandelas de peso calibrado. Esta combinación de pesos busca igualar la presión de gas en el tanque, que usualmente $0,010-0,020 \text{ kg/cm}^2$, equivalente a 10-20 cm de columna de agua (Groppelli y Giampaoli, 2016). Si la presión dentro del tanque excede el límite calibrado, la válvula se abrirá y dejará escapar gas hasta que la presión dentro del tanque vuelva a los valores de diseño.

- **Rompedora de vacío**

La válvula rompedora de vacío funciona de manera similar a la válvula de seguridad, pero se ubica en el tanque para aliviar las presiones negativas ocasionadas por una extracción de lodos muy rápida. Su mecanismo alivia la presión negativa permitiendo el ingreso de aire y de este modo evitar el colapso del tanque.

- **Cortallamas**

El cortallamas es un dispositivo cuyo objetivo consiste en evitar explosiones debido al posible retroceso de la llama desde el punto de uso hacia el gasómetro, debido a que en algunos casos (especialmente al comienzo de la operación de la planta de biogás) el gas generado posee trazas de oxígeno que permiten su combustión. El cortallamas en caso de que se ocasionara alguna llama en la tubería del gas, la enfriaría por debajo del punto de ignición al pasar a través de los deflectores, sin impedir el paso del biogás.

- **Condensador**

El biogás generado suele estar saturado en vapor de agua, y en su recorrido desde el tanque caliente hasta zonas de temperaturas más bajas a través de las tuberías, provoca que el agua condense. Esta agua debe recogerse en los puntos bajos del sistema ya que de lo contrario impedirá que el gas circule, interfiriendo en el posterior uso del biogás. Para ello se colocan dispositivos sencillos denominados condensadores, cuyo objetivo es captar el agua generada sin permitir el escape del biogás con lo que suelen tener un sello

hidráulico. Es necesario que las tuberías de biogás tengan una leve pendiente para facilitar la captación del agua. Generalmente tienen una capacidad de medio litro de agua.

- **Medidores de gas**

Los medidores de gas pueden ser de diversos tipos, como fuelles, diagramas de flujo en paralelo, molinetes y placas de orificios o presión de diferencial, donde su objetivo es determinar el flujo de gas a través de él para poder determinar los volúmenes productivos de biogás generados por la planta.

- **Manómetros.**

Los manómetros se instalan en varios puntos del sistema para indicar la presión del gas en centímetros de columna de agua.

- **Quemador de los gases**

La antorcha o quemador de gases es un dispositivo de seguridad que se utiliza para eliminar los gases en exceso del sistema de digestión. Va provisto de una llama piloto de quemado continuo, para que cualquier exceso de gas que pase por el regulador se queme. Sin embargo en las plantas de biogás de pequeña escala este dispositivo puede obviarse siempre y cuando el sistema cuente con las válvulas de seguridad correspondientes.

- **Filtros**

Con el fin de mejorar el poder calorífico del biogás generado y sus condiciones de seguridad, es necesario disminuir la humedad y concentraciones de sulfuro de hidrógeno en el gas. Para ello se instalan filtros de diversos grados de complejidad según los caudales de biogás generado y requerimientos de los equipos energéticos utilizados con el biogás generado.

5.5 Biodigestores propuesto

Como se discutió en el **Capítulo 5**, la planta de generación de biogás se divide en cuatro etapas de proceso: Pretratamiento, tratamiento anaeróbico, tratamiento del biogás y tratamiento de los lodos generados. A partir de esta división se seleccionaron las siguientes alternativas:

5.5.1. Pretratamiento Propuesto

En base a los resultados obtenidos para los distintos pretratamientos evaluados en el **Capítulo 4**, se seleccionó un pretratamiento para acondicionar el sustrato previo al ingreso del biodigestor integrando en una misma unidad los fenómenos de dilución, mezcla, neutralización y calentamiento, sin otros tratamientos mecánicos o térmicos adicionales a partir de la línea sólida (bagazo y otros residuos sólidos asimilables) y la línea líquida (efluente líquido proveniente de las aguas de lavado de la Brewhouse) utilizada para disminuir la concentración de sólidos a niveles aptos para el diseño de la tecnología de biodigestión adoptada.

5.5.2. Tratamiento Anaeróbico Propuesto

Para definir el tipo de Planta de Biogás se tuvo en cuenta no solo las características propias de cada una de las tecnologías descritas, sino principalmente la capacidad de adaptación a las condiciones del caso de estudio.

Los reactores UASB son recomendables para caudales constantes con bajo contenido de sólidos mientras que los reactores en secuencia Batch son útiles para estabilizar residuos más bien sólidos, pero con poco control de los parámetros operativos durante la digestión, lo que suele traducirse en bajos rendimientos en la producción de biogás. Dado que el bagazo se trata de un residuo con alto contenido de sólidos, los objetivos bioenergéticos del presente proyecto y la adaptabilidad del sistema a un sistema de alimentación discontinua, se seleccionó un sistema de Proceso Anaeróbico de Contacto (PAC), es decir un sistema CSTR con un sedimentador posterior al biodigestor y un circuito de reciclaje de lodos.

5.5.3. Tratamiento de Biogás Propuesto

Debido a que el objetivo del proyecto es utilizar la bioenergía generada a partir de los residuos sólidos de la cervecería utilizada como caso de estudio en el propio proceso industrial en forma de energía térmica para los quemadores de la Brewhouse, es necesario proponer un sistema de tratamiento y almacenamiento del biogás previo a su uso acorde a las condiciones requeridas.

Para ello se definió una etapa de tratamiento de biogás conformada por un filtro de sulfuro de hidrógeno y un filtro de humedad, otra etapa de almacenamiento dada por un gasómetro flexible y todos los accesorios recomendables para la operación y condiciones requeridas para este tipo de planta.

5.5.4. Disposición de Lodos Propuesto

Las plantas de digestión anaeróbica suelen tener bajas producciones de lodos debido al lento crecimiento de los microorganismos anaeróbicos por lo que su disposición no suele implicar costos muy elevados. Su análisis y disposición escapan a los alcances del presente proyecto, por lo cuál solo se describen algunas recomendaciones al respecto en la **Sección 6.6.8**.

5.5.5. Esquema General de la Planta de Biogás

A continuación en el esquema de la **Figura 5.12** se muestra el diagrama de la planta de biogás a diseñar:

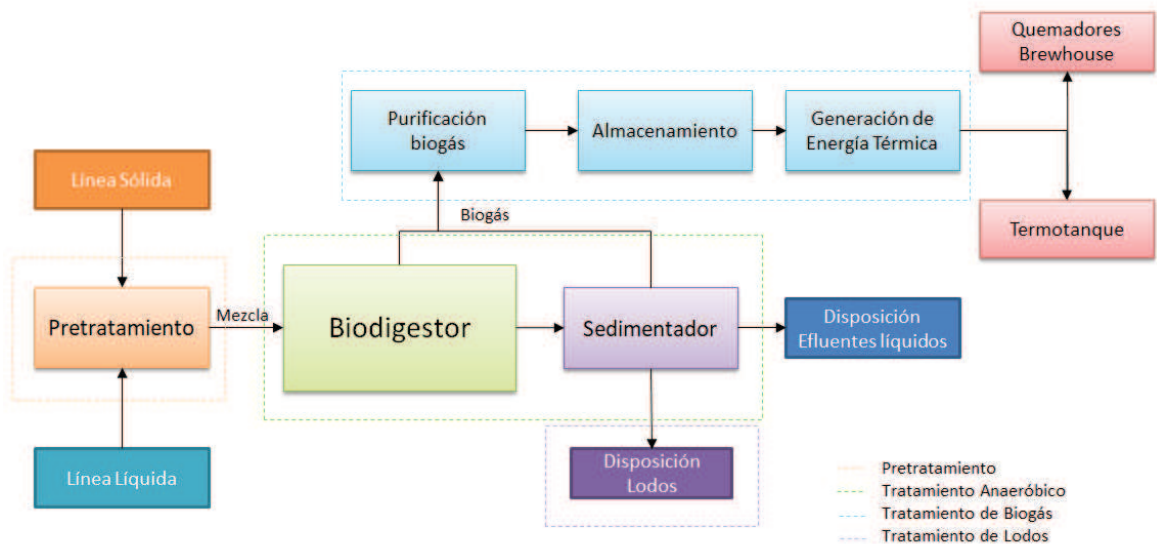


Figura 5.12: Diagrama general de la planta de biogás, con sus componentes principales y etapas (pretratamiento, tratamiento anaeróbico, tratamiento de biogás y tratamiento de lodos)

En el **Capítulo 6** se detallan los cálculos, dimensiones y modelos adoptados para la planta de biogás planteada.

CAPÍTULO 6

Diseño del biodigestor

6.1 Preliminares

6.1.1 Datos

Los parámetros de los residuos de la cervecería utilizados para el diseño del biodigestor se resumen en la **Tablas 6.1, 6.2 y 6.3**. Los valores presentados para el bagazo corresponden al bagazo sin pretratar, el cual fue seleccionado como mejor opción para realizar el tratamiento anaeróbico, debido al bajo rendimiento que tuvieron los otros pretratamientos.

Tabla 6.1: Parámetros fisicoquímicos de bagazo cervecero de diseño utilizados. Fuente: Elaboración Propia

| Parámetros de diseño | Bagazo |
|--|---------------|
| pH | 5,3 |
| Temperatura (°C) | 75 |
| ST (% m/m)* | 25,4 |
| SV (% m/m)* | 24,5 |
| SF (% m/m)* | 0,9 |
| Humedad (% m/m)* | 74,7 |
| DQO (gO ₂ /kg)* | 163 |
| Densidad (kg/m ³)* | 600 |
| Relación C/N | 13,6 |
| BMP (Nml/g SV) | 274 |
| Volumen Productivo (Nm ³ /ton sustrato) | 67,1 |

*En base húmeda

Tabla 6.2: Parámetros fisicoquímicos de aguas residuales de cervecería de diseño utilizados. Fuente: Elaboración propia a partir del promedio de la recopilación de valores obtenidos de la bibliografía desarrollada en el capítulo 2.

| Parámetros de diseño | Aguas Residuales cervecería |
|---------------------------------|------------------------------------|
| pH | 6,2 |
| Temperatura (°C) | 28,8 |
| ST (mg/L) | 5567 |
| SV (mg/L) | 3257 |
| SF (mg/L) | 2310 |
| Densidad (kg/m ³)* | 1000 |
| DQO (mgO ₂ /L) | 4664 |
| DBO (mgO ₂ /L) | 2400 |
| Relación DQO/DBO | 1,9 |
| AGV's (mg/L) | 1750 |
| Fosfatos (mgPO ₄ /L) | 37,6 |
| TKN (mg/L) | 20,4 |
| TSS (mg/L) | 2322 |
| TDS (mg/L) | 1090 |

* Se asume la densidad del agua

Tabla 6.3: Parámetros fisicoquímicos de el biogás generado por la digestión anaeróbica de la cervecería de diseño utilizados.
Fuente: Manual de Biogás, 2011 & GIZ 2010

| Parámetros de diseño | Biogás producido |
|---|--|
| Composición molar | 60% CH ₄ 40% CO ₂ Trazas de H ₂ O, O ₂ , N ₂ , NH ₃ y H ₂ S |
| Contenido energético | 6,0 kWh/m ³ |
| Poder Calorífico | 500-600 Kcal/dm ³ |
| Equivalente de combustible | 0,60 L petróleo/m ³ biogás |
| Límite de explosión | 6-12% de biogás en aire |
| Temperatura de ignición | 650-750 °C |
| Presión crítica | 74-88 atm |
| Temperatura crítica | -82,5°C |
| Densidad normal | 1,2 kg/m ³ |
| Requerimiento teórico de aire (m ³ /l) | 6,6 |
| Máxima velocidad de encendido en | 0,31 |
| Olor** | Huevo podrido |
| Masa molar | 16,043 kg/kmol |

Los valores de pH, temperatura de salida y densidad del bagazo fueron obtenidos in situ al relevar el caso de estudio. Los datos de concentración de sólidos, humedad, DQO, BMP y volumen productivo fueron obtenidos durante las determinaciones descritas en el **Capítulo 4**.

Por otro lado, la composición y características del biogás, la relación C/N del bagazo, el conjunto de parámetros que describen los efluentes líquidos de la cervecería, los caudales de efluentes líquidos y de los otros residuos sólidos (lodo “turb” y extractos de levaduras) y el consumo energético del proceso productivo se obtuvieron en base a los valores promedios de los datos bibliográficos mencionados anteriormente en los **Capítulos 2 y 3**.

- **Caudal**

El caudal mensual productivo del caso de estudio es de 20.000 litros de cerveza/mes obteniéndose un total de 5400 kg bagazo/mes, ocupando un total de 9 m³ mensual,

producto de 5 cocciones semanales, cada una con una generación de 270 kg bagazo/cocción.

Para definir el caudal de diseño, debido a las características del proceso y los elementos con los que cuenta la cervecera, no es factible que se realicen mas de 7 cocciones por semana. Tomando dicho valor como máximo, es decir días hábiles, sábados y domingos, sin incluir feriados, con un total de 350 días productivos/año, implica un caudal productivo mensual proyectado de 29.000 litros cerveza/mes, dando un total de 7875 kg de bagazo/mes.

En caso probable de que se decida añadir a la digestión del bagazo el resto de los residuos sólidos provenientes del proceso, es decir, los extractos de levadura usados y los lodos “turb” (el caso de estudio no utiliza tierra de diatomeas en su proceso, por lo cual no se encuentra incluido en el presente trabajo), el total de residuos sólidos a tratar es un total de **8138 kg/mes**, ocupando un volumen aproximado de 13,6 m³, por lo cual, queda establecido como caudal de diseño de **279 kg/día (Tabla 6.4)**.

Para el diseño en la línea sólida, se consideran como mínimos los caudales actuales que solo incluyen bagazo y se originan 5 días a la semana. Para los caudales de diseño máximos, se utilizan los caudales proyectados (incluyen todos los residuos sólidos orgánicos del proceso) como máximos.

Tabla 6.4: Valores de caudal y caudal de diseño de la línea sólida utilizada en el biodigestor

| Caudal | Bagazo | |
|-------------------------|--|-------------------------|
| | Másico (kg) | Volumétrico (m3) |
| Diario | 270 | 0,5 |
| Semanal | 1350 | 2,3 |
| Mensual | 5400 | 9,0 |
| Caudal de diseño | Residuos Sólidos (96,7% bagazo) | |
| Diario | 279 | 0,5 |
| Semanal | 2034 | 3,4 |
| Mensual | 8138 | 13,6 |

**Caudales semanales y mensuales fueron calculados en base a un total de 350 días productivos/año y en base húmeda.*

A pesar de que los caudales de diseño sean definidos incluyendo los extractos de levaduras usados y los lodos “turb” del proyecto, se asume por simplificación, que la composición global del residuo sólido es igual a la composición del bagazo caracterizada. Esto se decide así debido a que tanto el extracto de levaduras usado y el lodo “turb” son de composición relativamente similar a la del bagazo, siendo materia orgánica

biodegradable con alto contenido de humedad que no presentan compuestos inhibidores, y sus cantidades respecto a la generación del bagazo son muy bajas (los extractos de levadura corresponden al 2,3 % del total de los residuos sólidos generados y el lodo “turb” solo al 1,1%).

Debido a que es necesario diluir la corriente sólida a tratar para llevarla a condiciones de operatividad, se decidió utilizar parte de los efluentes líquidos provenientes del lavado y enjuague de las unidades utilizadas durante la maceración, cocción y filtración por tres razones: 1) el efluente líquido se dispone en su totalidad en la red doméstica, su uso parcial (cabe destacar nuevamente que el objetivo principal del proyecto es la generación de energía y no el tratamiento de los efluentes generados) disminuye el impacto generado por la industria en la red de alcantarillas y evita el uso de agua potable para realizar la dilución. 2) Los efluentes líquidos generados por la “brewhouse” (unidades de maceración-cocción-filtración) poseen alta carga orgánica biodegradable, con contenidos de azúcares altamente biodegradables, lo que lo hacen asimilable al bagazo. 3) Debido a que el bagazo es un subproducto proveniente de una de las etapas de la “brewhouse”, la simultaneidad de tiempo y espacio de ambos efluentes facilita la logística de transporte hacia la cámara de premezcla.

Los parámetros y caudales finales obtenidos producto de la mezcla de ambas líneas se presentan mas adelante en la **Sección 6.2.2**.

6.2 Memoria Descriptiva y de Cálculo de la Planta de Biogás

En esta sección se presentan las ecuaciones, adopciones y cálculos realizados durante el dimensionamiento de la planta de biogás planteada.

6.2.1 Criterios

Para el dimensionamiento de los equipos que forman parte de la planta de biogás se definieron las siguientes suposiciones de partida:

a) Se utilizaron para el diseño de la planta, en la mayor medida posible, los resultados de caracterización del bagazo y comportamiento durante la biodigestión detallados en el **Capítulo 4**

b) Será necesario agregar un tanque de pretratamiento para acondicionar los sustratos utilizados (línea sólida y líquida), ajustando variables de concentración de sólidos, temperatura y pH de la mezcla antes de ingresar en el biodigestor

c) Debido a los resultados de BMP detallados en el **Capítulo 4**, el bagazo no contara con tratamiento mecánico o térmico

d) El sistema funciona de modo continuo pero con alimentaciones puntuales, por lo cual se esperan fluctuaciones en los caudales de alimentación, tanto por un aumento en el

caudal productivo, como por fluctuaciones propias del proceso, con lo cuál el diseño deberá prever dichas variaciones dentro de rangos razonables

e) Debido a las altas concentraciones de sólidos totales presentes en el residuo sólido a tratar se prevee realizar una dilución 1:3 utilizando el propio efluente líquido de la Brewhouse para alcanzar las concentraciones de sólidos requeridas por el diseño

f) El biodigestor estará limitado por la carga orgánica volumétrica COV, y este será el parámetro inicial para determinar el volumen del mismo

g) La distribución de la planta debe tener en consideración estar cerca del lugar donde se consumirá el gas, pues las tuberías son caras y las presiones obtenibles no permiten el transporte a distancias mayores de 30 metros, así como cerca de donde se generan los residuos (Brewhouse) para facilitar su traslado

h) Tanto los lodos como efluente líquido generados por la planta de biogás requieren tratamientos posteriores para alcanzar los valores establecidos por la normativa, dichos tratamientos exceden los alcances del proyecto y no se encuentran detallados en el mismo

6.2.2 Mezcla

Para alcanzar los valores de concentración de sólidos que permitan un desempeño óptimo del transporte, mezcla, flujo de calor, pH y acceso al sustrato por parte de los microorganismos anaeróbicos dentro del reactor, es necesario trabajar en un rango de concentración entre 8-12% m/m de sólidos totales, tal como estipula el Manual de Biogás (2011), por lo que se decidió realizar una dilución de los residuos sólidos de 1:3, utilizando para ello el efluente líquido generado durante las operaciones de normales de la brewhouse.

- **Caudales**

A continuación se exponen las estimaciones de caudal generados y requeridos para el caso actual y las proyecciones de diseño basados en los valores bibliográficos expuestos en la **Sección 2.2** (ver **Tabla 6.5**) para una dilución de los residuos sólidos 1:3 utilizando el mencionado efluente líquido proveniente de la brewhouse.

Tabla 6.5: Valores de caudal y caudal de diseño de la línea líquida utilizada en el biodigestor

| Caudal | Efluente Líquido proveniente de la "Brewhouse" | |
|---------|--|----------------|
| | Generado** (m3) | Utilizado (m3) |
| Diario | 1,5 | 0,5 |
| Semanal | 7,5 | 2,7 |
| Mensual | 30,0 | 10,8 |

| Caudal de diseño | Efluente Líquido proveniente de la "Brewhouse" | |
|------------------|--|----------------|
| | Generado** (m3) | Utilizado (m3) |
| Diario | 1,5 | 0,6 |
| Semanal | 10,5 | 4,1 |
| Mensual | 43,8 | 16,3 |

*Caudales semanales y mensuales fueron calculados en base a un total de 350 días productivos/año. **Valores estimados a partir de los presentados por Water and Wastewater: Treatment/Volume Reduction Manual, 2013

Por cada cocción se generan aproximadamente 1,5 m³ de efluentes líquidos producto de las operaciones de limpieza de las unidades, sin embargo, para alcanzar la dilución requerida (1:3) sólo se necesita aproximadamente la tercera parte del caudal generado. Dejando el resto a disponer del mismo modo que se viene realizando, hasta ser sustituido por un sistema de tratamiento correspondiente.

A continuación se exponen algunos de las ecuaciones utilizadas para la determinación de los valores de mezcla:

- **Cálculos densidad de mezcla**

Basadas en las ecuaciones presentadas por Reynolds & Richards (1996) puede determinarse la densidad de la mezcla a partir de calcular la densidad de los sólidos secos.

La densidad de los lodos secos ρ_s es función de las densidades de las fracciones volátiles y fijas, ρ_v y ρ_f respectivamente y la fracción porcentual de sólidos volátiles SV, y se representa como:

Ecuación 6.1
$$\rho_s = \frac{100 \cdot \rho_f \cdot \rho_v}{100 \cdot \rho_v + SV(\rho_f - \rho_v)}$$

Para propósitos ingenieriles, las densidades de las fracciones volátiles y fijas pueden considerarse 1,0 y 2,5 respectivamente. Sustituyendo eso en la anterior ecuación se obtiene la siguiente relación:

$$\text{Ecuación 6.2} \quad \rho_s = \frac{250}{100 + 1,5 \cdot SV}$$

La densidad de la mezcla (ρ_{mezcla}), puede finalmente determinarse por la **Ecuación 6.3**, donde H es el porcentaje de humedad de la muestra:

$$\text{Ecuación 6.3} \quad \rho_{mezcla} = \frac{100 \cdot \rho_s}{H \cdot \rho_s + 100 - H}$$

- **Cálculos concentración de sólidos de la mezcla**

La concentración de sólidos presente en la mezcla puede obtenerse a través de la siguiente expresión, válida para el cálculo de los sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV) y sólidos fijos (SF).

$$\text{Ecuación 6.4} \quad S_{mezcla} = \frac{Q_s \cdot S_s + Q_l \cdot S_l \cdot 0,1}{Q_{total}}$$

Donde:

S mezcla es la concentración de sólidos, expresados en % m/m

Ss es la concentración porcentual de sólidos presentes en el residuo sólido, expresados en % m/m.

Sl es la concentración porcentual de sólidos presentes en el efluente líquido, expresados en % m/m.

Qs es el caudal másico diario de la fracción sólida, expresados en kg/día.

Ql es el caudal volumétrico diario de la fracción líquida, expresados en m³/día.

Qtotal es el caudal másico diario total, expresado en kg/día.

- **Cálculos concentración de demanda química de oxígeno de la mezcla**

Para determinar la concentración de DQO de la mezcla, puede utilizarse la siguiente expresión:

Ecuación 6.5
$$DQO_{mezcla} = \frac{DQOs \cdot Q_s + DQOl \cdot Q_l}{Q_{total}}$$

Donde:

DQOs es el valor de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica presente en el residuo sólido, expresados en gO₂/kg.

DQOl es el valor de oxígeno requerido para oxidar la materia orgánica presente en el efluente líquido, expresados en gO₂/m³.

Qs es el caudal másico diario de la fracción sólida, expresados en kg/día.

Ql es el caudal volumétrico diario de la fracción líquida, expresados en m³/día.

Qtotal es el caudal másico diario total, expresado en kg/día.

- **Cálculos volumen productivo de la mezcla**

Para calcular el volumen productivo de la mezcla obtenida, la expresión utilizada solo depende de la nueva concentración de sólidos volátiles.

Ecuación 6.6
$$V_{prod_{mezcla}} = \frac{BMP \cdot SV_{mezcla}}{100}$$

Donde:

V_{prod_{mezcla}} es el volumen productivo de generación de metano, expresado en Nm³/tonelada de mezcla.

BMP es el potencial de biometano, expresado en Nml/g SV.

SV_{mezcla} es la concentración de sólidos volátiles presentes en la mezcla, expresados en % m/m.

- **Cálculos de temperatura final de la mezcla**

Para calcular la temperatura final que alcanza la mezcla se utilizan las temperatura inicial del efluente líquido y de los residuos sólidos, así como también los calores

específicos del grano de malta y del agua. Si bien la composición del efluente líquido es distinta a la del agua y por consiguiente también lo es su calor específico, se considera por simplificación de los cálculos el calor específico del agua del agua debido a que esta variación no representa un cambio relevante en los resultados ni es necesario predecir con total suma precisión la temperatura de la mezcla.

A continuación en la **Tabla 6.6** se presentan los valores iniciales utilizados para el cálculo de requerimiento de energía en la cámara de premezcla:

Tabla 6.6: Valores de diseño para el sistema de calefacción de la cámara de premezcla

| Parámetro | Valor |
|---|-------|
| Temperatura inicial residuos sólidos (°C) | 75 |
| Calor específico malta (kJ/kg.°C)* | 1,674 |
| Temperatura inicial efluente líquido (°C) | 28,75 |
| Calor específico agua (kJ/kg.°C) | 4,184 |

*Fuente: Marqués, M. (2001)

Teniendo en cuenta el agua contenida en el bagazo, obtenido a partir de las caracterizaciones detalladas durante el **Capítulo 4**, puede aproximarse el calor específico del bagazo:

$$\text{Ecuación 6.7} \quad C_{e_{\text{bagazo}}} = \frac{C_{e_{\text{malta}}} \cdot ST + C_{e_{\text{Agua}}} \cdot Hum}{100}$$

Donde:

$C_{e_{\text{bagazo}}}$ es el calor específico del bagazo, expresado en kJ/kg.°C

$C_{e_{\text{malta}}}$ es el calor específico del bagazo, expresado en kJ/kg.°C

$C_{e_{\text{Agua}}}$ es el calor específico del agua, expresado en kJ/kg.°C

ST es el porcentaje de sólidos totales en el bagazo, expresado en % m/m

Hum es el porcentaje de agua contenida en el bagazo, expresado en % m/m

Luego, a partir de la **Ecuación 6.7**, se obtiene la temperatura de la mezcla

Ecuación 6.7

$$T_{mezcla} = \frac{m_{efluente} \cdot C_{eAgua} \cdot T_{efluente} + m_{residuos\ sólidos} \cdot C_{e\ bagazo} \cdot T_{e\ bagazo}}{m_{efluente} \cdot C_{eAgua} + m_{residuos\ sólidos} \cdot C_{e\ bagazo}}$$

Donde:

T_{mezcla} es la temperatura final de la mezcla, expresada en °C

$m_{efluente}$ es la masa de efluente que ingresa por alimentación, expresada en kg

$C_{e\ agua}$ es el calor específico del agua, expresado en kJ/kg.°C

$m_{residuos\ sólidos}$ es la masa de residuos sólidos que ingresa por alimentación, expresada en kg

$C_{e\ bagazo}$ es el calor específico del bagazo, expresado en kJ/kg.°C

T_{bagazo} es la temperatura inicial del bagazo, expresada en °C

- **Cálculos de pH de la mezcla**

Según los valores obtenidos in situ, el bagazo proveniente del caso de estudio posee un pH de 5,3 y el efluente líquido proveniente de la brewhouse tiene un pH promedio de 6,2.

Se calcula el pH resultante de la mezcla de forma aproximada a partir de la siguiente ecuación, la cuál plantea el balance de hidronios presentes:

Ecuación 6.8

$$pH_{mezcla} = -\log \left[\frac{V_{efluente} \cdot 10^{-pH_{efluente}} + \frac{0,75 \cdot m_{residuos\ sólidos} \cdot 10^{-pH_{bagazo}}}{\delta_{bagazo}}}{V_{mezcla}} \right]$$

En el caso del bagazo, se considera que las especies responsables del pH se encuentran en la fracción de agua de la matriz (75% humedad).

- **Resultados mezcla**

A partir de los parámetros expuestos en las **Tablas 6.1** y **6.2**, se estimaron los siguientes valores de mezcla de diseño (Ver **Tabla 6.7**):

Tabla 6.7: Parámetros estimados de la mezcla resultantes realizando una dilución de los residuos sólidos 1:3 utilizando como diluyente el efluente cervecero generado en la Brewhouse

| Caudal base utilizado | | Caudal Actual - Mínimo | Caudal de Diseño - Máximo |
|-----------------------|--------------------------------------|---------------------------|------------------------------|
| Parámetros | Unidad | Mezcla | |
| Factor de Dilución | masa mezcla/masa residuos sólidos | 3 | 3 |
| Cocciones por mes | Cocciones/mes* | 20 | 29 |
| Caudal Másico | kg/alimentación* | 810 | 837 |
| | kg/mes | 16200 | 24414 |
| Caudal Volumétrico | m ³ /alimentación* | 0,77 | 0,80 |
| | m ³ /mes | 15,41 | 23,23 |
| pH | | | 5,6 |
| Temperatura (°C) | °C | | 42,5 |
| Densidad | kg/dm ³ | | 1,05 |
| Sólidos Totales | % m/m | | 8,8 |
| | g/L | | 92,7 |
| Sólidos Volátiles | % m/m | | 8,4 |
| | g/L | | 88,1 |
| Sólidos Fijos | % m/m | | 0,4 |
| | g/L | | 4,6 |
| Humedad | % m/m | | 91,2 |
| DQO | gO ₂ /kg | | 57,5 |
| BMP | Nml/g SV | | 274 |
| Volumen Productivo | Nm ³ /ton sustr | | 23 |
| Carga orgánica CO | kg DQO/d | 31,96 | 48,16 |

*La alimentación del reactor ocurre cada vez que se realiza una cocción en la Brewhouse, para los caudales mínimos (actuales) ocurre 20 días al mes

6.2.3 Tanque de pretratamiento

El objetivo de este pretratamiento es realizar la mezcla que funciona como sustrato del proceso anaeróbico. Para ello debe realizar la dilución de la fracción sólida utilizando el efluente líquido y garantizar las condiciones homogéneas, pH y temperatura requeridas para evitar el impacto negativo provocado por ingreso de cargas puntuales con parámetros distintos a la mezcla dentro del reactor que potencialmente puedan desestabilizarlo. Es importante destacar que el diseño debe responder a minimizar la incorporación de oxígeno disuelto y alcanzar la temperatura deseada.

Según McCabe et al. (2007), para garantizar buenas condiciones de mezcla el fondo del tanque debe ser redondeado y no plano, con el fin de eliminar los rincones escarpados o regiones en las que no penetrarían las corrientes de fluido y la altura del líquido es aproximadamente igual al diámetro del tanque.

En base a estas consideraciones y al volumen requerido para la alimentación diaria, para la cámara de premezcla se decidió utilizar tanque de Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV) de 1000 litros de capacidad, fabricados por la empresa Hürner Argentina S.A. ®. El presupuesto del tanque incluye la instalación del aislamiento térmico, sistema de mezcla, calefacción y accesorios (Ver **Tabla 6.8** y **Figura 6.1**).

Tabla 6.8: Dimensiones del tanque de PRFV utilizado como cámara de premezcla provistas por el proveedor.

| Tanque PRFV 1000 litros (Cámara de premezcla) | | | | |
|--|------------|-----------------------|----------|--------------------------|
| Capacidad (m ³) | | | | |
| Total | | Fondo elíptico | | Cuerpo cilíndrico |
| 1,0 | | 0,13 | | 0,88 |
| Dimensiones (m) | | | | |
| Diámetro | hcl | hf | a | Hl |
| 1 | 1,12 | 0,25 | 0,70 | 2,07 |
| Superficie exterior (m ²) | | | | |
| Total | | Fondo elíptico | | Cuerpo cilíndrico |
| 4,6 | | 1,08 | | 3,52 |

Tanque de PRFV de Tapa Plana

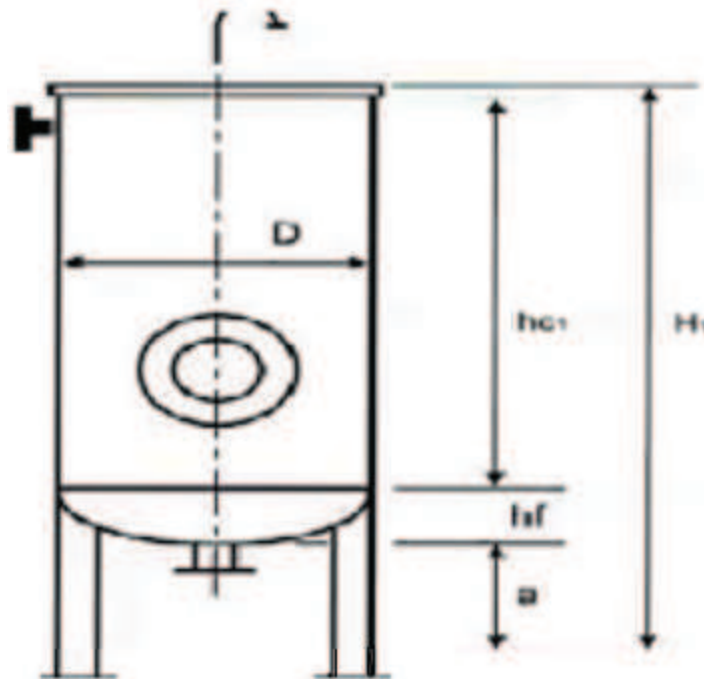


Figura 6.1: Esquema del reactor de PRFV adoptado. Fuente: Hurner Argentina S.A.

- **Sistema de mezcla**

El sistema de mezcla en la cámara de premezcla es fundamental para asegurar la homogenización tanto de la temperatura, pH y concentraciones previo al ingreso al reactor para evitar el impacto negativo por cargas puntuales que puedan llegar a desestabilizar el proceso anaeróbico.

Para este caso se seleccionó un agitador tipo turbina de eje vertical no centrado, el cual genera un flujo que se desprende de las paletas del impulsor y luego retorna a la zona central de las mismas (**Figura 6.2**), recomendados a nivel industrial para realizar el mezclado de líquidos y suspensión de sólidos en tanques pequeños, lo cuál ajusta a los requerimientos planteados (McCabe et al., 2007).

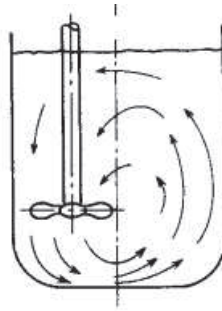


Figura 6.2: Esquema de flujo del agitador no centrado. Fuente:McCabe et al., 2007

Como base del diseño del agitador mecánico, se utilizan los datos indicados en la **Tabla 6.8** que se muestra a continuación. Todos los cálculos y criterios de diseños fueron adoptados de McCabe et al., 2007.

Tabla 6.8: Parámetros de diseño para el agitador mecánico de la cámara de premezcla

Tanque PRFV 1000 litros (Cámara de premezcla)

| Mezcla sustrato (Fracción sólida y efluente cervecero líquido en proporción 1:2) | Caudal Actual - Mínimo | Caudal de Diseño - Máximo | |
|--|--------------------------|---------------------------|-------------------|
| Parámetro | Valor | | Unidades |
| Temperatura de trabajo | 35 | | °C |
| Viscosidad a T promedio | 0,720 x 10 ⁻³ | | kg/m.s |
| Densidad | 1050 | | kg/m ³ |
| Diámetro del tanque | 1,00 | | m |
| Altura del Tanque | 1,63 | | m |
| Altura del líquido | 0,98 | 1,01 | m |
| Volumen de llenado | 0,77 | 0,80 | m ³ |

Se seleccionó para el agitador un impulsor del tipo turbina de hojas planas y disco de 4 palas inclinadas a 45°, ya que es de uso común en fluidos de baja viscosidad y velocidades entre 20 a 200 rpm, requiriendo menos potencia para funcionar que otros sistemas. Para los cálculos posteriores se adopta una velocidad de giro de 120 rpm.

Para el diseño del agitador se deben considerar las siguientes variables: diámetro del tanque (Dt), altura del fluido (H), diámetro del impulsor (Da), ancho de las palas (W), ángulo de inclinación de las placas (β), y distancia desde el fondo del tanque hasta el impulsor (E). Todas ellas se exponen en el esquema presentado en la **Figura 6.3** a continuación en base a un impulsor del tipo turbina de placas planas sin inclinación.

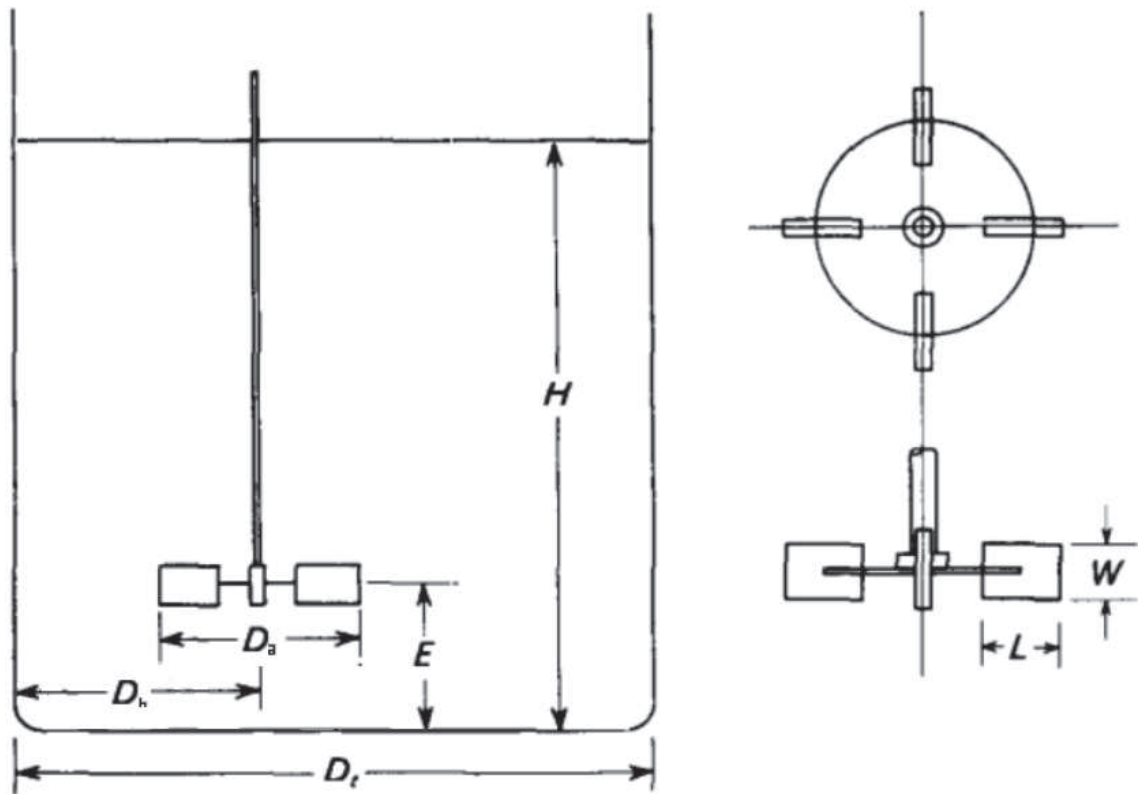


Figura 6.3: Esquema de las dimensiones de un agitador estándar tipo turbina. Fuente: McCabe et al., 2007.

Como criterio general, suelen utilizarse relaciones o semejanzas geométricas entre las variables para definir valores aproximados de éstas y encontrar el agitador que mejor se adapte al caso. Las proporciones típicas para un agitador de tipo turbina se presentan a continuación en la **Ecuación 6.9**:

Ecuación 6.9 $\frac{D_a}{D_t} = \frac{1}{3}$ $\frac{H}{D_t} = 1$ $\frac{E}{D_t} = \frac{1}{3}$ $\frac{W}{D_a} = \frac{1}{6}$ $\frac{L}{D_a} = \frac{1}{4}$

A partir de los datos presentados en la **Tabla 6.8** y las relaciones de la **Ecuación 6.8**, se calculan las dimensiones del agitador requerido (**Tabla 6.9**), partiendo del diámetro del tanque (D_t) igual a 1,00 m y una altura de líquido (H) promedio de 1,00 m:

Tabla 6.9: Dimensiones de diseño del agitador tipo turbina obtenidas a partir de la relaciones geométricas

| Variable | Unidad | Valor |
|--|--------|-------|
| Diámetro del impulsor (D_a) | m | 0,33 |
| Distancia desde el fonde a la base del impulsor (E) | m | 0,33 |
| Distancia desde el borde al eje axial del impulsor (D_b) | m | 0,40 |
| Largo de paleta (L) | m | 0,08 |
| Ancho de Paleta (W) | m | 0,06 |

A partir de las dimensiones calculadas, es posible determinar la potencia consumida por el agitador relacionando a través de gráficos dos números adimensionales: el número de Reynolds (Re) y el número de Potencia (N_p).

El número de Reynolds es una expresión adimensional que permite caracterizar el movimiento de un fluido al relacionar su densidad, viscosidad, velocidad y la dimensión típica de un flujo. Para números de $Re < 300$ se suponen flujos laminares, y para $Re > 10000$ se suponen flujos turbulentos, encontrándose en el medio una zona de transición entre ambos tipos de flujos.

Ecuación 6.10
$$Re = \frac{nD_a^2\rho}{\mu}$$

Donde:

Re es el número de Reynolds

n es la velocidad de rotación, expresado en rps

D_a es el diámetro del impulsor, expresado en m

ρ es la densidad del fluido, expresado en kg/m^3

μ es la viscosidad del fluido, expresada en $kg/m.s$

El número de Potencia (N_p) refleja la proporción entre la fuerza de rozamiento que actúa sobre una unidad de área del impulsor y la fuerza de inercia. Su valor responde a la siguiente expresión:

Ecuación 6.11

$$N_p = \frac{P}{n^3 D_a^5 \rho}$$

Donde:

N_p es el número de Potencia

P es la potencia de agitación del impulsor (Watts)

n es la velocidad de rotación, expresado en rps

D_a es el diámetro del impulsor, expresado en m

ρ es la densidad del fluido, expresado en kg/m^3

Cuando el tanque no posee placas deflectoras su valor puede obtenerse a partir de la **Figura 6.1a**, presente en el **Anexo**. Determinando el número de Reynolds puede interpolarse el número de potencia y con éste determinar la potencia necesaria para el agitador.

Suponiendo una eficiencia del motor de agitación del 70% y pérdidas por fricción del 35%, se obtiene la potencia del motor requerida. Los resultados se muestran a continuación en la **Tabla 6.10**.

Tabla 6.10: Rpm, Número de Reynolds, número de Potencia y Potencia teóricos del sistema de agitación

| Parámetro | Valor |
|------------------------------|--------------|
| Rpm | 120 |
| Número de Reynolds (Re) | 317625 |
| Tipo de flujo | Turbulento |
| Número de Potencia (N_p) | 6 |
| Potencia (W) | 197 |
| Potencia (HP) | 0,3 |
| Potencia Motor (HP) | 0,5 |

**Valor de motor requerido asumiendo pérdidas por fricción del 35% y una eficiencia en el motor del 75%*

A partir de lo calculado se determina qué es necesario instalar un motor de 0,5 HP de potencia.

- **Sistema de calefacción**

La mezcla debe ingresar al reactor con una temperatura de 35°C para evitar la fluctuación de la temperatura dentro del reactor que afecte negativamente a los microorganismos presentes.

Conociendo los valores de temperatura de salida del proceso y los calores específicos de los residuos sólidos y el efluente líquido proveniente de las aguas de lavado de la Brewhouse presentes en la **Tabla 6.11**, puede calcularse el calor específico del bagazo y posteriormente la temperatura final al mezclar ambas corrientes durante el pretratamiento.

Para poder calcular el calor específico del bagazo, se utilizaron los calores específicos del agua y la malta. Si bien el efluente líquido tiene una composición distinta a la del agua, y por lo tanto un valor específico propio, su bajo contenido de sólidos permite asumir el valor del agua sin que esto provoque variaciones relevantes en los cálculos.

Tabla 6.11: Parámetros de salida para el cálculo de la temperatura final de mezcla durante el pretratamiento

| Parámetro | Valor |
|---|--------------|
| Temperatura inicial residuos sólidos (°C) | 75 |
| Calor específico malta (kJ/kg.°C)* | 1,674 |
| Temperatura inicial efluente líquido (°C) | 28,75 |
| Calor específico agua (kJ/kg.°C) | 4,184 |

*Fuente: Marqués, M. (2001)

A continuación se exponen las ecuaciones y resultados utilizados en la determinación del calor específico del bagazo y el cálculo de temperatura de mezcla:

Ecuación 6.12

$$C_{e_{bagazo}} = \frac{C_{e_{malta}} \cdot ST + C_{e_{Agua}} \cdot Hum}{100}$$

Donde:

$C_{e_{Bagazo}}$ es el calor específico del bagazo, expresado en kJ/kg.°C

$C_{e_{malta}}$ es el calor específico de la malta, valor informado por Marqués (2001) para un valor igual a 1,674 kJ/kg.°C

$C_{e_{Agua}}$ es el calor específico del agua presente en composición del bagazo, expresado en kJ/kg.°C

ST es la composición porcentual de sólidos presentes en el bagazo, expresada en % m/m

Hum es la composición porcentual de agua presentes en el bagazo, expresada en % m/m

Ecuación 6.13

$$T_{mezcla} = \frac{m_{efluente} \cdot C_{eAgua} \cdot T_{efluente} + m_{residuos\ sólidos} \cdot C_{e\ bagazo} \cdot T_{e\ bagazo}}{m_{efluente} \cdot C_{eAgua} + m_{residuos\ sólidos} \cdot C_{e\ bagazo}}$$

Donde:

T_{mezcla} es la temperatura final de la mezcla, expresada en °C

$T_{efluente}$ es la temperatura con la que ingresa el efluente líquido a la cámara de mezcla, expresada en °C

T_{bagazo} es la temperatura con la que ingresa el bagazo a la cámara de mezcla, expresada en °C

$C_{e\ Bagazo}$ es el calor específico del bagazo, expresado en kJ/kg.°C

$C_{e\ Agua}$ es el calor específico del agua, expresado en kJ/kg.°C

$m_{efluente}$ es la masa de efluente líquido que ingresa a la cámara de mezcla luego de cada cocción, expresada en kg

m_{bagazo} es la masa de bagazo que ingresa en la cámara de mezcla luego de cada cocción, expresada en kg

A partir de las mencionadas ecuaciones se obtuvieron los resultados expuestos en la **Tabla 6.12:**

Tabla 6.12: Resultados obtenidos para el cálculo de el calor específico del bagazo y la temperatura final de mezcla durante el pretratamiento

| Parámetro | Valor |
|------------------------------------|--------------|
| Calor específico bagazo (kJ/kg.°C) | 3,53 |
| Temperatura final mezcla (°C) | 42,5 |

Recordando que la temperatura requerida para ingresar al reactor es de 35°C, a simple vista, las altas temperaturas con las que se extrae el bagazo del macerador, implican que ningún tipo de calentamiento adicional es requerido (es más, considerando el valor estricto obtenido, la mezcla requeriría unos minutos de enfriamiento para alcanzar la temperatura deseada). Sin embargo, esto es correcto siempre y cuando su transporte y

posterior mezcla con el efluente líquido ocurran rápidamente y se desprecien todas las pérdidas de calor ocasionadas por el bombeo, transporte por tuberías y el contacto con las paredes del tanque de pretratamiento, así como también la influencia de la temperatura ambiente del interior del recinto, que puede oscilar aproximadamente entre 10 a 30°C entre invierno y verano. Por todos estos motivos se decidió instalar un sistema de calentamiento que permita elevar la temperatura de la mezcla en caso probable de ser requerida.

Para poder seleccionar correctamente el tipo de intercambiador de calor requerido, se seleccionó una temperatura inicial de la mezcla de 25°C que requiera elevarse hasta los 35°C establecidos previo a ingresar en el tanque.

Para calcular la energía necesaria para calentar la mezcla por cada alimentación se cumplió con la siguiente expresión:

Ecuación 6.14

$$Q_{req} = (m_{efluente} \cdot C_{e_{agua}} + m_{bagazo} \cdot C_{e_{bagazo}}) (T_{final\ pretratamiento} - T_{inicial\ pretratamiento})$$

Donde:

Q_{req} es el calor requerido para elevar el volumen total de la mezcla de 25°C a 35°C, expresado en kJ.

$m_{efluente}$ es la masa de efluente líquido que ingresa a la cámara de mezcla luego de cada cocción, expresada en kg

m_{bagazo} es la masa de bagazo que ingresa en la cámara de mezcla luego de cada cocción, expresada en kg

$C_{e_{Bagazo}}$ es el calor específico del bagazo, expresado en kJ/kg.°C

$C_{e_{Agua}}$ es el calor específico del agua, expresado en kJ/kg.°C

$T_{final\ pretratamiento}$ es la temperatura final obtenida con el pretratamiento, es decir 35°C

$T_{inicial\ pretratamiento}$ es la temperatura inicial del pretratamiento, es decir 25°C

A partir de la energía necesaria para elevar la temperatura de la mezcla, se calculó la cantidad de biogás requerido para suministrar dicha energía. Asumiendo el poder calorífico del gas presentado en la **Tabla 6.3** y un 60% de rendimiento en la transferencia de energía se procedió a calcular el volumen de biogás requerido en esta etapa.

Ecuación 6.15 $Biogás\ consumido_{Pretratamiento} = \frac{Q_{req}}{PC_{Biogás}} \cdot \frac{100}{R}$

Donde:

Biogás consumido_{Pretratamiento} es el consumo de biogás necesario para el intercambiador de calor, expresado en m³

Q_{req} es el calor requerido para elevar el volumen total de la mezcla de 25°C a 35°C, expresado en kJ.

PC_{Biogás} es el poder calorífico del biogás, expresado en kJ/m³

R es el porcentaje de rendimiento en la transferencia de energía en la combustión del biogás

Asumiendo que el proceso de calentamiento de la mezcla solo dure un lapso de 60 minutos, se puede obtener la potencia requerida. Los resultados junto con el poder calorífico del biogás se encuentran expresados en la **Tabla 6.13**.

Por cuestiones de facilitar la interpretación, los cálculos realizados solo se muestran para el caudal máximo proyectado ya que no mostraban diferencias relevantes con respecto al caudal actual.

Tabla 6.13: Calor y volúmen de biogás requeridos durante el pretratamiento

| Parámetros / Caudal | Diseño/máximo |
|---|----------------------|
| Calor requerido (kJ) | 30879 |
| Potencia requerida (kW) | 8,6 |
| Poder calorífico biogás (kJ/m ³)* | 2,3.10 ⁴ |
| Biogás requerido (m ³) | 2,2 |

* Valor extraído del Manual de Biogás, 2011 para una concentración de CH₄ del 60%

El tanque de pretratamiento cuenta con un sistema de aislamiento estándar compuesto por un recubrimiento de fibra de vidrio de 5 cm de espesor. Para el intercambio de calor del tanque se instalará un sistema tipo serpentina interno por el cual circulará agua caliente a 38°C proveniente de un termotanque adaptado para utilizar biogás descrito en la **Sección 6.2.4**. Para el dimensionamiento de el intercambiador de calor del tanque de pretratamiento se enlistan los siguientes criterios adoptados a partir de los establecidos por Perry, et al., (1997):

- Separación entre la serpentina y el fondo de la cámara 0,0508-0,1524 m
- Distancia a las paredes de la cámara > 0,15 m
- Distancia máxima entre las vueltas de la serpentina 0,6 m

Teniendo en cuenta estas recomendaciones y adaptándolas a las dimensiones de la cámara de pretratamiento, se definen los siguientes parámetros para el sistema de calentamiento:

- Separación entre serpentina y paredes de la cámara: 0,15 m
- Distancia entre vueltas de serpentina: 0,06 m.

Para poder obtener las dimensiones requeridas se plantea la diferencia media logarítmica de temperaturas entre el agua caliente y la solución mezcla a calentar.

Ecuación 6.16

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

Donde:

ΔT_m es la diferencia media logarítmica de temperatura

ΔT_1 es la diferencia de temperatura entre la corriente de agua caliente y la temperatura inicial de la solución

ΔT_2 es la diferencia de temperatura entre la corriente de agua caliente y la temperatura final de la solución

Luego se aplica la siguiente ecuación para aproximar el área requerida.

Ecuación 6.17

$$\frac{Q}{\Delta t} = U_0 A_0 \Delta T_m$$

Donde:

Q es el calor requerido para elevar el volumen total de la mezcla de 25°C a 35°C, expresado en kJ.

Δt es el tiempo de mezcla, expresado en horas

U_0 es el coeficiente de transferencia de calor, expresado en kJ/h m²C°

A_0 es el área de transferencia, expresada en m²

ΔT_m es la diferencia media logarítmica de temperatura

Una vez determinada el área de transferencia, la longitud del serpentín y el número de espirales están definidos por las siguientes expresiones:

Ecuación 6.18
$$A = \pi r L$$

Ecuación 6.19
$$L = \pi D N$$

Donde:

A es el área de transferencia, expresada en m²

r es el radio exterior de la tubería del serpentín, expresado en m

L es el largo sumergido del serpentín, expresado en m

D es el diámetro de giro del serpentín, expresado en m

N es el número de espirales del serpentín

El material utilizado como serpentina son tubos de acero inoxidable de 1 pulgada ($D_o=3,340$ cm, $D_i=2,54$ cm) del tipo comercializado comúnmente para cervecerías. Basándose en las tablas presentadas en Barderas (2013) para la cañería utilizada como serpentín se define un coeficiente de transferencia de calor igual a $500 \text{ W/m}^2\text{C}^\circ$ ($430 \text{ kcal/h.m}^2.\text{C}^\circ$). A su vez se toma un diámetro de espiral de 700 mm, con lo cual se obtienen los resultados expuestos a continuación en la **Tabla 6.14**:

Tabla 6.14: Resultados obtenidos para el cálculo del serpentín utilizado como intercambiador de calor durante el pretratamiento

| Parámetros / Caudal | Diseño/máximo |
|----------------------------|----------------------|
| $A_0 \text{ (m}^2\text{)}$ | 1,5 |
| L (m) | 14,6 |
| N | 8 |

En base a los resultados obtenidos, se añaden la porción de serpentina por fuera del líquido dando un largo de 17 m de serpentina requeridos para su instalación.

- **Neutralización**

Debido a que el sistema de la mezcla es aproximadamente pH 5,6 (**Tabla 6.7**) este debe ser llevado hasta pH neutro para evitar la desestabilización del medio biológico por el agregado de cargas puntuales ácidas. Para ello se utilizara principalmente solución 0,3 %m/v de HCl y en caso de necesitar corrección, solución 0,3% m/v de NaOH, ambas son

fácilmente obtenible en las cervecerías por dilución 1:100, a partir de las soluciones de HCl y NaOH concentradas al 30% m/v, comúnmente utilizadas en el proceso industrial en limpieza y desinfección de equipos.

Para el cálculo de la cantidad de ácido a incorporar a la mezcla necesaria para alcanzar el pH neutro es necesario aplicar la siguiente ecuación:

Ecuación 6.20

$$V_{HCl\ 0,3\%} = \frac{\left(V_{efluente} + \frac{0.75\ m_{bagazo}}{\delta_{bagazo}} \right) \cdot (10^{-pH_{mezcla}} - 10^{-pH_{neutro}})}{[H^+]_{HCl\ 0,3\%}}$$

Donde:

$V_{HCl\ 0,3\%}$ es el volumen aproximado de solución diluida de HCl necesaria para neutralizar la mezcla

$V_{Efluente}$ es el caudal volumétrico del efluente líquido por alimentación, expresado en litros/día

m_{bagazo} es el caudal másico del bagazo, expresado en kg/día

δ_{bagazo} es la densidad del bagazo, expresada en kg/litro

pH_{mezcla} es el pH final obtenido de la mezcla previo al agregado de solución HCl 30%

pH_{neutro} es el pH deseado, es decir 7,0.

$[H^+]_{HCl\ 0,3\%}$ es la concentración molar de hidronios presentes en la solución 0,3% m/v de HCl, expresado en mol/litro

Se deben agregar aproximadamente **28 ml de solución HCl 0,3% m/v** en cada pretratamiento para neutralizar el volumen de mezcla.

● **Accesorios**

A pesar de que durante el pretratamiento no se espera ningún tipo de emisión de biogás en esta etapa, es recomendable que el sistema se encuentre lo más herméticamente cerrado posible (para así disminuir el intercambio con el aire lo más posible). Es por esto que busca reducirse a lo indispensable el número de perforaciones realizadas en el tanque de PRFV y que todas aquellas se encuentren herméticamente selladas.

Sin embargo, resulta indispensable para garantizar un correcto acondicionamiento de la mezcla durante el pretratamiento, que éste cuente con:

- a) Sonda fija multiparamétrica del tipo industrial que controle el pH y la temperatura
- b) Entrada de alimentación sumergida que permita agregar la solución de HCl (o NaOH llegado el caso)
- c) Tapa de ingreso para los residuos sólidos y líquidos

- d) Cañería de salida ubicada en fondo del tanque que a través de una bomba estercolera pueda enviar la mezcla hacia el biodigestor o para el vaciado de su contenido luego de realizar operaciones de limpieza.
- e) Para generar la corriente de agua caliente utilizada como calefacción durante el pretratamiento, es necesario instalar un sistema tipo termotanque doméstico a gas de 160 litros con el quemador adaptado para utilizar biogás. Este accesorio es compartido con el biodigestor y su selección se detalla en la **Sección 6.2.4**.

- **Sistema de carga/alimentación**

El sistema de carga cuenta con dos líneas, una consiste en el efluente líquido proveniente de las operaciones de limpieza del macerador y la olla de cocción, y la otra que contiene los residuos sólidos.

La línea líquida baja por gravedad a un pozo de bombeo del cual se extrae el volumen de bombeo requerido, utilizando una bomba centrífuga de 0,5 HP (debe elevar del fondo del pozo de bombeo hasta la parte superior del tanque, aproximadamente 3m). El resto del efluente líquido generado se descarta por rebalse al sistema de canaletas, detallado al final del presente capítulo, que finaliza en el actual sistema de disposición de efluentes líquidos que posee la planta.

La línea sólida se recolecta en un carro contenedor en el macerador y las otras etapas correspondientes del proceso y se introducen en la tolva que conecta a un tornillo sinfín (este mecanismo es denominado comúnmente “chimangera”) el cual tiene la función de poder cargar el tanque con facilidad para el operador. Se recomienda realizar la carga apenas ocurre la extracción del bagazo y su posterior lavado, no dejando pasar mucho tiempo para no generar mucha pérdida de temperatura.

Los criterios de selección de la tolva con el tornillo sinfín son:

- La tolva debe tener una capacidad de 0,6 m³ (el volumen de residuos sólidos generados por alimentación + margen de seguridad del 20%)
- La altura del tornillo debe alcanzar la tapa superior del tanque ubicada aproximadamente a 2,10 m

A continuación se expone en la **Figura 6.4** un esquema de los pasos durante la carga del tanque de pretratamiento:

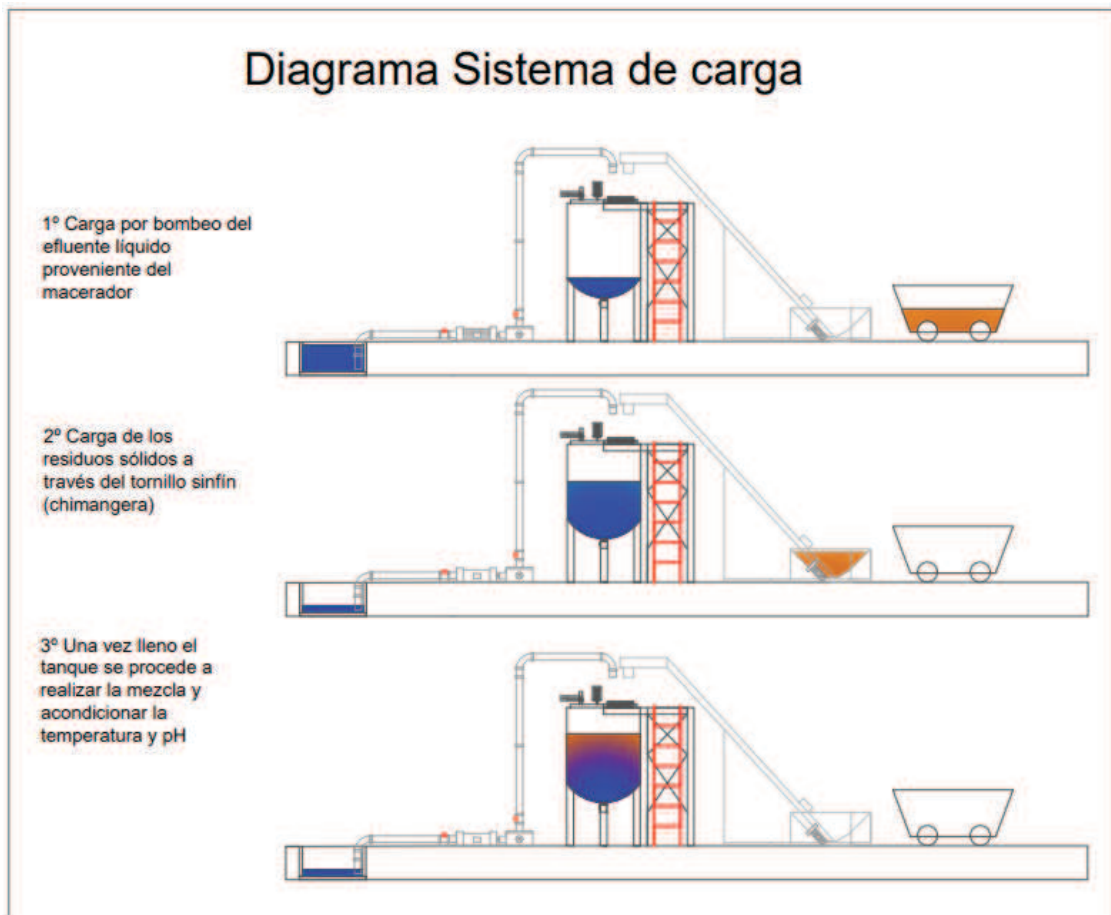


Figura 6.4: Diagrama de carga del tanque de pretratamiento.

- **Dimensiones, valores y planos**

En base a los cálculos realizado se expone a continuación el conjunto de los resultados obtenidos en las **Tablas 6.15 y 6.16** y los planos y dimensionamiento del tanque de premezcla (**Figura 6.5**).

Tabla 6.15: Dimensiones finales y parámetros operacionales del tanque de pretratamiento. Parte 1.

| Pretratamiento | | |
|-----------------------------------|--|--------------|
| Dimensión | Unidad | Valor |
| Tanque de pretratamiento | | |
| Tipo | Tanque PRFV | |
| Capacidad | m ³ | 1 |
| Diámetro | m | 1 |
| Altura Total | m | 2,1 |
| Altura Tanque | m | 1,4 |
| Altura liquido* | m | 1 |
| Grosor aislamiento lana de vidrio | m | 0,05 |
| Superficie total | m ² | 4,6 |
| Sistema de Mezcla | | |
| Tipo | Agitador tipo turbina de 4 palas a 45° | |
| Velocidad | rpm | 120 |
| Potencia motor | HP | 0,5 |
| Diámetro impulsor | m | 0,3 |
| Separación Fondo-impulsor | m | 0,3 |
| Ancho Paletas | m | 0,06 |
| Largo Paletas | m | 0,08 |
| Distancia borde axial-impulsor | m | 0,4 |
| Tiempo mezcla | min/d | 60 |

*Considerando desde la base del elipsoide.

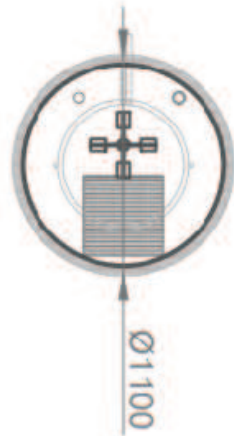
Tabla 6.16: Dimensiones finales y parámetros operacionales del tanque de pretratamiento. Parte 2.

| Pretratamiento | | |
|--------------------------------------|--|--------------|
| Dimensión | Unidad | Valor |
| Sistema de Calefaccionamiento | | |
| Tipo | Serpentina tipo industrial acero 1" inoxidable comercial conectada a caldera | |
| Temperatura inicial* | °C | 25 |
| Temperatura final | °C | 35 |
| Temperatura agua de caldera | °C | 38 |
| Largo serpentina | m | 17 |
| Diámetro serpentina | m | 0,7 |
| Nº de vueltas serpentina | | 8 |
| Potencia requerida | kW | 9 |
| Biogás consumido | m ³ /d | 2,3 |
| Tiempo mezcla | min/d | 60 |
| Sistema de neutralización | | |
| pH inicial | | 5,6 |
| pH final | | 7 |
| Volumen de Sc NaOH 0,3%/m/v | ml/d | 28 |
| Accesorios | | |
| Sonda fija multiparamétrica | Cant | 1 |
| Tubo de ingreso ácido-base | | |
| Tapa de tanque cuadrada | Cant | 1 |
| Lado de tapa de tanque | m | 0,4 |
| Tolva + tornillo sinfin (chimangera) | | |
| Capacidad tolva | m ³ | 0,6 |
| Altura tornillo | m | 2,1 |
| Bomba centrifuga | HP | 0,5 |
| Cañería PVC 100 mm | m | 10 |
| Volumen pozo de bombeo | m ³ | 2 |

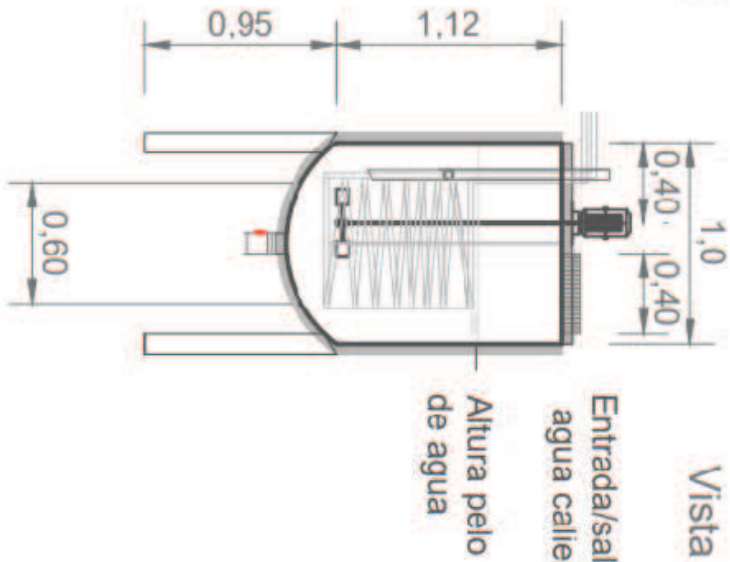
*Temperatura adoptada como inicial

Vista Superior

Tanque de Pretratamiento



Vista Frontal



Vista Lateral

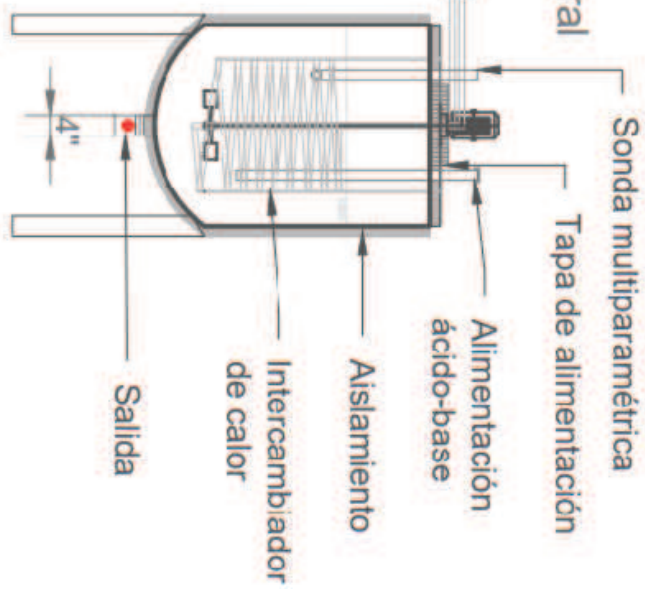


Figura 6.5: Planos del tanque de pretratamiento

6.2.4 Biodigestor

A continuación se presentan los cálculos realizados para el dimensionamiento del biodigestor del tipo **reactor tanque agitado continuo (CSTR)**, por sus siglas en inglés). Para ello se utilizaron algunas expresiones detalladas a continuación:

- **Tiempo de retención hidráulico (TRH)** es el tiempo que el efluente a tratar permanecerá en el reactor y debe ser suficiente para asegurar un tratamiento apropiado
- **Tiempo de retención celular (θ_c)** es el tiempo medio de residencia de la materia orgánica en el reactor
- **Carga Orgánica (CO)**: es la cantidad de materia orgánica que se introducirá en el reactor, determinada a partir del caudal y de la concentración:
- **Carga orgánica volumétrica (COV)**: Es la carga orgánica expresada por volumen de reactor.

La carga orgánica diaria que ingresa en el reactor se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$\text{Ecuación 6.21} \quad CO = Q \cdot C$$

Donde:

CO = carga orgánica en términos de DQO (kg DQO/d)

C = concentración de DQO (kg DQO/m³)

Por otra parte la carga orgánica volumétrica se obtiene a partir de la relación entre la carga orgánica diaria y el volumen del reactor.

$$\text{Ecuación 6.22} \quad COV = \frac{CO}{V_{reactor}}$$

Donde:

COV = Carga orgánica volumétrica (kg DQO/m³.d)

V_{reactor} = Volumen del reactor (m³)

CO = carga orgánica en términos de DQO (kg DQO/d)

A su vez el tiempo de retención hidráulico queda definido por:

Ecuación 6.23
$$TRH = \frac{V_{reactor}}{Q}$$

Donde:

$V_{reactor}$ = Volumen del reactor (m³)

Q = Caudal de mezcla diario que ingresa en el reactor (m³/d)

TRH = Tiempo de retención hidráulico (d)

Por último, para garantizar la calidad y estabilidad de los microorganismos encargados de degradar la materia orgánica se define:

Ecuación 6.24
$$\theta_c = \frac{V_{reactor} X_{reactor}}{Q_p X_p}$$

Donde:

θ_c = Tiempo de retención celular (d)

$V_{reactor}$ = Volumen del reactor (m³)

$X_{reactor}$ = biomasa contenida dentro del biodigestor (g SV/L)

X_p = biomasa que egresa con la purga de lodos (g SV/L)

Q_p = caudal de purga de lodos, expresado en m³/d

También, para realizar un correcto dimensionamiento, se definen las siguientes variables (**Figura 6.6**):

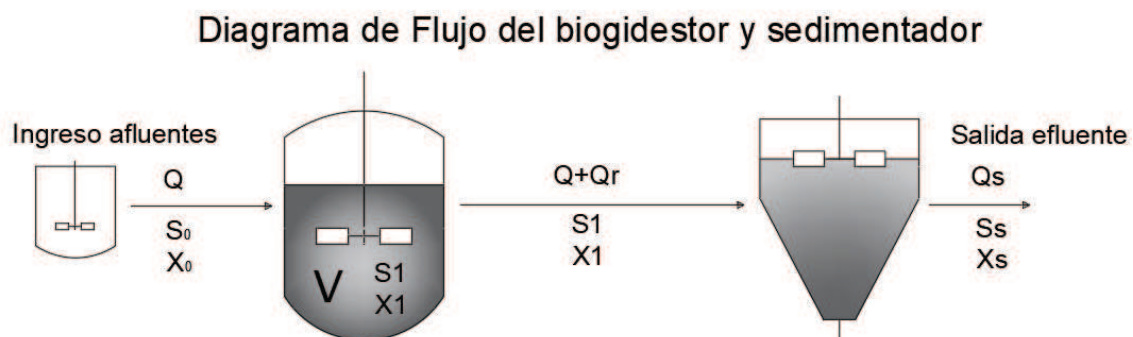


Figura 6.6: Diagrama de flujo del biodigestor y sedimentador con las variables correspondientes

Donde:

Q es el caudal de ingreso, expresado en m^3/d

Q_s es el caudal de salida, expresado en m^3/d

Q_r es el caudal de recirculado, expresado en m^3/d

Q_p es el caudal de purga de lodos, expresado en m^3/d

X_0 es la biomasa que ingresa con el afluente, expresada en g SV/L

X_1 es la biomasa contenida dentro del biodigestor, expresada en g SV/L

X_s es la biomasa que egresa con el efluente, expresada en g SV/L

X_r es la biomasa que contenida en el reciclo, expresada en g SV/L

X_p es la biomasa que egresa con la purga de lodos, expresada en g SV/L

S_0 es la concentración de sustrato que ingresa con el afluente, expresada en kg DQO/ m^3

S_1 es la concentración de sustrato dentro del biodigestor con el afluente, expresada en kg DQO/ m^3

S_s es la concentración de sustrato que egresa con el efluente, expresada en kg DQO/ m^3

Frente a la ausencia de datos confiables sobre el comportamiento cinético y constantes del inóculo anaeróbico en presencia de el sustrato en estudio, para definir el volumen total del reactor, se utilizó la **Ecuación 6.22**. Para ello, según los valores recomendados por el Manual de Biogás (2011), **se adoptó como valor de diseño conservador de COV de 4,5 kg DQO/ $m^3.d$ y un tiempo de retención celular (θ_c) de 20 días** debido a que el bagazo es un residuo de alto contenido lignocelulósico y requiere tiempos de retención altos (y por lo tanto cargas orgánicas volumétricas menores) para asegurar que la etapa hidrolítica descomponga con éxito las biomoléculas más complejas cuyos productos son usados como sustrato de las bacterias productoras de metano. Esto se observa en los resultados experimentales obtenidos por Panjičko et al., (2017), donde el pico productivo de biogás obtenido utilizando bagazo como monosustrato en un reactor anaeróbico, ocurre generalmente entre los primeros 15 días. Esto también se ve corroborado por lo expuesto por Reynolds & Ritchard (1996) donde recomiendan para este tipo de biodigestor tiempos de digestión entre 10 a 20 días y COV entre 2,40 y 6,40 kg DQO/ $m^3.d$.

Para garantizar la carga de microorganismos se definió un caudal de reciclo del 50% respecto al caudal de ingreso, es decir:

Ecuación 6.25
$$0,5 = \frac{Q_r}{Q}$$

Donde:

Q = caudal de ingreso (m³/d)

Q_r = caudal de reciclo (m³/d)

A partir de la carga orgánica volumétrica y tiempo de retención celular adoptados, los caudales de ingreso y reciclo, y concentraciones presentes en la **Tabla 6.7** (cálculos de mezcla), pueden obtenerse el volumen de reactor, la carga orgánica, el tiempo de retención hidráulico, el caudal de purga del sedimentador y efluente líquido obtenido por el proceso. Debido a que se trata de un sistema de digestión anaeróbica mesofílica tipo tanque mezcla completa, con reciclo y control de temperatura, basándose en los datos expuestos por Metcalf & Eddy (1991), se asume un porcentaje de remoción de DQO del 80%.

En la **Tabla 6.17** y **6.18** pueden observarse los parámetros utilizados y los valores obtenidos. Debido a que el caso de estudio cuenta con una producción actual de 5 días a la semana, y el biodigestor se alimenta de modo discontinuo por las cargas puntuales generadas en cada día productivo, el caudal diario se diferencia del promedio diario debido a que la alimentación ocurre luego de la cocción en el proceso productivo y eso sólo ocurre en las condiciones actuales de diseño 5 veces por semana.

Tabla 6.17: Parámetros de diseño y variables calculadas para el diseño del reactor: Parte I

| | Parámetros de Diseño | | | | Variables calculadas | | |
|------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|----------------------------|----------------------|---------------------------|------------------------------------|
| | Caudal (m ³ /d productivo) | Caudal promedio (m ³ /d) | COV (kg DQO/m ³ .d) | C (kg DQO/m ³) | CO (kg DQO/d) | Volumen (m ³) | Tiempo de Retención hidráulico (d) |
| Caudal Actual (Mínimo) | 0,77 | 0,53 | 4,5 | 60 | 32 | 7,1 | 13 |
| Caudal Proyectoado (Máximo) | 0,80 | 0,80 | 4,5 | 60 | 48 | 10,7 | 13 |

Tabla 6.18: Parámetros de diseño y variables calculadas para el diseño del reactor. Parte II

| | Parámetros de Diseño | | | | Variables calculadas | | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|--|---------------------------|-------------------------|--|---------------------------------------|--|--|
| | Tiempo de retención celular (d) | Concentración DQO entrada (kg/m ³) | Fracción SV reactor (g/L) | Fracción SV purga (g/L) | Concentración DQO salida (g/m ³) | Caudal de reciclo (m ³ /d) | Caudal de efluente (m ³ /d) | Caudal de purga (m ³ /semana) |
| Caudal Actual (Mínimo) | 20 | 60,3 | 8 | 80 | 12 | 0,26 | 0,49 | 0,25 |
| Caudal Proyectado (Máximo) | 20 | 60,3 | 8 | 80 | 12 | 0,40 | 0,74 | 0,37 |

Para ser utilizado como biodigestor, considerando un margen de seguridad del 20%, se decidió adoptar un tanque de Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV) de 13000 litros de capacidad fabricados por la empresa Hürner Argentina S.A. ®, debido a los bajos costos, la resistencia a la corrosión del material y las facilidades provistas por el proveedor para la instalación del aislamiento térmico, sistema de mezcla, intercambiador de calor y los accesorios restantes.

A continuación en la **Tabla 6.19** y **Figura 6.7** se detallan las características del tanque adoptado:

Tabla 6.19: Dimensiones del tanque de PRFV utilizado como reactor provistas por el proveedor.

Tanque PRFV 13000 litros (Reactor)

| Capacidad (m ³) | | | | | | |
|---------------------------------------|-----------------|----------------|-------------------|-----|------|------|
| Total | Tapa elíptica | Fondo Elíptico | Cuerpo cilíndrico | | | |
| 13,1 | 2,0 | 2,0 | 9,1 | | | |
| Dimensiones (mm) | | | | | | |
| Diámetro | hc ₁ | ht | hf | a | H1 | H2 |
| 2500 | 1850 | 625 | 625 | 700 | 3800 | 4100 |
| Superficie exterior (m ²) | | | | | | |
| Total | Tapa elíptica | Fondo Elíptico | Cuerpo cilíndrico | | | |
| 28,1 | 6,8 | 6,8 | 14,5 | | | |

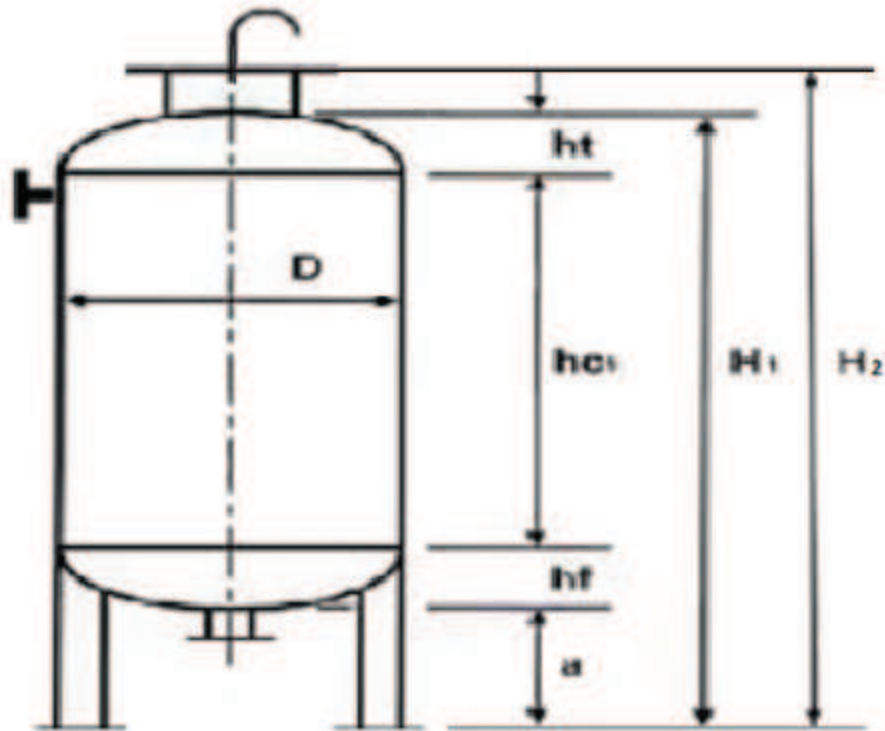


Figura 6.7: Esquema del reactor de PRFV adoptado. Fuente: Hurner Argentina S.A.

- **Sistema de mezcla**

Es importante contar con un equipo dentro del biodigestor que produzca la mezcla de los lodos que se encuentran en su interior, para lograr que:

- Se creen condiciones químicas, físicas y biológicas uniformes en el interior del tanque, siendo el objetivo prioritario lograr una temperatura uniforme en todo el volumen del biodigestor reduciendo los gradientes interiores.
- Que la mezcla de alimentación que llega al biodigestor se mezcle con los lodos en digestión activa
- Se minimice el accionar de los efectos inhibidores favoreciendo la rápida dispersión de los compuestos que los causan
- Evitar efectos de sedimentación o estratificación en su interior y acumulación de arenas, fibras o espumas
- Liberar las burbujas de biogás generadas en el seno líquido

Para cumplir con todos estos objetivos, se seleccionó un agitador de baja velocidad tipo turbina de eje vertical centrado con 4 placas deflectoras o tabiques, instalados sobre la superficie interior del tanque. Según McCabe et al., (2007) este es el método más conveniente de reducir los remolinos, impidiendo el flujo rotacional sin afectar al flujo radial y longitudinal (**Figura 6.8**), para agitadores de turbina, la anchura de la placa deflectora no es preciso que sea mayor de la doceava parte del diámetro del tanque.

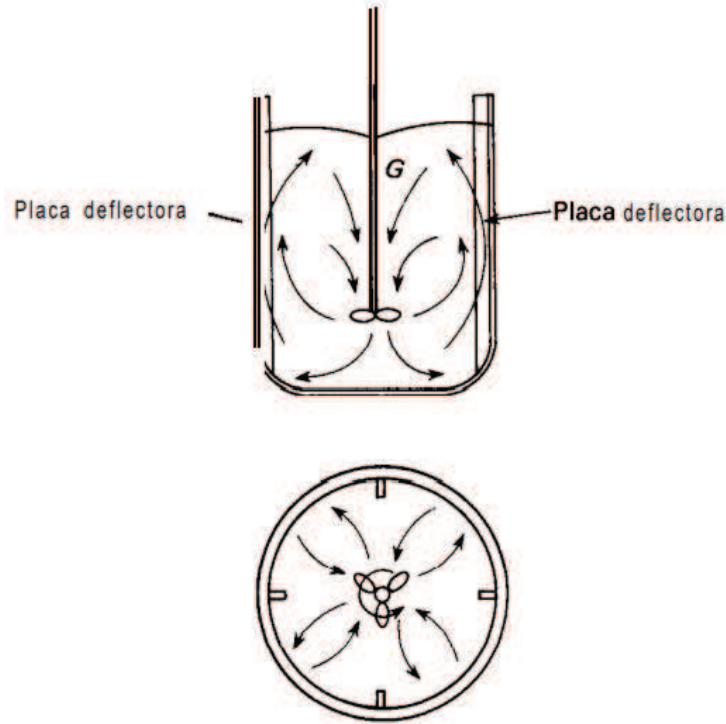


Figura 6.8: Modelo de Flujo de un tanque con placas deflectoras y un agitador de turbina instalado centralmente.
Fuente:McCabe et al., (2007).

Como base del diseño del agitador mecánico, se utilizan los datos indicados en la **Tabla 6.20** que se muestra a continuación. Todos los cálculos y criterios de diseños fueron adoptados de McCabe et al., (2007).

Tabla 6.20: Parámetros de diseño para el agitador mecánico del biodigestor

Tanque PRFV 13000 litros (Biodigestor)

| Mezcla en el biodigestor | Caudal Actual - Mínimo | Caudal de Diseño - | |
|--------------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------|
| Parámetro | Valor | | Unidades |
| Temperatura de trabajo | 35 | | °C |
| Viscosidad a T promedio | $0,720 \times 10^{-3}$ | | kg/m.s |
| Densidad | 1050 | | kg/m ³ |
| Diámetro del tanque | 2,5 | | m |
| Altura del Tanque | 3,1 | | m |
| Altura del liquido* | 1,7 | 2,4 | m |

*Respecto al fondo del tanque

Se seleccionó para el agitador un impulsor tipo turbina de tipo hojas planas y disco de 6 palas inclinadas a 45°. Este tipo de agitadores suelen tener una velocidad de giro entre

30 a 500 rpm, donde los valores mínimos corresponden a mezclas lentas para procesos como la floculación mientras que los valores más altos corresponden a mezclas rápidas como podría ser el caso de una coagulación. Para el caso del biodigestor se adoptó una velocidad de giro de 45 rpm dado que el objetivo mencionado es mantener las condiciones homogéneas, sin estresar los complejos de microorganismos y evitar la incorporación de oxígeno a la mezcla.

Para el diseño se tomaron en cuenta las variables de diseño expuestas en el dimensionamiento del agitador del tanque de pretratamiento en la **Figura 6.3** y **Ecuación 6.9**. Es necesario en este caso definir las dimensiones de los 4 tabiques verticales, donde su ancho W_{tabique} esta determinado por la **Ecuación 6.26** basada en las recomendaciones de diseño expuestas por McCabe et al., (2007) de que sea aproximadamente el 12% del diámetro total del tanque. Por otra parte es recomendable dejar un espacio entre el tabique y la pared del tanque. Esto sirve para evitar la formación de zonas muertas o cortocircuitos, sobre todo por la presencia de sólidos en la mezcla. Para la determinación de este espacio f_{tabique} se utiliza la **Ecuación 6.27**.

Ecuación 6.26
$$W_{\text{tabique}} = \frac{D_t}{12}$$

Ecuación 6.27
$$f_{\text{tabique}} = (0,015) D_t$$

Donde:

W_{tabique} es el ancho del tabique, expresado en m

D_t es el diámetro del tanque, expresado en m

f_{tabique} es la separación entre la pared del tanque y el tabique, expresado en m

A partir de los datos presentados en la **Tabla 6.21** y las relaciones de la **Ecuación 6.8**, se calculan las dimensiones del agitador requerido, partiendo del diámetro del tanque (D_t) igual a 2,50 m y una altura de líquido (H) de entre 1,70 y 2,40 m:

Tabla 6.21: Dimensiones de diseño del agitador tipo turbina obtenidas a partir de las relaciones geométricas para el biodigestor y los tabiques requeridos

| Variable | Unidad | Valor |
|---|--------|-------|
| Diámetro del impulsor (D_a) | m | 0,85 |
| Distancia desde el fonde a la base del impulsor (E) | m | 0,85 |
| Ancho del tabique (W_{tabique}) | m | 0,20 |
| Espacio pared y tabique (f_{tabique}) | m | 0,05 |
| Largo de paleta (L) | m | 0,20 |
| Ancho de Paleta (W) | m | 0,15 |

A partir de las dimensiones obtenidas se determinó el número de Reynolds (Re) utilizando la **Ecuación 6.9**. Una vez obtenido éste, puede interpolarse el número de potencia a partir de la **Figura 6.2a**, presente en el **Anexo** cuando el tanque posee placas deflectoras su valor, y con éste determinar la potencia necesaria para al agitador utilizando la **Ecuación 6.10**.

Suponiendo una eficiencia del motor de agitación del 70% y pérdidas por fricción del 35%, se obtiene la potencia del motor requerida. Los resultados se muestran a continuación en la **Tabla 6.22**.

Tabla 6.22: Número de Reynolds, número de Potencia y Potencia teóricos del sistema de agitación

| Parámetro | Valor |
|------------------------------|------------|
| Rpm | 45 |
| Número de Reynolds (Re) | 790234 |
| Tipo de flujo | Turbulento |
| Número de Potencia (N_p) | 6 |
| Potencia (W) | 1179,3 |
| Potencia (HP) | 1,58 |
| Potencia Motor (HP)* | 3,05 |

*Valor de motor requerido suponiendo pérdidas por fricción del 35% y una eficiencia en el motor del 75%

A partir de lo calculado se determina que es necesario instalar un motor de 5 HP de potencia para evitar el desgaste del equipo ya que en caso de falla, es necesario vaciar el biodigestor para su reparación, el cual es un aspecto importante a tener en consideración. A su vez, otro criterio a tener en cuenta es la impermeabilización del sistema de mezcla

para evitar la corrosión, utilizando modelos de acero inoxidable de más de 2 mm de espesor y un caño eje de mas de 3mm de espesor.

- **Sistema de calefaccionamiento**

Debido a las cuestiones anteriormente mencionadas, es imprescindible que el interior del biodigestor se encuentre permanentemente a 35°C mientras se encuentre operacional. Como sistema de calefaccionamiento se utilizará un sistema de serpentinas con circulación de agua a 38°C similar al utilizado en el tanque de pretratamiento, ya que evita gradientes bruscos de temperatura que puedan inhibir los microorganismos mesófilos.

Sin embargo, en este caso, el objetivo es mantener la temperatura constante, con lo cuál el cálculo de la superficie y largo de serpentina requerida esta dado por el balance de pérdidas de calor por parte del tanque al ambiente. Para ello se calcularon las pérdidas de calor del tanque compuesto por una capa de PRFV de 3 cm de espesor y un aislamiento térmico compuesto por una capa de lana de vidrio de 10 cm de espesor.

La temperatura ambiente del caso de estudio, es decir un recinto industrial del tipo galpón en medio de una zona urbana, puede oscilar aproximadamente entre 10°C y 30 °C entre invierno y verano. Para el dimensionamiento del intercambiador de calor se seleccionó la condición mas desfavorable, en este caso de 10 °C de temperatura ambiente.

A partir de las ecuaciones y tablas presentadas por la Guía de Buenas Prácticas en el Aislamiento Industrial (AFELMA & ANDIMAI, 2016) se obtuvieron las ecuaciones y conductividades térmicas de los materiales expuestas a continuación:

Debido a que se trata de un sistema de bicapa, el cálculo de pérdida de calor se obtiene a partir de la siguiente expresión de la Ley de Fourier:

Ecuación 6.28 $Q = K_{global} * A * (T_{int} - T_{ext})$

Donde:

Q es la pérdida de calor por segundo en las condiciones mas desfavorables ($T_{ext}=10^{\circ}C$), expresado en Watts

K_{global} es la conductividad térmica del conjunto de la capa de PRFV y la capa de lana de vidrio afectada según el tipo de superficie, expresada en W/m.K

A es la superficie del tanque, pudiendo ser la región cilíndrica, plana o elipsoide, expresada en m^2

T_{int} es la temperatura interna del biodigestor, expresada en K

T_{ext} es la temperatura media externa, expresada en K

Para definir las conductividades térmicas globales de los distintos sectores del tanque se utilizaron la **Ecuación 6.28** para la región cilíndrica y elipsoidal y la **Ecuación 6.29** para la tapa del tanque cuya superficie es plana:

Ecuación 6.29
$$k_{global} = \frac{1}{\frac{e_1}{k_1} + \frac{e_2}{k_2}}$$

Ecuación 6.30
$$k_{global} = \frac{1}{D_r * \left(\frac{1}{2k_1} * \ln \left(\frac{D_2}{D_1} \right) + \frac{1}{2k_2} * \ln \left(\frac{D_3}{D_2} \right) \right)}$$

Donde:

K_{global} es la conductividad térmica del conjunto de la capa de PRFV y la capa de lana de vidrio afectada según el tipo de superficie, expresada en W/m.K

e_1 es el espesor de la capa de PRFV, expresado en m

e_2 es el espesor de la capa de lana de vidrio, expresado en m

K_1 es la conductividad térmica de el PRFV, expresada en W/m.K

K_2 es la conductividad térmica de la lana de vidrio, expresada en W/m.K

D_1 es el diámetro interno de la capa de PRFV, expresado en m

D_2 es el diámetro externo de la capa de PRFV, expresado en m

D_3 es el diámetro externo de la capa de lana de vidrio, expresado en m

D_r es el diámetro de referencia, expresado en m

A continuación se exponen en la **Tabla 6.23** los parámetros utilizados y en la **Tabla 6.24** los resultados obtenidos de dichos balances:

Tabla 6.23: Parámetros utilizados para el cálculo de las pérdidas de calor del tanque biodigestor

| Parámetros | Unidad | Valor |
|-------------------------------|----------------|-------|
| Capa PRFV | | |
| Diámetro interior | m | 2,50 |
| Diámetro exterior | m | 2,56 |
| Conductividad térmica | W/m.K | 0,40 |
| Capa de lana de vidrio | | |
| Diámetro interior | m | 2,56 |
| Diámetro exterior | m | 2,76 |
| Conductividad térmica | W/m.K | 0,03 |
| Tanque | | |
| Temperatura interior | °C | 35 |
| Temperatura exterior | °C | 10 |
| Área Tapa | m ² | 6,8 |
| Área borde cilíndrico | m ² | 14,5 |
| Área fondo elíptico | m ² | 6,8 |

Tabla 6.24: Resultados pérdidas de calor por parte del biodigestor.

| Parámetros | Unidad | Valor |
|--|------------------|-------|
| Tapa elíptica | | |
| Conductividad global* | W/m.K | 1,5 |
| Flujo de calor | W | 255 |
| Pared cilíndrica (Borde cilíndrico) | | |
| Conductividad global | W/m.K | 0,8 |
| Flujo de calor | W | 282 |
| Fondo elíptico | | |
| Conductividad global* | W/m.K | 0,8 |
| Flujo de calor | W | 132 |
| Total | | |
| Pérdida de calor | W/m ² | 24 |
| Pérdida de calor total | W | 670 |

*Para simplicidad del cálculo se asumió el coeficiente de conductividad global del elipsoide igual al cilíndrico

A partir de la pérdida de energía calculada, debido que el objetivo es mantener la temperatura constante, es requerida una transferencia de calor mediante un intercambiador serpentina equivalente a la pérdida.

Con el calor requerido, utilizando la **Ecuación 6.15**, se calculó el volumen de biogás necesario para suministrar dicha energía. Para ello se asumió el poder calorífico del gas presentado en la **Tabla 6.3** y un 60% de rendimiento en la transferencia de energía.

Los resultados junto con la potencia térmica requerida, se encuentran expresados en la **Tabla 6.25**. Por cuestiones de facilitar la interpretación, los cálculos realizados solo se muestran para el caudal máximo proyectado ya que no mostraban diferencias relevantes con respecto al caudal actual.

Para el dimensionamiento de la serpentina requerida se utilizaron como criterios siguientes basados en los criterios establecidos por Perry, et al., (1997) mencionados durante el diseño del serpentín del tanque de pretratamiento:

- Separación entre serpentina y paredes de la cámara: > 0,15 m

Para aproximar el agua de serpentina sumergida requerida se aplica **Ecuación 6.30**:

$$\text{Ecuación 6.30} \quad Q = U_0 A_0 (T_{\text{Agua caliente}} - T_{\text{biodigestor}})$$

Donde:

Q es el calor requerido por segundo necesario para mantener constante la temperatura del biodigestor en 35°C, expresado en kJ.

U_0 es el coeficiente de transferencia de calor, expresado en kJ/h.m².C°

A_0 es el área de transferencia, expresada en m²

$T_{\text{Agua caliente}}$ es la temperatura a la que circula el agua por el interior de la serpentina, es decir 38 °C

$T_{\text{Biodigestor}}$ es la temperatura a la que se encuentra la mezcla dentro del biodigestor, es decir 35°C

Por último se utilizan las **Ecuaciones 6.18 y 6.19** para determinar las dimensiones de la serpentina. El material utilizado como serpentina son tubos de acero inoxidable de 1 pulgada ($D_o=3,340$ cm, $D_i=2,54$ cm) del tipo comercializado comúnmente para cervecerías con un coeficiente de transferencia de calor igual a 500 W/m²C° (430 kcal/h.m².C°), a su vez se toma un diámetro de espiral de 2 m para que pueda ser soportado por los tabiques del propio tanque, proporcionando mayor estructura.

A partir de lo mencionado se obtienen los siguientes resultados (**Tabla 6.25**):

Tabla 6.25: Potencia calorífica, volumen de biogás requeridos y dimensiones de serpentina requeridos para el biodigestor

| Generales | | |
|----------------------------------|-------------------|-----|
| Potencia calorífica requerida | Watts | 670 |
| Biogás requerido | m ³ /d | 4,2 |
| Serpentina | | |
| A ₀ (m ²) | m ² | 0,4 |
| L (m) | m | 4,3 |
| N | | 1 |

En base a los resultados obtenidos, se añade la porción de serpentina por fuera del líquido dando un largo de total 8 m de serpentina requeridos para su instalación.

Es importante destacar que el biodigestor no se encuentra totalmente lleno, teniendo 55 a un 85% del volumen total ocupado por la mezcla, con lo cual las pérdidas de calor serán algo menores a las estipuladas. También, para los futuros cálculos generales de consumo de biogás anual, se utilizó 20 °C como valor de temperatura ambiente promedio.

- **Accesorios**

Es indispensable evitar cualquier tipo de pérdida no controlada de biogás al ambiente. Para ello se busca mantener al mínimo el número de perforaciones realizadas sobre el tanque, sin embargo se trata de un proceso complejo, con múltiples variables a controlar y regular. A continuación se detallan todos los accesorios requeridos en el biodigestor:

- **Entrada/alimentación/recirculado**

Entre 5 a 7 veces por semana se realizará la carga del tanque de pretratamiento y la posterior alimentación del biodigestor con la mezcla. Para comunicar ambos tanques, se utiliza una cañería de PVC de 100 mm de diámetro para evitar cualquier atascamientos, conectada a una bomba estercolera de 1,5 hp (**Figura 6.9**), con potencia suficiente para elevar desde los 0,7 m de salida del la mezcla del tanque de pretratamiento hasta 3,1 m (altura máxima del líquido dentro del biodigestor). A su vez, deben colocarse sendas válvulas de cierre en las cañerías antes y después de la bomba, así como una válvula antirretorno próxima al biodigestor para evitar cualquier reflujos del contenido del biodigestor en sentido inverso.



Figura 6.9: Vista de la bomba estercolera utilizada para llevar la mezcla al biodigestor

A su vez, la bomba está conectada por otra cañería de PVC de 110 mm del sedimentador al caño de alimentación del biodigestor para realizar el recirculado aprovechando la misma vía de ingreso al biodigestor. Según se considere pertinente, puede utilizarse una segunda bomba para realizar esta conducción, o simplemente tener otra instalada en paralelo en caso de tener que realizar mantenimiento o reparaciones en las bombas.

- Salida hacia el sedimentador

El transporte hacia el sedimentador es a través de una bomba dosificadora, para ello se utilizarán caños de PVC de 110 mm. La salida en el biodigestor se encuentra por debajo del mínimo de pelo de agua, con un ángulo inicial de 20° para evitar, en mayor medida, el ingreso de burbujas de biogás generado. Nuevamente se colocan sendas válvulas de cierre para facilitar cualquier reparación pertinente en el biodigestor, sedimentador o las cañerías comunicantes.

- Conducto de descarga

En caso de requerir vaciar el biodigestor por completo para su mantenimiento o reparación, tiene una salida por la parte inferior con la correspondiente válvula de cierre de 110 mm de diámetro.

- Entrada de mantenimiento

Ubicada sobre el elipsoide de la tapa del tanque se encuentra un acceso con compuerta de 600 mm de diámetro para permitir el ingreso al tanque cuando se encuentre vacío para poder realizar las pertinentes tareas de instalación, mantenimiento o reparación. Es

importante destacar la compuerta que se propone como cerramiento impida la fuga de gases para garantizar las medidas de seguridad tal como se muestra a continuación en la **Figura 6.10**, la cual es comúnmente utilizada en la industria alimenticia y resiste presiones superiores a la atmosférica generada por vapores o gases.



Figura 6.10: Vista de la compuerta propuesta para la entrada de mantenimiento del biodigestor

- Salida biogás

A medida que ocurra la degradación del sustrato por parte de los microorganismos anaeróbicos se espera un determinado volumen de biogás que debe ser conducido por cañerías, a través del filtro de sulfuro de hidrógeno y agua, hasta el gasómetro donde será almacenado y utilizado según determine el proceso industrial. La salida del biogás se realiza a través de cañerías de PVC de $\frac{1}{2}$ pulgada debido a su resistencia a la corrosión por parte del ácido sulfhídrico. El resto de los detalles están descritos más adelante en la **Sección 6.3.7**.

- Válvula de seguridad

La válvula de seguridad se utiliza para aliviar la presión en el interior del biodigestor en caso de que estas superen por alguna falla los límites estipulados. Pueden accionarse automáticamente o manualmente frente a una señal de control. Se seleccionó un modelo construido de acero inoxidable debido a su resistencia a la corrosión del medio gaseoso (**Figura 6.11**). Los biodigestores no trabajan a grandes presiones, generalmente entre $0,010\text{-}0,020\text{ kg/cm}^2$ (equivalente a 10- 20 cm de columna de agua), con lo cuál el límite de la válvula de seguridad a partir del cual alivia la sobrepresión puede establecerse a $0,025\text{ kg/cm}^2$, es decir 25 bar.



Figura 6.11: Vista de la válvula de seguridad utilizada en el biodigestor

- Intercambiador de calor

El agua caliente a 38 °C proviene de un termostanque y una bomba centrífuga que bombea el caudal requerido de agua caliente a través del serpentín del biodigestor y del tanque de pretratamiento. Para poder definir la potencia del termostanque, bomba y consumo aproximado de biogás, se realizaron para el biodigestor, cálculos de la potencia calorífica requerida en condiciones de invierno ($T_{\text{amb promedio}}=10\text{ °C}$), verano ($T_{\text{amb promedio}}=30\text{ °C}$) y promedio de 20 °C. A su vez se determinó el caudal de agua caliente requerido para el biodigestor y para el tanque de pretratamiento utilizando la siguiente expresión:

$$\text{Ecuación 6.31} \quad Q = m_{H_2O} \cdot C_{eH_2O} \cdot \Delta T$$

Donde:

Q es el calor requerido en una hora de trabajo, expresada en Joules

m_{H_2O} es la masa de agua caliente necesaria para esa transferencia de agua, expresada en kg

C_{eH_2O} es el calor específico del agua, es decir 4184 J/kg.°C

ΔT es la diferencia de temperatura entre el agua que ingresa en el intercambiador (35 °C para el biodigestor y 25 °C para el pretratamiento) y la que sale en dirección al biodigestor (38 °C) o tanque de pretratamiento, expresada en °C.

Asumiendo una densidad del agua de 1 kg/litro, pudieron estimarse los caudales requeridos. Es importante destacar nuevamente en el caso de la mezcla, el calor requerido

probablemente sea menor al explicitado en los cálculos debido a que probablemente se realice antes de que la temperatura previa de la mezcla baje a 25 °C, por consiguiente, el biogás requerido por cada mezcla sería menor.

A continuación en la **Tabla 6.26** se observan los resultados obtenidos para el sistema de intercambiador de calor:

Tabla 6.26: Valores de potencia requerida, biogás y caudal de agua caliente para el biodigestor y el tanque de pretratamiento

| Parámetros | Unidad | Valor |
|-------------------------------|------------------------|------------|
| Biodigestor | | |
| Invierno | | |
| Temperatura ambiente | °C | 10 |
| Potencia calorífica requerida | Watts | 670 |
| Biogás requerido | m ³ /d | 4,2 |
| Caudal agua caliente | (litros/h) | 192 |
| Verano | | |
| Temperatura ambiente | °C | 30 |
| Potencia calorífica requerida | Watts | 134 |
| Biogás requerido | m ³ /d | 0,8 |
| Caudal agua caliente | (litros/h) | 38 |
| Promedio | | |
| Temperatura ambiente | °C | 20 |
| Potencia calorífica requerida | Watts | 402 |
| Biogás requerido | m³/d | 2,5 |
| Caudal agua caliente | (litros/h) | 115 |
| Pretratamiento | | |
| Temperatura inicial mezcla | °C | 25 |
| Potencia calorífica requerida | Watts | 8600 |
| Biogás requerido | m ³ /d | 2,2 |
| Caudal agua caliente* | (litros/alimentación) | 600 |

* Cada mezcla se realiza como máximo una vez por día

En base a los resultados obtenidos, se seleccionó un termotanque a gas, para ser adaptado a biogás, de 160 L con capacidad de recuperación de 800 litros/hora (**Figura 6.12**) y una bomba centrífuga de 0,5 HP.



Figura 6.12: Vista del termotanque utilizado como intercambiador de calor para el biodigestor y el tanque de pretratamiento

- Instrumental

Debido a que es fundamental conocer las condiciones de acidez, temperatura y presión en el interior del biodigestor, se propone la instalación de una sonda multiparamétrica que funcione como pHmetro y termómetro en simultáneo, así como también un manómetro.

- Toma de muestra

Para poder determinar las concentraciones de sólidos, la alimentación dada por la relación de FOS/TAC, entre otras, es necesario tener un fácil acceso al líquido dentro del biodigestor. Para ello se propone una toma de muestra del tipo canilla de acero inoxidable, cercana al fondo del tanque.

- Estructura de soporte y acceso

Para poder acceder a la parte superior del tanque, donde se encuentra el acceso de mantenimiento y el motor del sistema de mezcla, así como alcanzar la canilla de toma de

muestra y soportar el motor del sistema de agitación y el intercambiador de calor, se propone un sistema estructural alrededor del tanque que se detalla brevemente en los planos al final del capítulo (**Figura 6.27**).

- **Dimensiones, valores y planos**

En base a los cálculos realizados se expone a continuación el conjunto de los resultados obtenidos en las **Tablas 6.27 y 6.28** y los planos y dimensionamiento del tanque biodigestor (**Figura 6.13**).

Tabla 6.27: Dimensiones finales y parámetros operacionales del tanque biodigestor. Parte 1.

| Biodigestor | | |
|-----------------------------------|--|--------------|
| Dimensión | Unidad | Valor |
| Tanque del biodigestor | | |
| Tipo | Tanque PRFV | |
| Capacidad | m ³ | 13 |
| Diámetro | m | 2,5 |
| Altura Total | m | 4,1 |
| Altura Tanque | m | 3,1 |
| Altura líquido* | m | 1,7-2,4 |
| Grosor aislamiento lana de vidrio | m | 0,1 |
| Superficie total | m ² | 28,1 |
| Sistema de Mezcla | | |
| Tipo | Agitador tipo turbina de 6 palas a 45° | |
| Velocidad | rpm | 45 |
| Potencia motor | HP | 5 |
| Diámetro impulsor | m | 0,85 |
| Separación Fondo-impulsor | m | 0,85 |
| Ancho Paletas | m | 0,15 |
| Largo Paletas | m | 0,20 |
| Ancho del tabique | m | 0,20 |
| Espacio pared y tabique | m | 0,05 |

*Considerando desde la base del elipsoide.

Tabla 6.28: Dimensiones finales y parámetros operacionales del tanque biodigestor. Parte 2.

| Biodigestor | | |
|--------------------------------------|--|--------------|
| Dimensión | Unidad | Valor |
| Sistema de Calefaccionamiento | | |
| Tipo | Serpentina tipo industrial acero 1" inoxidable comercial conectada a | |
| Potencia calorifica requerida | W | 670 |
| Temperatura biodigestor | °C | 35 |
| Temperatura agua de caldera | °C | 38 |
| Largo serpentina | m | 8 |
| Diámetro serpentina | m | 2 |
| Nº de vueltas serpentina | | 1 |
| Biogás consumido promedio* | m ³ /d | 2,5 |
| Accesorios | | |
| Sonda fija multiparamétrica | | 1 |
| Manómetro | Cant | 1 |
| Bomba estercolera | HP | 1,5 |
| Válvulas antirretorno | Cant | 1 |
| Válvulas de cierre | Cant | 4 |
| Cañería PVC 100 mm | m | 20 |
| Tubería PVC 1/2 pulgada | m | 5 |
| Válvula de seguridad | Cant | 1 |
| Bomba centrifuga | HP | 0,5 |
| Termotanque 160 L | Cant | 1 |
| Toma de muestra Acero | Cant | 1 |
| Estructura Tanque | | |

*Asumiendo una temperatura promedio ambiente de 20°C

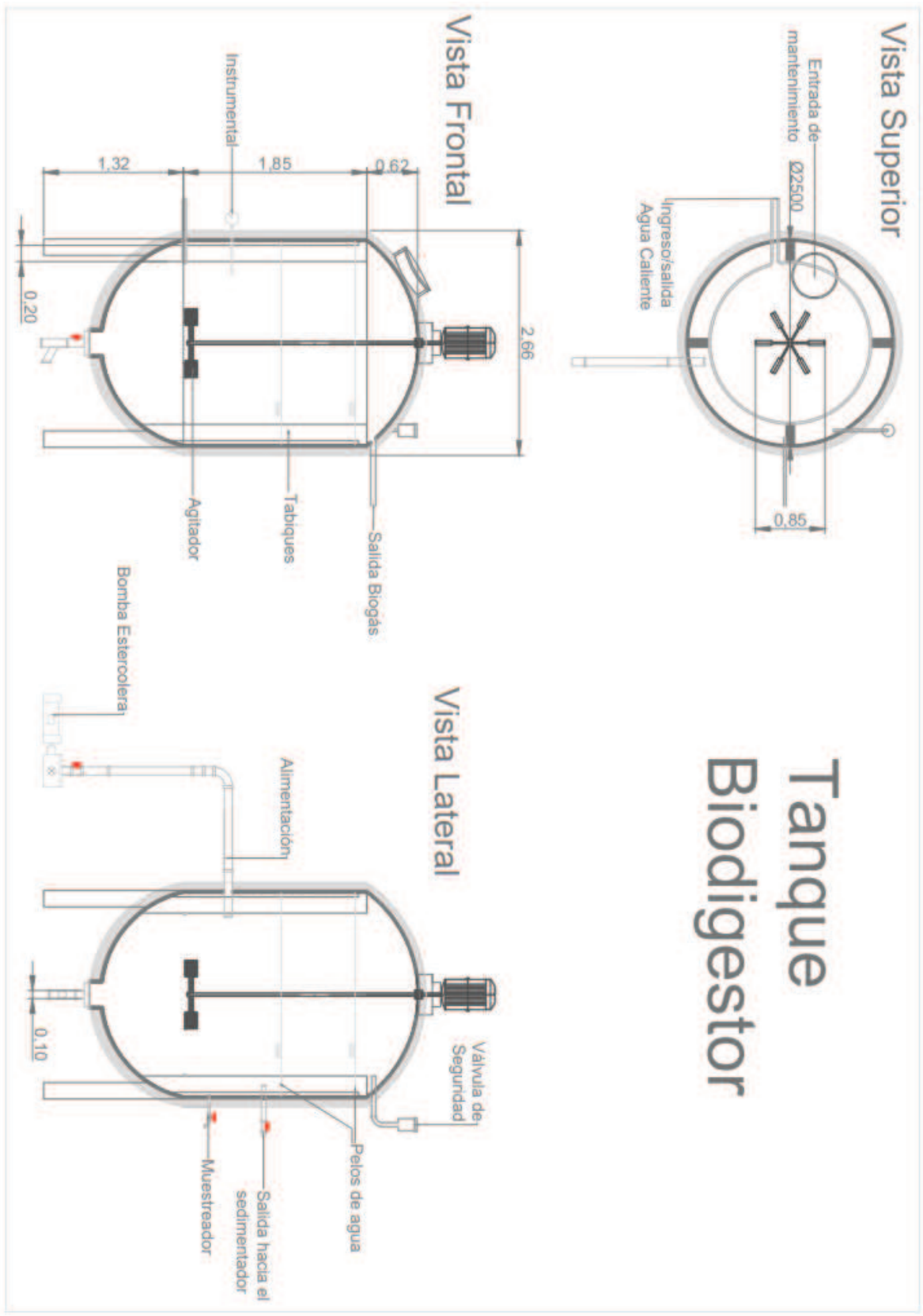


Figura 6.13: Planos del tanque biodigestor

6.2.5 Sedimentador

Los lodos que se acumulan en el sedimentador secundario tienden a formar una capa de lodos en el fondo del tanque cuyo espesor variará según las circunstancias. Dicha capa puede ocupar toda la profundidad del tanque y rebosar por los vertederos si no se realiza un dimensionamiento adecuado y si la bomba o el caudal de recirculado fuera inadecuado. Además, el líquido de mezcla, al entrar en el tanque tiene tendencia a fluir como una corriente de densidad interfiriendo así con la separación de los sólidos y el espesamiento del lodo.

Los factores a tener en cuenta en el diseño de los tanques según Metcalf & Eddy (1991) son:

- 1) Tipo de tanque a utilizar
- 2) La carga superficial
- 3) Carga de Sólidos
- 4) Velocidades de circulación
- 5) Situación y carga de salidas
- 6) Dificultades operacionales

Los tanques pueden ser circulares o rectangulares. Los circulares son comúnmente utilizados para volúmenes de caudales pequeños. Se dividen a su vez, en aquellos de alimentación periférica y de alimentación central. Debido al tamaño no poseen rascadores con lo cual la tolva debe tener un ángulo mínimo de 60° para garantizar el escurrimiento de lodos en el fondo, impidiendo su adherencia a las paredes, donde el lodo se extrae por bombeo, hacia el biodigestor, o hacia la purga.

Para determinar la carga de superficie (C_h) se recomienda realizar estudios en planta piloto a fin de evaluar las características de sedimentación del líquido mezcla. En caso de no ser posible, existen distintos rangos de carga superficial. Esta es producto de la relación entre el volumen del digestor y su área superficial. Según Metcalf & Eddy (1991), las cargas superficiales para un sedimentador secundario con un porcentaje de recirculación del 50% oscilan entre 1,16 a 2,38 m³/m².d. Otra variable influyente en el diseño de un biodigestor es el tiempo de retención hidráulico (TRH) mencionado anteriormente en el diseño del biodigestor, donde suele tener valores entre 2 a 4 hs.

Ecuación 6.32
$$C_H = \frac{Q}{A_{sup}}$$

Donde:

C_H es la carga hidráulica superficial, expresada en m³/m².d

Q es el caudal de alimentación, expresado en m³/d

A_{sup} es el área superficial del sedimentador, expresada en m²

Respecto a la carga de sólidos, cuando las concentraciones de sólidos suspendidos totales superan las concentraciones de 2 g ST/L, la superficie necesaria para el tanque puede depender de las propiedades de sedimentación del lodo. Esta puede calcularse en forma de carga másica superficial dividiendo el caudal másico de los sólidos respecto al área superficial donde el rango frecuente es entre 2,4 - 5,9 kg ST/m².h con un máximo tolerado de 9,8 kg ST/m².h.

Ecuación 6.33

$$C_m = \frac{(Q + Q_r)X_1}{A_{sup}}$$

Donde:

C_m es el caudal másico superficial de sólidos en el sedimentador, expresado en kg ST/m².h

Q es el caudal de alimentación, expresado en m³/h

Q_r es el caudal de reciclo, expresado en m³/h

X₁ es la concentración de sólidos que ingresan en el sedimentador, expresada en kg ST/m³

A_{sup} es el área superficial del sedimentador, expresada en m²

Es importante notar que ambos parámetros deben estar en equilibrio y que en caso de aumentar la concentración de sólidos suspendidos, la carga superficial debe reducirse.

Para evitar el arrastre de los lodos depositados con la salida del efluente líquido, es importante que la salida se encuentre que el deflector de entrada no se encuentre a más de 0,9 m por debajo de la superficie y que las velocidades de salida del efluente sean menores a 0,15 m/s. A partir de dicho parámetro se puede determinar el área de salida requerida a partir de la siguiente expresión:

Ecuación 6.34

$$A_s = \frac{Q}{V_s}$$

Donde:

A_s es el área de salida, expresada en m^2

Q es el caudal de alimentación, expresado en m^3/h

V_s es la velocidad de salida adoptada, expresada en m/s

Respecto a la situación y carga, cuando las cargas superficiales son bajas, la situación de los las bocas de salida no afectan significativamente el rendimiento del sedimentador, donde el único criterio válido para el presente caso es mantener la mayor profundidad posible entre el manto de lodos y la boca de salida para evitar el escape de lodo debido a las corrientes por densidad.

Dentro de las potenciales dificultades operacionales que puede tener un sedimentador secundario anaeróbico, la principal radica en la formación de costras o espumas que impidan una buena separación de sólidos al escaparse estas junto con el efluente líquido. Esto ocurre debido a que a pesar de no encontrarse calefaccionado, los lodos anaeróbicos siguen generando pequeñas porciones de biogás en el fondo del sedimentador. Estas burbujas de gas quedan atrapadas en el lodo y al formarse cantidad suficiente, la masa de lodo se aligera y sube o flota sobre la superficie. Esto sucede de forma análoga a la formación de espumas por desnitrificación en sedimentadores posteriores a tratamientos aeróbicos.

Para superar dicho fenómeno se recomienda aumentar el caudal de recirculado y purga, evitando así un exceso de acumulación de lodos en el fondo del sedimentador. También otra estrategia es colocar una agitación de muy baja intensidad en la superficie del sedimentador, permitiendo lograr un efecto desgasificador, liberando las burbujas de biogás atrapadas en los lodos ascendentes. Es importante destacar, que este tipo de sedimentadores, debido a la potencial liberación de biogás deben encontrarse cerrados herméticamente, contar con una conexión al gasómetro y tener los correspondientes manómetro y válvula de seguridad.

Debido a las dificultades de diseño características del presente proyecto, dadas por las diferencias de caudal entre el caudal actual (mínimo) y el proyectado (máximo) y los cambios abruptos de volumen generados por las alimentaciones puntuales con sus consiguientes cambios de altura dentro del biodigestor hacían dificultoso un diseño de un sedimentador eficiente donde la conducción entre el biodigestor y este fuera por gravedad. Para sortear dicha dificultad se decidió colocar una bomba dosificadora resistente a altos contenidos de sólidos para conducir la mezcla del biodigestor al sedimentador obteniendo caudales de 35 litros/h para el efluente actual y 50 litros/hora para el caudal de diseño.

El balance de caudales utilizado para el diseño a partir de la instalación de la bomba dosificadora se observa en la **Tabla 6.29**, donde se incluyen a su vez los caudales de reciclo y purga requeridos.

Tabla 6.29: Balance de caudales para el sistema (biodigestor+sedimentador) y el sedimentador

| Parámetros de diseño | Unidad | Valor (Qactual y Qdiseño) | |
|------------------------------|------------------------|---------------------------|------|
| | | Caudales | |
| Caudal entrada sistema | m ³ /d | 0,53 | 0,8 |
| | litros/h | 33 | 50 |
| Caudal entrada sedimentador* | m ³ /d | 0,8 | 1,2 |
| | litros/h | 20 | 31 |
| Caudal Salida | m ³ /d | 0,49 | 0,74 |
| Caudal Reciclo | m ³ /d | 0,26 | 0,4 |
| Caudal Purga | m ³ /semana | 0,25 | 0,37 |

*Incluye caudal de reciclo

En base a todas las consideraciones mencionadas, la metodología fue seleccionar un tanque prefabricado y corroborar que cumpla con los rangos de carga superficial, tiempo de retención y carga másica de sólidos. Para ello se adoptó un tanque de Plástico Reforzado con Fibra de Vidrio (PRFV) de 5000 litros de capacidad fabricados por la empresa Hürner Argentina S.A. ® con fondo cónico de 60° (**Tabla 6.30** y **Figura 6.13**).

Tabla 6.30: Dimensiones del tanque de PRFV utilizado como sedimentador provistas por el proveedor.

Tanque PRFV 5000 litros (Sedimentador)

| Capacidad (m ³) | | | | | |
|---------------------------------------|-----------------|--------------|-------------------|-----|----------------|
| Total | Tapa elíptica | Fondo Cónico | Cuerpo cilíndrico | | |
| 5,0 | 2,0 | 0,6 | 2,3 | | |
| Dimensiones (mm) | | | | | |
| Diámetro | hc ₁ | ht | hf | a | H ₁ |
| 1500 | 1500 | 350 | 1200 | 700 | 3750 |
| Superficie exterior (m ²) | | | | | |
| Total | Tapa elíptica | Fondo Cónico | Cuerpo cilíndrico | | |
| 8,7 | 2,4 | 3,63 | 2,65 | | |

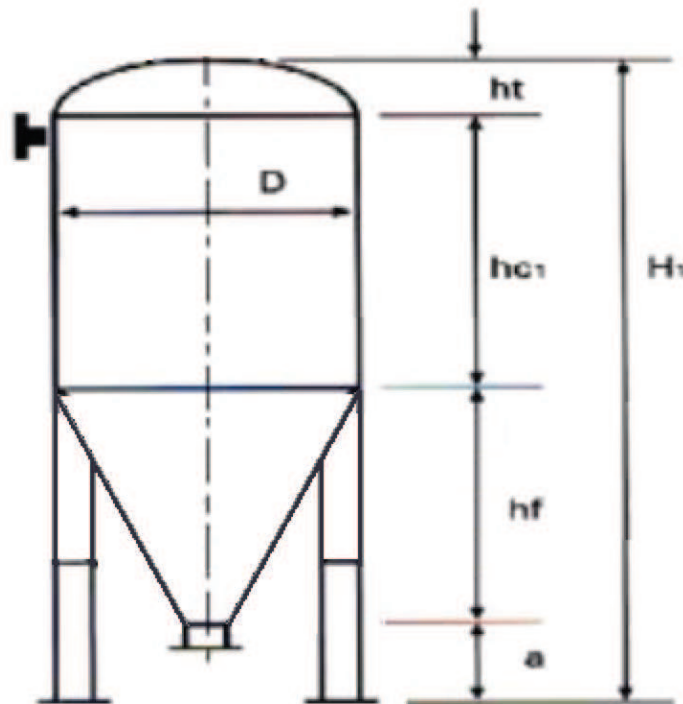


Figura 6.13: Esquema del sedimentador de PRFV adoptado. Fuente: Hurner Argentina S.A.

A partir de las ecuaciones expuestas previamente, se adoptó una velocidad de salida de 0,05 m/s y a partir de las dimensiones del tanque adoptado, se obtuvieron los valores

de carga hidráulica superficial, el caudal másico superficial de sólidos, el tiempo de retención hidráulico y el área de salida (**Tabla 6.31**). Debido a los bajos caudales del caso de estudio, los parámetros del tanque elegido tienen un margen de casi un orden de magnitud con respecto a los valores de diseño recomendados (Metcalf & Eddy, 1991). Sin embargo, dado que los rangos óptimos obtenidos de la bibliografía están pensados para plantas de tratamiento de caudales considerablemente superiores al presente, se consideró prudente dejar un amplio margen de confianza para evitar cualquier problema operativo asociado a utilizar un tanque de sedimentación muy pequeño.

Tabla 6.31: Valores de diseño obtenidos para el tanque adoptado y los rangos recomendados

| Parámetros | Unidad | Valor (Qactual y Qdiseño) | | Rango óptimo |
|--------------------------------|---------------|---------------------------|---------------|--------------|
| Sedimentador secundario | | | | |
| Carga hidráulica (C_H) | m^3/m^2d | 0,30 | 0,45 | 1,16 - 2,38 |
| Caudal másico de sólidos | kg ST/ m^2h | 0,19 | 0,28 | 2,4 - 5,9 |
| TRH | d | 8,3 | 5,5 | > 0,125 |
| Área cañería salida | m^2 | 0,0015 | 0,0015 | > 0,0002 |

- **Sistema de mezcla**

En el caso del sedimentador, el sistema de mezcla no tiene por objetivo la homogenización del sistema, sino poder romper las costras de barros acumuladas en la superficie y de este modo facilitar la desgasificación del sistema impidiendo el escape de sedimentos con el efluente líquido. Es por esto que el sistema consiste en un agitador de palas planas de amplio radio ubicado sobre la superficie cuya agitación es mínima para evitar que el flujo axial dificulte la sedimentación de los sólidos. Opcionalmente puede añadirse un controlador que permita la agitación en forma discontinua para garantizar el efecto sedimentador y obtener un ahorro de energía.

Se seleccionó este tipo de agitador ya que provoca un flujo radial grande y poco flujo axial que provocaría la resuspensión de los lodos sedimentados. Los agitadores de pala plana son agitadores de construcción sencilla que se utilizan frecuentemente para sistemas de agitación de mezcla suave. Según lo descrito por Perry, et al., (1997), este tipo de agitador suelen girar a una velocidad comprendida entre 20 y 150 rpm con una longitud de rodete entre el 50 al 80% del diámetro interior del tanque y una anchura de paleta de un sexto a un décimo del largo de la paleta.

Utilizando para el diseño las variables expuestas en el dimensionamiento del agitador del tanque de pretratamiento en la **Figura 6.3** y **Ecuación 6.9**, se encuentran a

continuación las dimensiones y parámetros del agitador de palas planas centrado con una velocidad de 6 rpm situado a la altura de la pluma del líquido dentro del sedimentador (**Tabla 6.32**).

Tabla 6.32: Dimensiones de diseño del agitador tipo palas planas obtenidas a partir de la relaciones geométricas establecidas

| | Unidad | Valor |
|---|---------------|--------------|
| Diámetro del impulsor (D_a) | m | 1,20 |
| Distancia desde el fonde a la base del impulsor (E) | m | 2,50 |
| Ancho de Paleta (W) | m | 0,12 |

A partir de las dimensiones obtenidas se determinó el número de Reynolds (Re). Una vez obtenido éste, puede interpolarse el número de potencia a partir de la **Figura 6.1a**, presente en el **Anexo** cuando el tanque no posee placas deflectoras su valor, y con éste determinar la potencia necesaria para al agitador utilizando la **Ecuación 6.10**.

Suponiendo una eficiencia del motor de agitación del 70% y pérdidas por fricción del 35%, se obtiene la potencia del motor requerida. Los resultados se muestran a continuación en la **Tabla 6.33**.

Tabla 6.33: Número de Reynolds, número de Potencia y Potencia teóricos del sistema de agitación del sedimentador

| Parámetro | Valor |
|------------------------------|--------------|
| Rpm | 10 |
| Número de Reynolds (Re) | 4 |
| Tipo de flujo | Laminar |
| Número de Potencia (N_p) | 10 |
| Potencia (W) | 121 |
| Potencia (HP) | 0,2 |
| Potencia Motor (HP)* | 0,3 |

*Valor de motor requerido supeninedo pérdidas por fricción del 35% y una eficiencia en el motor del 75%

A partir de lo dimensionado se determina que es necesario instalar un motor de 0,5 HP de potencia teniendo en cuenta la impermeabilización del sistema de mezcla para evitar la corrosión por parte del ácido sulfhídrico, utilizando modelos de acero inoxidable de mas de 2 mm de espesor y un caño eje de mas de 3mm de espesor.

- **Accesorios**

A pesar de que la principal generación de biogás ocurre en el biodigestor, una pequeña porción de la biodigestión puede continuar ocurriendo en los lodos acumulados del sedimentador. Es por ello indispensable evitar cualquier tipo de pérdida no controlada de biogás al ambiente. Se busca mantener al mínimo el número de perforaciones realizadas

sobre el tanque y que éste cuente con las condiciones de seguridad requeridas. A continuación se detallan todos los accesorios requeridos en el biodigestor:

- **Entrada sedimentador**

Para mantener los niveles de líquido en el sedimentador constantes, a pesar de tratarse todo el proceso de un sistema de alimentación discontinua y con alturas de líquido variables dentro del biodigestor, aprovechando los bajos caudales de diseño, se decidió que el transporte del biodigestor hacia el sedimentador ocurra a través de una bomba dosificadora resistente a sólidos y el controlador correspondiente para poder configurar los tiempos y caudales requeridos.

Se seleccionó la bomba dosificadora LTM de Monoflo ® de 72 bar, debido a su estructura de acero inoxidable resistente a la corrosión, tolerancia a altos contenidos de sólidos, bajo costo respecto a bombas dosificadoras a engranaje y su rango de caudales entre 5 a 1250 l/hora (**Figura 6.14**).



Figura 6.14: Vista de la bomba dosificadora utilizada para llevar la mezcla al sedimentador

Como sistema de ingreso se utiliza cañería de PVC de 110 mm de diámetro que desemboca en el tanque en un tubo T con una profundidad por debajo de la pluma de agua de 50 cm.

- **Salida del sedimentador**

El transporte hacia la disposición final del líquido tratado ocurre por gravedad a través de 3 salidas separadas cada una por 45° ubicadas en el extremo opuesto a el sistema de ingreso. Cada una de las salidas cuenta con un tubo T de ingreso para impedir la salida de costras o espuma generadas con el líquido así como correspondientes tapas de inspección

para facilitar su mantenimiento en caso de taponamiento. Los caños están compuestos por cañerías de PVC de 2 pulgadas de diámetro donde solo la mitad se encuentra al nivel de la pluma de agua.

- **Conducto de descarga**

En el extremo inferior del tanque, al finalizar la tolva, se encuentra el caño de descarga de 110 mm de diámetro de PVC conectado a la bomba estercolera descrita en **Sección 6.2.4** para poder realizar el recirculado o la purga según se requiera, o también el completo vaciado de la unidad para mantenimiento o reparaciones. Cuenta con una válvula de seguridad para poder cerrar el sistema en caso de requerir reparaciones en el sistema de conducción.

- **Entrada de mantenimiento**

Al igual que para el biodigestor, esta unidad cuenta en la parte superior un acceso con compuerta de 600 mm de diámetro (**Figura 6.10**) de sello hermético para permitir el ingreso al tanque cuando se encuentre vacío para poder realizar las pertinentes tareas de instalación, mantenimiento o reparación, sin permitir fugas de gases durante la operación.

- **Salida biogás**

La salida del biogás que potencialmente se genere en el sedimentador se realiza a través de cañerías de PVC de ½ pulgada.

- **Válvula de seguridad**

Se propone la instalación de una válvula de seguridad análoga a la dispuesta para el biodigestor.

- **Instrumental**

Por cuestiones de seguridad, es necesario conocer las condiciones de presión dentro del sedimentador, por lo que es requerida la instalación de un manómetro.

- **Toma de muestra**

Para poder ajustar el proceso es indispensable conocer las concentraciones de sólidos sedimentados que serán recirculados o purgados, así como la acumulación de sólidos dentro del tanque de sedimentación, por lo que se proponen 2 tomas de muestras de acero

inoxidable, una a 20 cm del fin de la tolva y la otra en la base inferior del cuerpo cilíndrico.

- **Aislamiento**

Debido a que los lodos sedimentados son parcialmente recirculados hacia el biodigestor, es importante que estos no estén a una temperatura muy por debajo de los 35°C requeridos por los microorganismos, ya que en caso contrario, esto provocaría un efecto negativo en el rendimiento del reactor debido a la carga puntual. Para esto se recomienda colocar un sistema de aislamiento por lana de vidrio de 5 cm de espesor en las paredes externas del sedimentador de forma análoga al biodigestor.

Debido a que los caudales de recirculación son muy bajos (10 litros/hora y 17 litros/hora para el caudal actual y de diseño respectivamente), no se recomienda la instalación de ningún intercambiador adicional ya que el volumen de recirculado posee una influencia despreciable sobre temperatura total del mezcla en el biodigestor.

- **Estructura de soporte y acceso**

Al igual que para el biodigestor, para poder acceder a la parte superior del tanque, donde se encuentra el acceso de mantenimiento y el motor del sistema de mezcla, así como alcanzar la canilla de toma de muestra y soportar el motor del sistema de agitación, se propone un sistema estructural alrededor del tanque que se detalla brevemente en los planos al final del capítulo (**Figura 6.27**).

● **Dimensiones, valores y planos**

En base a los cálculos y adopciones realizadas se expone a continuación el conjunto de los resultados obtenidos en la **Tablas 6.34**, los planos y dimensionamiento del tanque sedimentador (**Figura 6.15**).

Tabla 6.34: Dimensiones finales y parámetros operacionales del tanque sedimentador

| Sedimentador | | |
|-----------------------------------|----------------------------|--------------|
| Dimensión | Unidad | Valor |
| Tanque Sedimentador | | |
| Tipo | Tanque PRFV | |
| Capacidad | m ³ | 5 |
| Diámetro | m | 1,5 |
| Ángulo Tolva | ° | 60 |
| Altura Total | m | 3,8 |
| Altura Tanque | m | 3,1 |
| Altura líquido* | m | 2,5 |
| Grosor aislamiento lana de vidrio | m | 0,05 |
| Superficie total | m ² | 8,7 |
| Sistema de Mezcla | | |
| Tipo | Agitador tipo palas planas | |
| Velocidad | rpm | 10 |
| Potencia motor | HP | 0,5 |
| Diámetro impulsor | m | 1,20 |
| Separación Fondo-impulsor | m | 2,50 |
| Ancho Paletas | m | 0,12 |
| Accesorios | | |
| Manómetro | Cant | 1 |
| Bomba dosificadora | Cant | 1 |
| Válvulas de cierre | Cant | 2 |
| Cañería PVC 100 mm | m | 5 |
| Tubería PVC 2 pulgadas | m | 5 |
| Tubería PVC 1/2 pulgada | m | 5 |
| Válvula de seguridad | Cant | 1 |
| Toma de muestra Acero | Cant | 2 |
| Estructura Tanque | | |

*Considerando desde la base de la tolva

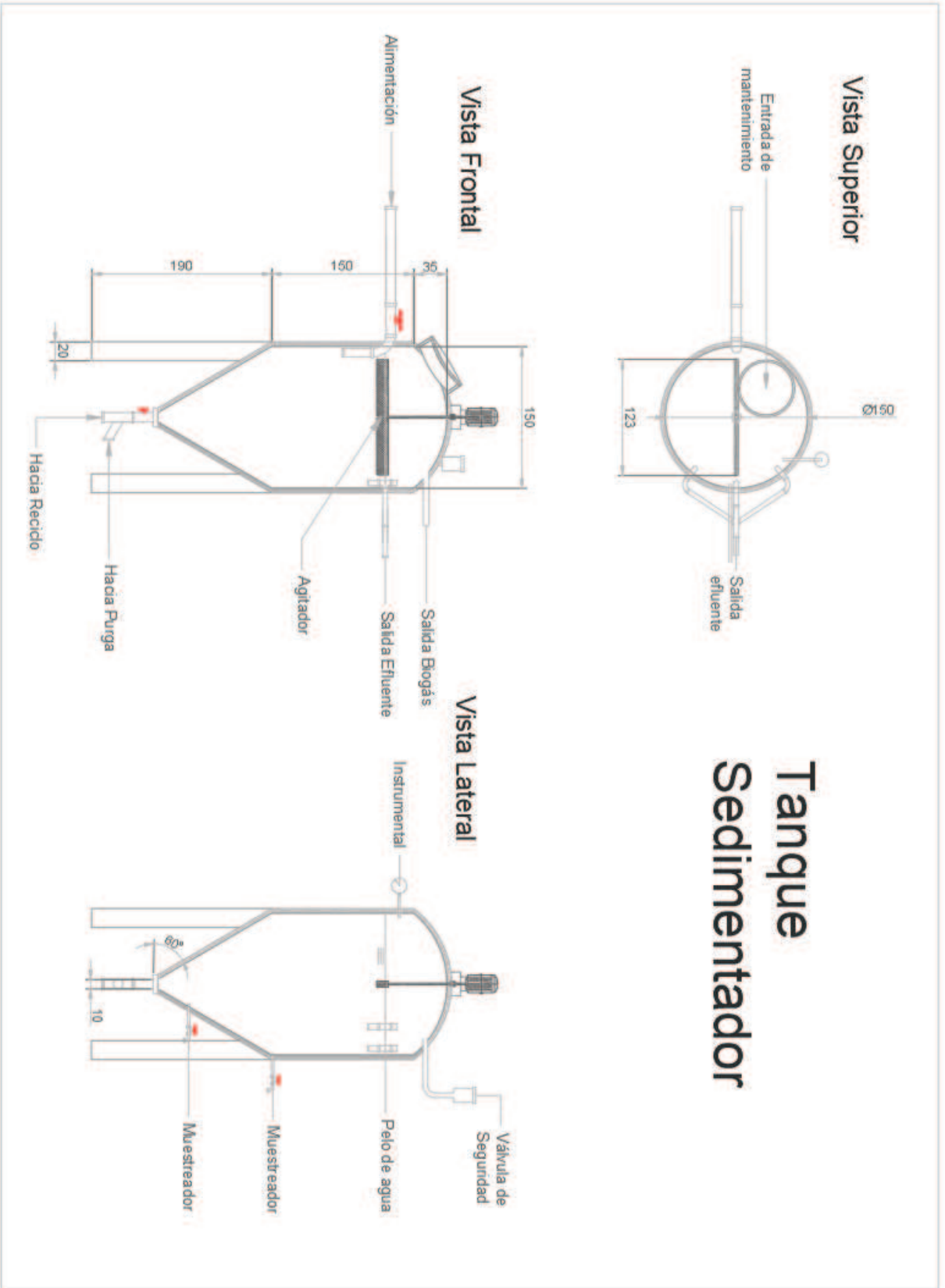


Figura 6.15: Planos del tanque de sedimentación

6.2.6 Tratamiento, almacenamiento y uso del biogás

El biogás generado por el tratamiento anaeróbico es un gas húmedo, inflamable, corrosivo y tóxico, por lo cual es importante su tratamiento para aumentar su rendimiento y condiciones de seguridad. A su vez, la conducción por las cañerías debe realizarse con materiales aptos para evitar su corrosión con las correspondientes indicaciones de seguridad en todas sus etapas. Referido a la presión de este tipo de instalaciones, generalmente trabajan a bajas presiones, solo entre 0,010-0,020 kg/cm² (equivalente a 10 - 20 cm de columna de agua).

En la **Figura 6.16** se observa el diagrama de flujo de la planta con las principales conducciones y accesorios a modo orientativo.

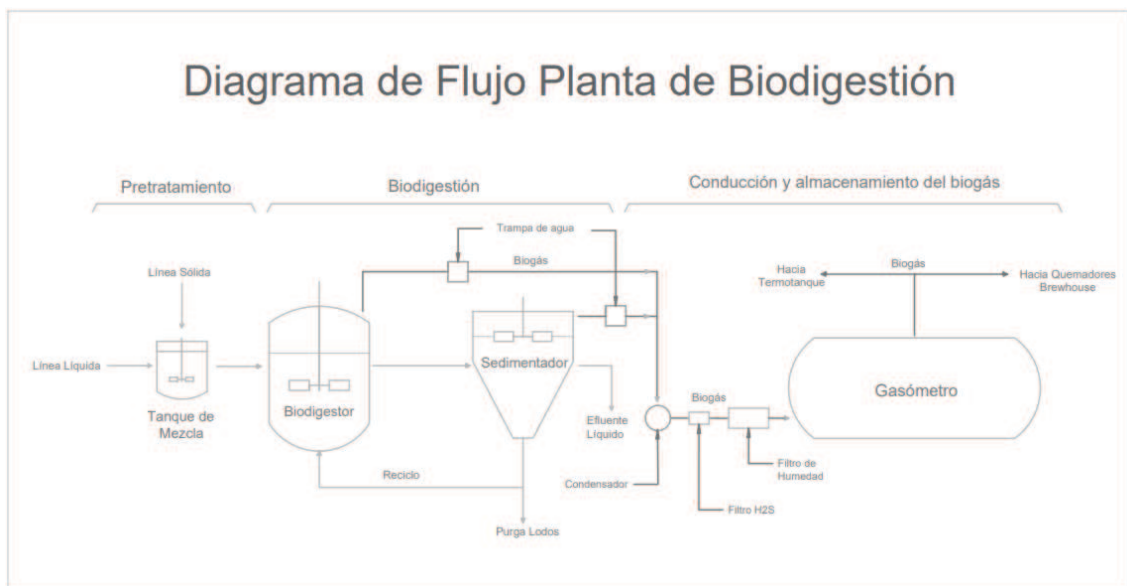


Figura 6.16: Diagrama de flujo de la planta de biogás

A continuación se exponen las estimaciones de biogás generado, el diseño del tratamiento, almacenamiento, uso del biogás y conducción..

- **Generación de biogás**

El punto de generación de biogás en la planta es el biodigestor, aunque se espera, debido a la presencia de microorganismos acumulados en los lodos sedimentados, cierto caudal de biogás producido en el sedimentador secundario.

Existen diversos cálculos para aproximar la generación de biogás al sustrato seleccionado y el método de digestión utilizado. Sin embargo, para una mayor precisión, siempre es recomendable realizar ensayos de Potencial de Biometano (BMP) para los sustratos seleccionados. Tal como se mencionó a lo largo de el **Capítulo 4**, esta técnica permite conocer en práctica el comportamiento de los microorganismos en presencia del

sustrato. Para aproximar el biogás generado por el sistema planteado se utiliza el valor de BMP obtenido para el bagazo crudo y el volumen productivo obtenido para la mezcla durante el tratamiento (Ver **Tabla 6.7**), tal como se observa en la siguiente ecuación:

$$\text{Ecuación 6.34} \quad Q_{\text{Biogás}} = V_{\text{prod}} \cdot Q_m \cdot \frac{R}{100}$$

Donde:

$Q_{\text{Biogás}}$ es el caudal de biogás generado, expresado en $\text{m}^3/\text{día}$

V_{Prod} es el volumen productivo de la mezcla, expresado en $\text{Nm}^3/\text{ton}_{\text{mezcla}}$

Q_m es el caudal másico promedio que ingresa en el biodigestor por día, expresado en $\text{ton}_{\text{mezcla}}/\text{día}$

R es el rendimiento de diseño adoptado para el BMP en escala industrial, expresado en %

En la práctica, debido a que las condiciones de un sistema se complejizan al realizar un aumento de escala, es comúnmente aceptado adoptar un rendimiento menor al obtenido a escala laboratorio, con lo cual para el caso se adopta un rendimiento del 85% respecto a los resultados de los ensayos de BMP y Volumen Productivo obtenidos en el **Capítulo 4**. A los resultados obtenidos de biogás se le aplica la diferencia dada por los requerimientos energéticos utilizados por el propio sistema de pretratamiento y biodigestor, expuestos en las **Tablas 6.16** y **6.26**. Por último, para facilitar su comprensión, a partir del poder calorífico del biogás y del gas natural se realizó una equivalencia en gas natural. A continuación se exponen los resultados obtenidos en generación de biogás (**Tabla 6.35**):

Tabla 6.35: Valores de diseño aplicados y resultados obtenidos para la estimación de biogás generado

| Parámetros | Unidad | Valor (Qactual y Qdiseño) | |
|------------------------------------|-------------------------------|---------------------------|-------------|
| Generación de biogás | | | |
| Caudal másico promedio | kg/día | 555 | 837 |
| | Ton/mes | 16 | 24 |
| Volumen Productivo | Nm ³ /ton sustrato | 23 | |
| Rendimiento BMP | % | 85 | |
| Volumen de biogás generado* | m³/día | 11,6 | 17,5 |
| | m³/mes | 339 | 512 |
| Consumo biogás calefacción | m ³ /día | 4,0 | 4,7 |
| Generación de biogás neta* | m³/día | 7,6 | 12,8 |
| | m³/año | 2800 | 4700 |
| Energía generada** | kWh/día | 49 | 82 |
| | kWh/año | 18000 | 30000 |
| Equivalente gas natural*** | m ³ /año | 1600 | 2700 |

* Para una temperatura de 20°C y 1 atm de presión

** Poder calorífico de 2,3.10⁴ kJ/m³ Valor extraído del Manual de Biogás, 2011 para una concentración de CH₄ del 60%

***Valor gas natural extraído de ENERGAS de 9525 kcal/m³*

● Tratamiento

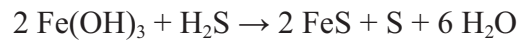
El biogás contiene impurezas y gases contaminantes compuestos principalmente por CO₂ (35 - 45%), vapor de agua (50 ppm - 3%), sulfuro de hidrógeno (50 ppm - 3%) y concentraciones trazas de nitrógeno y oxígeno (Varnero, et al., 2012).

Según el uso del biogás pretendido pueden proponerse distintos tratamientos para mejorar las condiciones del biogás. Para la generación de energía térmica se requiere la disminución de vapor de agua y sulfuro de hidrógeno.

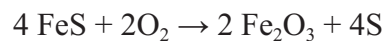
El sulfuro de hidrógeno (H₂S) tiene que reducirse o eliminarse para evitar daños y garantizar una larga vida útil en los equipos debido a que puede corroer las partes metálicas, tamponar con sarro las cañerías y así dañar generadores, calderas, equipos de conducción, etc. El H₂S en contacto con el agua producida, puede formar ácido sulfúrico (H₂SO₄) el cual es muy corrosivo. A su vez, el H₂S es peligroso para la salud de los operadores, tiene un característico olor a huevos podridos perceptible a concentraciones

de 0,002 ppm que, sin embargo, a concentraciones superiores a las 500 ppm afecta la capacidad de percepción del nervio olfativo y con ello, impide su detección a través de este sentido haciéndolo más peligroso. El H₂S a concentraciones mayores de 100 ppm es muy tóxico pudiendo ser letal. Debido a estos motivos es fundamental la disminución de H₂S por debajo de concentraciones de 0,003 ppm, valor límite expuestos por la normativa de ENERGAS (Sección 3.2).

Su eliminación puede realizarse por distintas vías, siendo la más común y sencilla, a través de filtros de óxido de hierro hidratado (viruta de hierro oxidada) (Figura 6.17), la cual en contacto con el H₂S produce la siguiente reacción, produciendo azufre elemental, sulfuro ferroso y agua:



Luego de un tiempo, una vez agotado el óxido de hierro dentro del equipo, puede regenerarse el filtro lavando la viruta con agua y exponiéndola al aire para que se oxide nuevamente, permitiendo en estas condiciones volver a cargar el filtro con el material recuperado:



Según los valores expuestos por Groppelli & Giampaoli (2016), un kilogramo de viruta de hierro oxidada basta para purificar 800 m³ de biogás. Entonces, a partir de las estimaciones de biogás expuestas en la Tabla 6.35, para intervalos de 3 meses entre cambios de filtro, un rango de seguridad del 50% y considerando una densidad de viruta de hierro semi comprimida de 1,5 kg/dm³, se requiere un filtro de 2 dm³ de capacidad por el cual circulará el biogás para eliminar el H₂S y donde deben ingresarse 3 kg de viruta de hierro hidratada en cada cambio de filtro.



Figura 6.17: Ejemplo del sistema de filtro de Sulfuro de Hidrógeno

Para ello se diseñó un filtro de reducción de sulfuro de hidrógeno fabricado a partir de cañerías de PVC de 4 pulgadas de diámetro y 0,25 m de largo, ubicado en la línea de conducción de biogás previa al gasómetro.

A continuación se observa un diagrama del filtro adoptado (Figura 6.18):

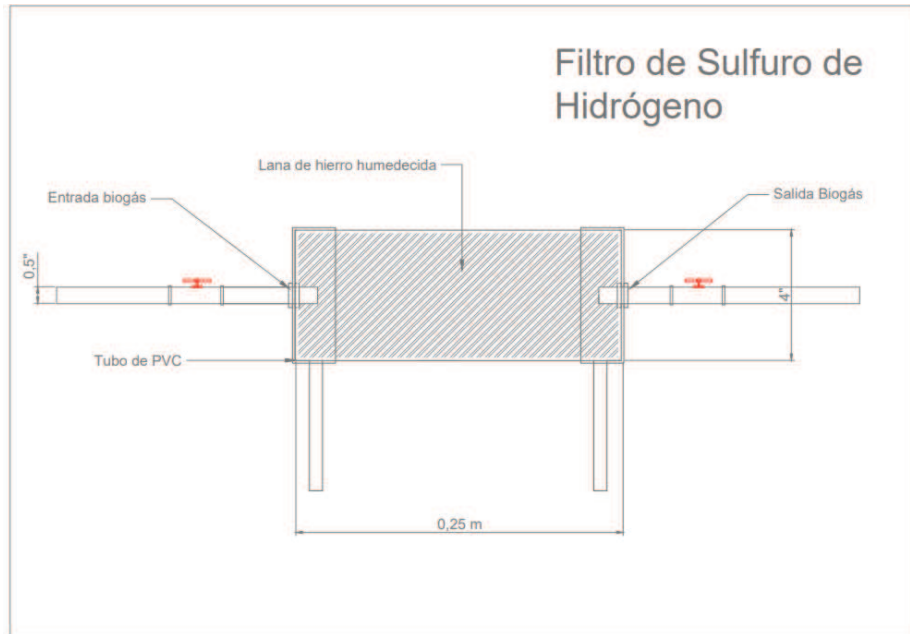


Figura 6.18: Diagrama del filtro de Sulfuro de Hidrógeno

Al momento de salir del biodigestor, generalmente, el biogás se encuentra saturado de vapor. El biogás debe tener una humedad relativa menor al 60% para evitar el condensado en las cañerías, que en combinación con el H_2S puede provocar corrosión. También, los contenidos de vapor de agua disminuyen considerablemente el poder calorífico del biogás, con lo cual éste debe ser secado antes de su almacenamiento y uso (Manual de Biogás, 2011).

El biogás puede secarse por compresión y/o enfriamiento, absorción por soluciones de glicol, carbono activado o gel de sílice, siendo esta última opción la mas económica y sencilla de aplicar para sistemas productivos pequeños.

El gel de sílice o sílica gel ($SiO_2 \cdot n H_2O$), es una sustancia química absorbente de aspecto cristalino, porosa, inerte, no tóxica, químicamente estable que puede absorber un 40% de su peso en agua. A su vez el producto puede regenerarse una vez saturado en agua, al exponerlo a temperaturas entre 120 y 180 °C durante algunas horas.

Los valores de sílica gel se obtienen a partir de los valores de biogás generados expuestos en la **Tabla 6.35**, el porcentaje de humedad adoptado, las condiciones de presión y temperatura y la relación en peso de absorción de la sílica gel.

En base al cálculo conservador de que el biogás generado contenga contenidos de humedad del 3 %, la regeneración del material filtrante de sílica ocurra cada 3 meses y su retención sea de un 40% de su peso en agua, con una densidad de $0,7 \text{ kg/dm}^3$ (en seco) y un margen de seguridad del 50%, se selecciona como filtro de humedad un cilindro de PVC de 200 mm diámetro y 0,6 m largo con una capacidad total de **13 kg** de sílica gel. A continuación se observa un diagrama del filtro adoptado (**Figura 6.19**):

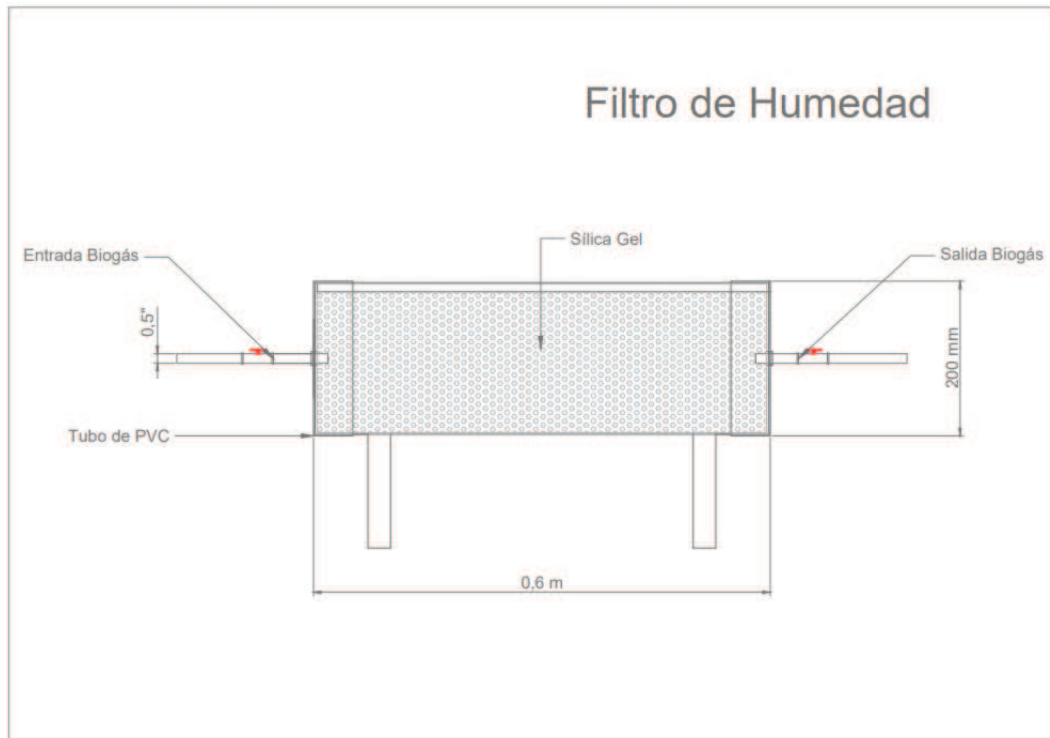


Figura 6.19: Diagrama del filtro de Humedad

Ambos filtros deben tener sendas válvulas de cierre antes y después de su conducción para poder extraerlos sin ocasionar pérdidas de biogás al ambiente cuando se requiera el cambio, mantenimiento o reparación de los filtros

- **Almacenamiento**

El biogás generado luego de eliminar el H_2S y ser secado se utiliza para satisfacer una parte de los requerimientos energéticos del proceso productivo, particularmente en la etapa de macerado y cocción. En la **Tabla 6.36** se observa el porcentaje de la demanda de biogás cubierta a partir de los datos de requerimientos energéticos expuestos en la **Sección 3.3.3** del caso de estudio.

Tabla 6.36: Consumos energéticos de la etapa de maceración y cocción y porcentaje de cobertura por biogás

| Parámetros | Unidad | Valor (Qactual y Qdiseño) | |
|---------------------------------------|----------|---------------------------|-----------|
| Consumo energía Cocción | kWh/mes | 1500 | 2187 |
| Consumo energía Macerado | kWh/mes | 643 | 937 |
| Consumo Brewhouse (Total) | kWh/mes | 2143 | 3124 |
| Energía generada por biogás | kWh/mes | 1422 | 2522 |
| Porcentaje cubierto por biogás | % | 66 | 81 |

Como se menciona anteriormente, el biogás se utiliza para satisfacer el propio requerimiento energético del sistema de biodigestión y el excedente para satisfacer parte de la demanda del proceso de Brewhouse. Con lo cual no se espera acumulación de biogás, sin embargo, debido a que la generación de biogás sufre variaciones, para asegurar la presión de suministro contante y en caso de que por motivos excepcionales se detenga por unos días el proceso productivo, es necesario la instalación de una unidad de acumulación o gasómetro. Considerando un margen de 2-3 días produciendo biogás sin ningún consumo por parte del proceso productivo, se propone la instalación de un gasómetro de doble membrana modelo BEG D310 L500, fabricado por BIOGAS® ENGINEERING SRL (**Figura 6.20** y **Tabla 6.37**):

Tabla 6.37: Dimensiones del gasómetro seleccionado

| Parámetros | Unidad | Valor |
|------------------|----------------|-------|
| Gasómetro | | |
| Capacidad | m ³ | 30 |
| Largo | m | 5 |
| Diámetro | mm | 2800 |

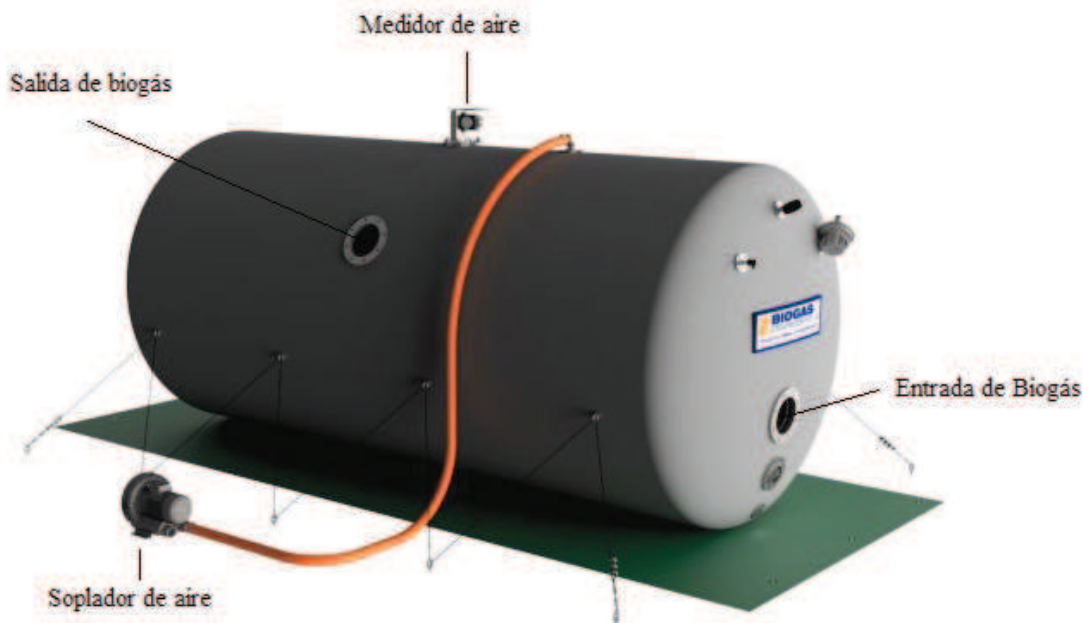


Figura 6.20: Esquema del gasómetro seleccionado. Fuente: Elaboración propia según BIOGAS® ENGINEERING SRL

El gasómetro seleccionado está conformado por una membrana cilíndrica interior denominada “tanque” que contiene el biogás a una presión entre 5-35 mbar, un cilindro exterior denominado “cuerpo principal” que contiene el tanque, manteniendo la presión entre ambas membranas. También posee las conexiones para los conductos de entrada y salida de biogás, un soplador y los sitios de sujeción para una instalación segura.

- **Accesorios**

La conducción, almacenamiento y uso del biogás requiere de diversos dispositivos indispensables para controlar las condiciones del sistema y mantener estrictos márgenes de seguridad.

A continuación se desarrollan brevemente estos dispositivos:

- **Trampas de agua**

Para impedir que el gas acumulado en el gasómetro retorne en sentido inverso hacia la línea de filtros y finalmente hacia los tanques del tratamiento anaeróbico, lo cuál podría originar una sobrepresión en los tanques, y también para que el gas acumulado en el biodigestor se encuentre aislado de la atmósfera del sedimentador secundario, se colocan trampas de agua en varios sectores del sistema de conducción.

El diseño y funcionamiento de las trampas de agua es sencillo, constan de un recipiente de 2 litros de agua conformado por un tubo vertical de PVC transparente de 200 mm de diámetro y 0,4 metros de alto, cerrado en los extremos. Se los llena parcialmente con agua hasta una altura de 0,3 m (ver **Figura 6.21**). El biogás ingresa por

la parte superior por una cañería que se sumerge en el agua a una profundidad de 10 cm. El gas burbujea y sale por la conexión ubicada en la parte superior del tubo. De este modo gracias al sello hidráulico del agua, impide el retorno del gas en las líneas. Es importante controlar periódicamente los niveles de agua en las trampas de agua, para garantizar su buen funcionamiento.

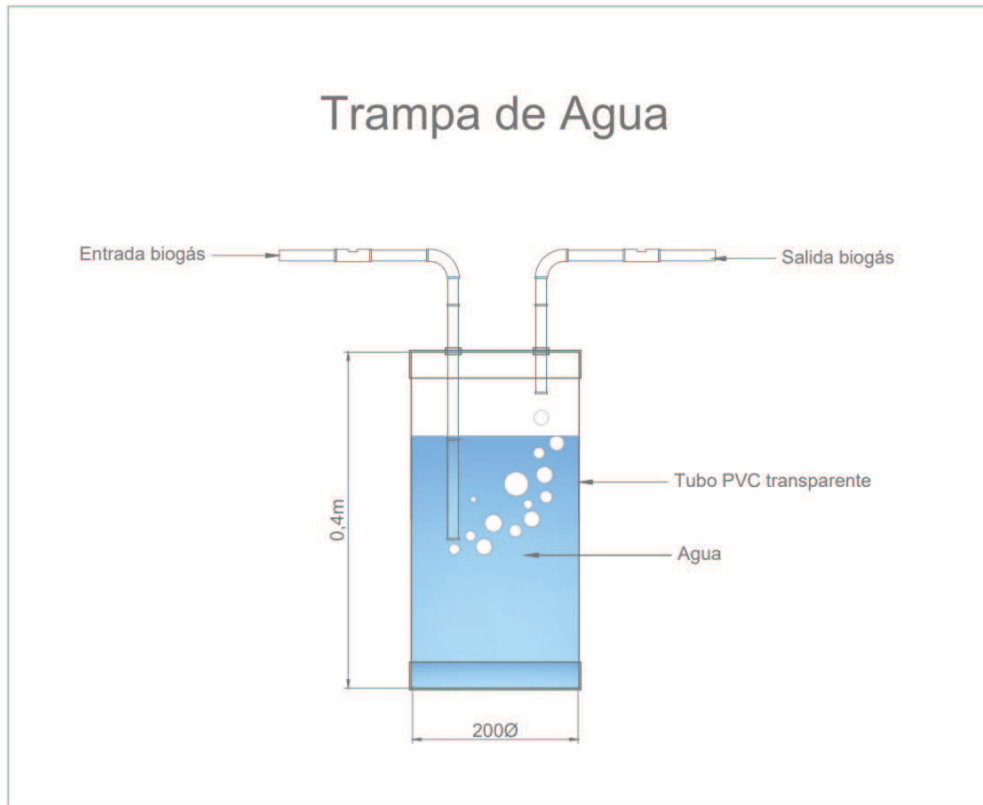


Figura 6.21: Diagrama trampa de agua

El sistema incluye 3 trampas de agua. Dos de ellas se encuentran ubicadas inmediatamente luego de sendas salidas del biogás en el biodigestor y en el sedimentador, previo a la unión de ambas conducciones. La tercera se encuentra ubicada luego del sistema de filtros y previo al gasómetro.

- **Condensador de agua**

Como se mencionó anteriormente, el gas proveniente del biodigestor es bastante húmedo y en su recorrido desde el tanque caliente hasta zonas de menor temperatura en el resto del circuito, el agua se condensa. Esta debe recogerse en los puntos más bajos del sistema, ya que, de lo contrario puede bloquear las cañerías, impidiendo la circulación e interfiriendo en la posterior utilización del biogás.

Para evitar la condensación debido a la saturación de vapor de agua en el biogás, según las especificaciones expuestas por Groppelli & Giampaoli (2016), deben colocarse las cañerías de biogás con una leve pendiente y una convergencia hacia el punto más bajo de

toda la línea. Allí se ubica un recipiente construido con un tramo de caño de PVC de 110 mm de diámetro y 0,30 m de largo con una tapa pegada en su fondo, donde se ubica una T y deriva la salida interior al condensador (Ver **Figura 6.22**). Se coloca otra tapa en la parte superior del recipiente con una perforación del diámetro de la cañería de drenaje y una pequeña perforación adicional para que el agua pueda drenar en caso de exceso de agua. El recipiente se mantiene lleno de agua, logrando un cierre hidráulico para que el biogás no escape a la atmósfera y purgue automáticamente el agua condensada que pueda tener dentro.

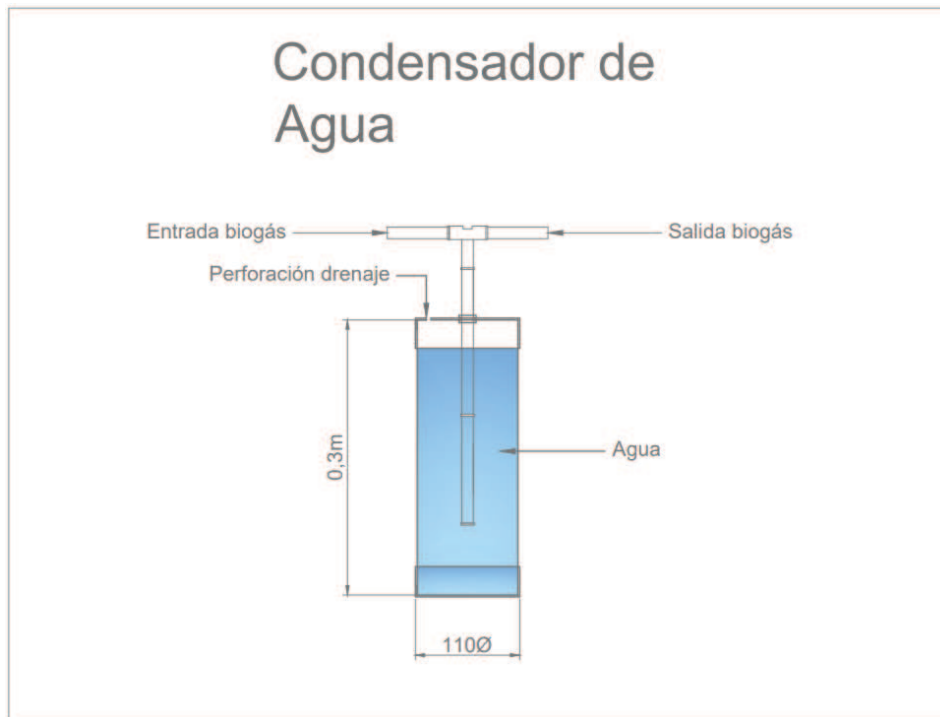


Figura 6.22: Diagrama del condensador

Este sencillo sistema debe ubicarse luego de la trampa de agua, previo a los sistemas de tratamiento y su único mantenimiento es controlar que el nivel de agua se encuentre al máximo, especialmente en verano, para garantizar el sello hidráulico.

- **Trampa de llama**

Debido a que el biogás generado durante la puesta en marcha del biodigestor puede contener cierto porcentaje de oxígeno en su composición, por lo tanto, puede existir un retroceso de la llama por la cañería desde el quemador hasta eventualmente llegar al gasómetro. Por ello, por seguridad conviene colocar antes de los quemadores una trampa de llama, que corte el retroceso de la llama por la cañería.

Se propone la instalación de una trampa de llama Serie 2040, fabricada por FRANCO INSTRUMENTACIÓN S.A. (ver **Figura 6.23**).

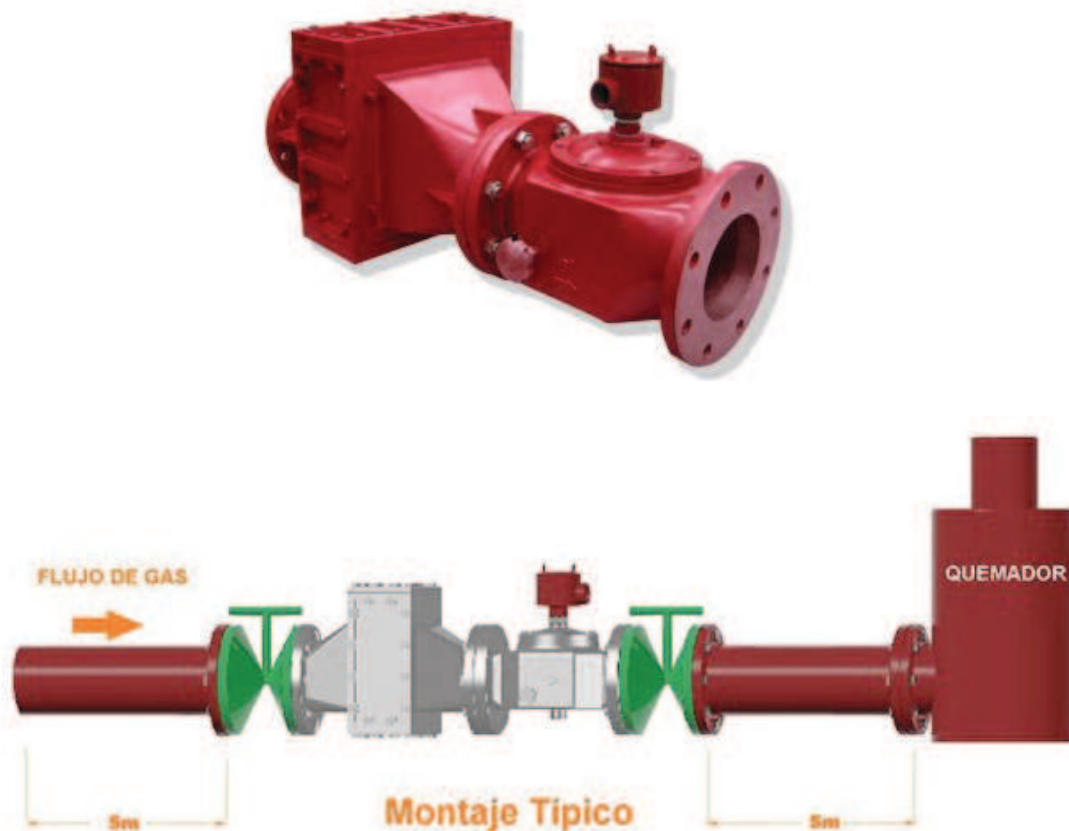


Figura 6.23: Diagrama de la trampa de llama y su montaje típico. Fuente: FRANCO INSTRUMENTACIÓN S.A.

- **Llaves de paso**

Es importante colocar llaves de paso en diversos puntos estratégicos para poder cortar la circulación de biogás, y así, permitir realizar reparaciones en la cañerías de distribución, colocar o reparar los artefactos de consumo, realizar mantenimiento o limpieza en los tanques del biodigestor y sedimentador. Esto permite conservar el biogás generado en cada una de las secciones sin necesidad de anular todo el consumo frente a alguna circunstancia que implique vaciar de biogás una de las secciones del sistema. Deben ser llaves de cierre hermético y resistentes a la corrosión. Para ello se seleccionaron llaves para gas o también denominadas válvulas de paso tipo “esférico” con asiento de teflón.

- **Manómetro**

Con el objeto de ajustar el funcionamiento de los quemadores y demás equipos conectados a la red de distribución, así como detectar posibles pérdidas de biogás, es imprescindible conocer la presión en el sistema.

Para ello debe instalarse un manómetro (**Figura 6.24**) que permite disponer de una fácil y rápida medición del nivel de presión de la línea de distribución de biogás.



Figura 6.24: Manómetro para la red de distribución de biogás

- **Flujómetro**

Para conocer los caudales de biogás utilizado es importante instalar un flujómetro tal como el que se observa en la **Figura 6.25**.



Figura 6.25: flujómetro para la red de distribución de biogás

- **Adaptación quemadores**

Debido a que el objetivo del presente trabajo es el aprovechamiento del biogás como energía térmica, su aplicación es relativamente sencilla. Los quemadores de gas convencionales pueden fácilmente operar con biogás, simplemente cambiando la relación aire-gas. Los quemadores no requieren niveles de calidad de biogás muy altos, mas allá de una presión de gas de 8 a 25 mbar y niveles de H₂S inferiores a 100 ppm para conseguir un punto de rocío de 150 °C (Manual de Biogás, 2011). Para adaptar un quemador, es importante que este conserve la potencia original utilizando gas natural, por lo tanto, dado el menor poder calorífico del biogás con respecto al gas natural, es necesario aumentar el caudal de salida de este aproximadamente en 1,7 veces, lo cual se obtiene aumentando los

diámetros de los inyectores y reduciendo la succión de aire primaria (Groppelli & Giampaoli, 2016).

Deben adaptarse los quemadores de la Brewhouse, tanto de la olla de cocción como del macerador, así como el termotanque utilizado para calentar el agua utilizada para intercambiar calor en el pretratamiento y el biodigestor.

6.3.7 Conducción

En esta sección se dimensiona el sistema de conducción de los efluentes líquidos provenientes del lavado de las unidades de la Brewhouse hacia el pozo de bombeo, la salida del efluente líquido proveniente del sedimentador secundario y la conducción del biogás desde el biodigestor y sedimentador hacia el gasómetro y de allí a los quemadores ubicados en la Brewhouse.

A modo general para todas las etapas de conducción (a excepción de la recolección de líquidos a través de canaletas) tanto para los efluentes líquidos, lodos y biogás, se utilizaron tuberías cerradas de policloruro de vinilo (PVC).

La selección de este material se debe a su resistencia a la corrosión tanto interna como externa en caso de que parte de la instalación se realice en forma subterránea, su carácter inerte respecto a los compuestos presentes en las distintas etapas de la planta de biogás. Su superficie lisa minimiza tanto las pérdidas de carga durante la conducción como la posibilidad de que ocurran obstrucciones y por los bajos costos y tiempos de colocación con respecto a otros materiales.

En general los espesores de las tuberías se clasifican en función del diámetro y espesor de pared. El espesor de pared de una tubería está indicado por el número de norma, el cual aumenta con el espesor. Cuando se hace referencia al tamaño de la tubería, este está indicado por el diámetro externo.

Debido a que casi todos las conducciones (a excepción de la purga del sedimentador, la salida de efluentes del sedimentador y la conducción del biogás) ocurren por bombeo, donde la potencia de las bombas supera ampliamente los requerimientos del sistema, los diámetros quedan definidos por el criterio de que sea suficiente como para no provocar obstrucciones.

- **Efluentes líquidos**

La generación de los efluentes durante el lavado de la unidad de Brewhouse se genera en forma discontinua y puntual. En la **Cervecería A**, al igual que en la mayoría de las industrias del sector, el transporte de éstos se realiza por un trazado de canaletas. Las mismas se disponen a lo largo de las distintas zonas de operación de la planta para la conducción de los efluentes allí generados hacia el tratamiento o alcantarillado según el

caso. La conducción de estos trazados siempre ocurre por gravedad, respetando una pendiente mínima del 0,3% para garantizar un escurrimiento adecuado.

Por ello se utilizan los trazados de canaletas existentes para conducir los efluentes líquidos requeridos para la digestión hacia el pozo de bombeo. A su vez se incluye un trazado de canaletas nuevo alrededor de toda la planta de biogás para colectar cualquier efluente líquido que pueda generarse a partir del sedimentador o en tareas de mantenimiento y limpieza.

Si bien la realización de el pozo de bombeo requiere cierto movimientos de suelos, el volumen requerido es de 1 m³ (Adoptado a partir de los requerimientos de efluente líquido de diseño obtenidos en la **Tabla 6.5**) con unas dimensiones de 120x120x70 cm.

A partir del pozo de bombeo, el efluente líquido es conducido a través de tuberías cerradas de PVC, de 110 mm de diámetro (4"). De igual diámetro son las cañerías de conducción hacia el biodigestor y purga desde tanque de tratamiento, las cañerías de conexión entre el biodigestor y el sedimentador y las cañerías de purga y recirculado del sedimentador secundario.

Las cañerías de salida del efluente líquido del sedimentador es a través de cañerías de 50 mm de diámetro (2") y desembocan en la canaleta de la planta que desemboca en la disposición final de los efluentes líquidos.

- **Biogás**

Las cañerías de conducción de biogás son de PVC de 13 mm de diámetro (1/2") color marrón, que conectan desde el biodigestor hacia sendas trampas de agua y de allí se unifican en una misma cañería que atraviesa un condensador, el filtro de H₂S y el filtro de humedad, una trampa de agua adicional, hasta finalmente alcanzar el gasómetro. La cañería que va del gasómetro a los quemadores ubicados en la Brewhouse con la trampa de llamas incluida también son de iguales características (Ver **Figura 6.11**).

6.3.8 Lodos/digerido

Las propiedades y constituyentes del digerido se determinan esencialmente por los materiales utilizados para la digestión anaeróbica, así como el proceso de digestión del mismo. Sin embargo, para poder ser utilizados como fertilizante deben cumplir con ciertos requisitos respecto a garantizar la ausencia de contaminantes, metales pesados, patógenos, entre otras. A lo que se suma la falta de normativa vigente al respecto para el uso y aplicación de biofertilizantes en Argentina.

Dados estos motivos, el tratamiento y el análisis de factibilidad del uso del digerido como fertilizante no forman parte del presente trabajo. A esto se suma que dadas las dimensiones del proyecto, y que la biodigestión anaeróbica característicamente es de baja

generación de lodos, los caudales de purga de diseño establecidos en la **Tabla 6.18** son muy bajos como para considerar viables tratamientos o disposiciones muy complejas.

Las potenciales opciones para su disposición son contratar un servicio tercerizado para su traslado y correcta disposición final, o su dilución con el resto de los efluentes líquidos de la cervecería y su disposición en conjunto (o tratamiento en caso de no cumplir con la normativa) al cuerpo receptor.

6.3 Planos generales

A continuación se exponen los planos de la planta de biogás planteada. En primero lugar en la **Figura 6.26** se detalla la ubicación de la planta de biogás en el predio del caso de estudio, en la **Figura 6.27** se encuentra la vista de perfil de la planta (sin incluir el gasómetro y conducciones de biogás) y por último se describe la ubicación de los distintos elementos de la planta en el espacio definido a modo de vista en Planta en la **Figura 6.28**.

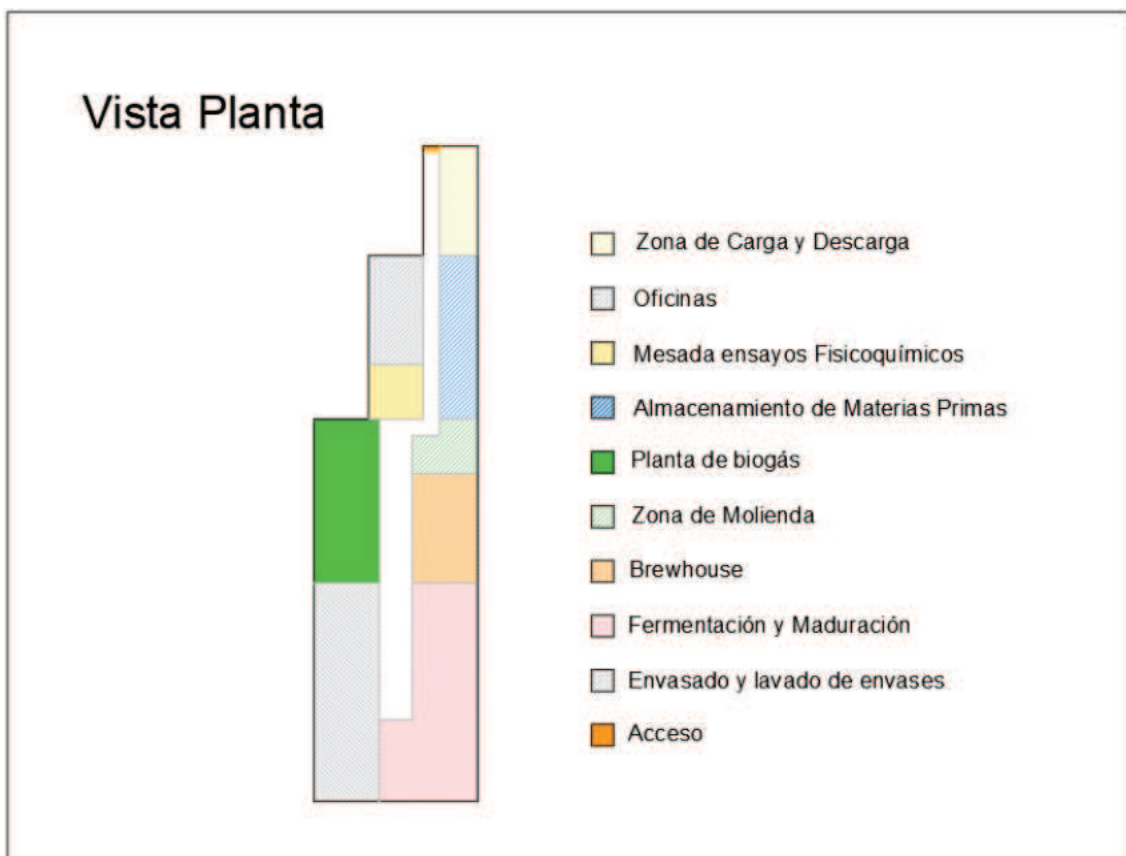


Figura 6.26: Vista planta del caso de estudio con planta de biogás

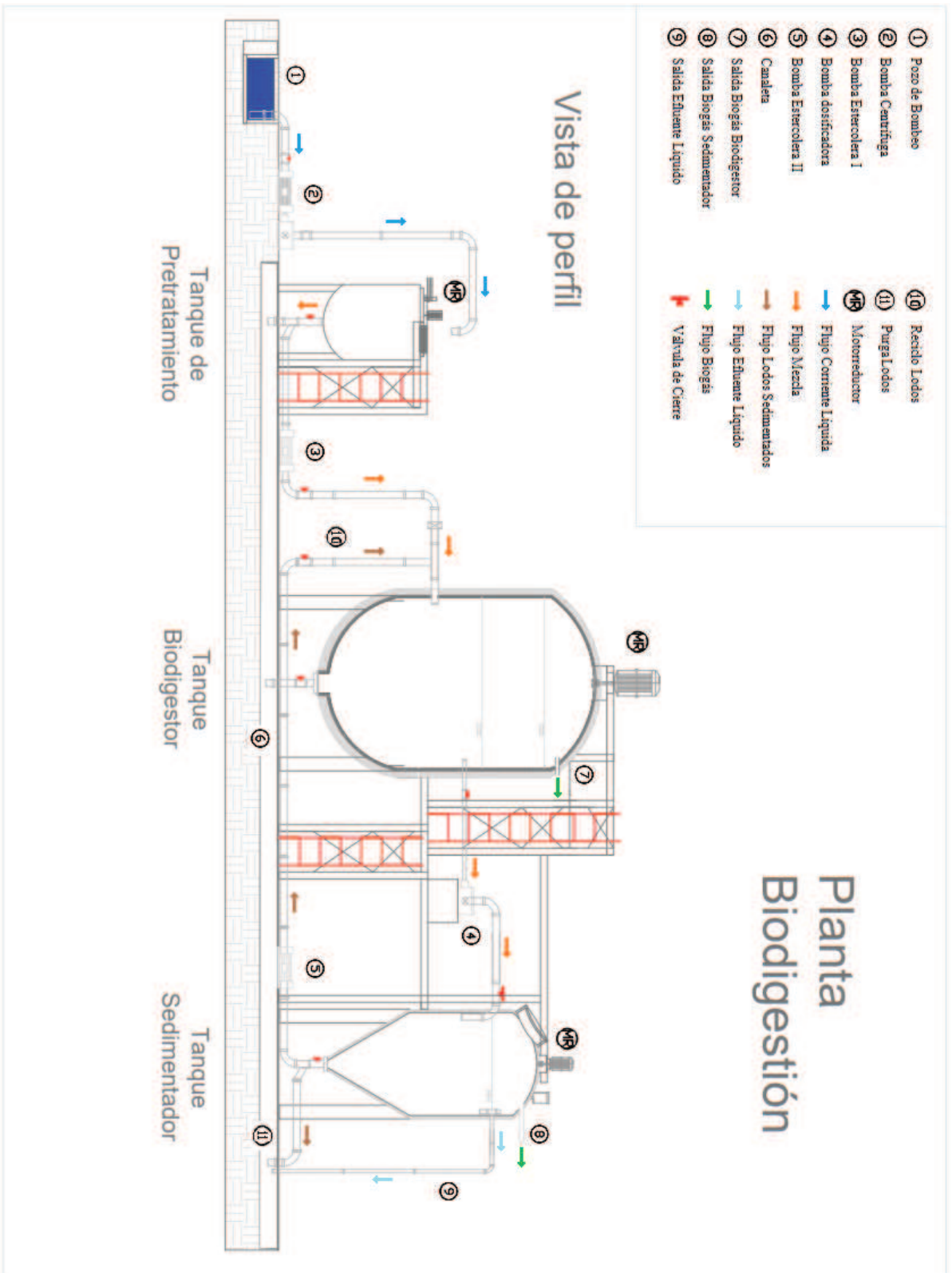


Figura 6.27: Vista de perfil de la planta de biogás del caso de estudio para el pretratamiento y tratamiento anaeróbico

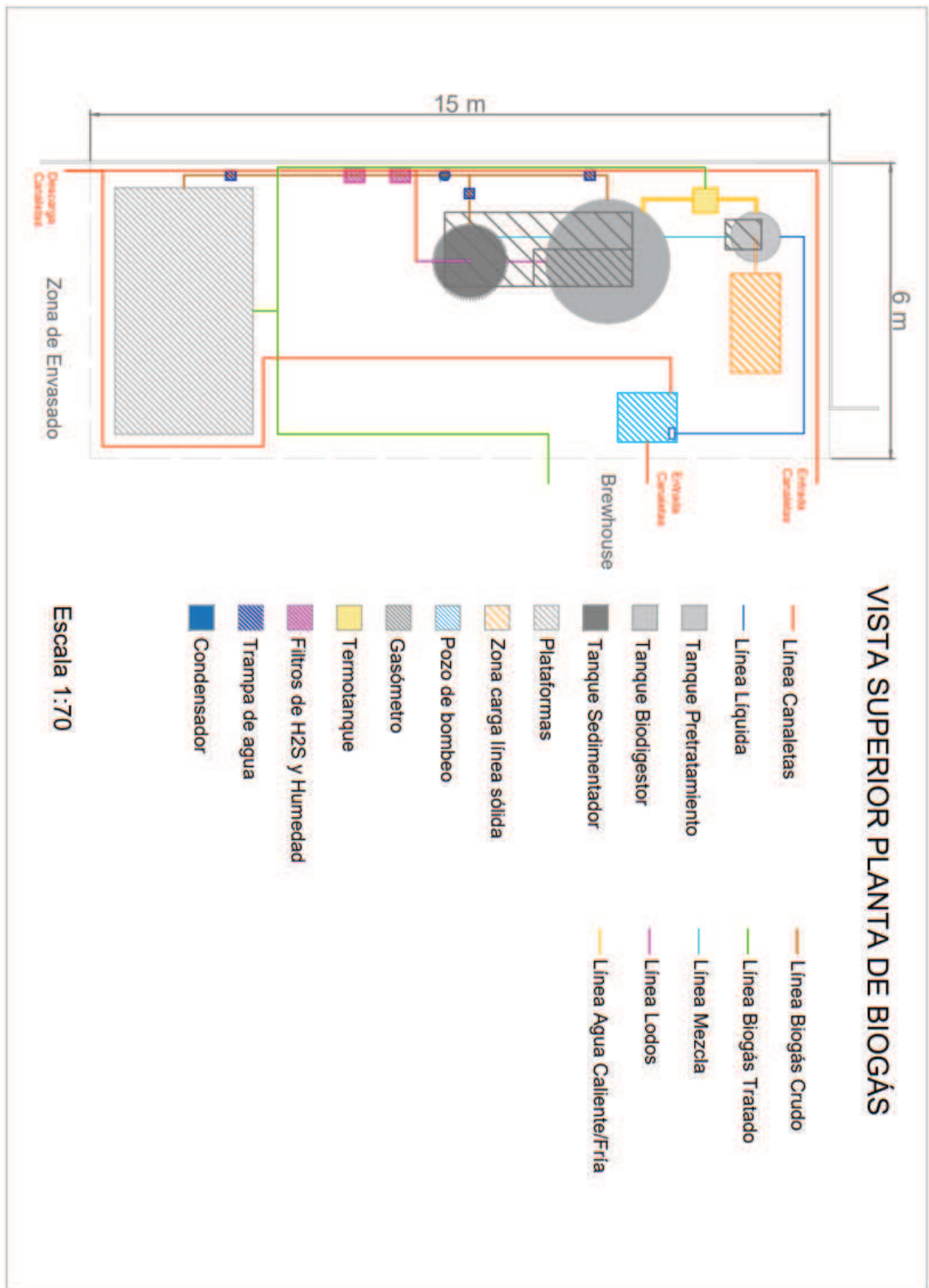


Figura 6.28: Vista superior de la planta de biogás

CAPÍTULO 7

Presupuesto y evaluación económica

En el presente capítulo se detallan los aspectos económicos del caso de estudio y se realiza el posterior análisis de prefactibilidad del proyecto. El desarrollo del capítulo incluye los Costos de Inversión Inicial (CAPEX) y los Costos Operacionales y de Mantenimiento (OPEX) para la **Cervecería A**.

7.1 Costo de Inversión Inicial (CAPEX)

Las inversiones de bienes capitales o CAPEX, por sus siglas en inglés Capital Expenditures, para el proyecto de instalación de la Planta de Biogás en la **Cervecería A** pueden ser estimados conociendo el costo primario de los tanques utilizados, equipos, infraestructura, instalación, etc. Cuanta más información se tenga de los diferentes costos, más precisa será la estimación.

Como criterio estimativo se asumió que las instalaciones electromecánicas implican un 15% del total de la obra, y luego sobre ese total se establece un margen de error del +20% aplicado al costo final. También es importante destacar que los tiempos de instalación de las unidades, sistemas de canalización, bombeo y biogás, se realizan a partir de servicios tercerizados, debiéndose verificar con un experto los plazos y costos asociados, así como cualquier extensión en los plazos de instalación debido a demoras en la entrega de equipos, materiales, etc. Se estimó un plazo de dos semanas para la instalación de la Planta de Biogás y dos semanas adicionales para el tendido de tuberías de biogás, instalación del gasómetro y las pruebas hidráulicas requeridas.

Los metros de tuberías y accesorios tanto para los efluentes líquidos como para el biogás, se determinaron a partir de los planos realizados de la planta (**Sección 6.3**), agregando un margen de seguridad del 20%. Los materiales y accesorios fueron cotizados por proveedores directos o por distribuidores de los mismos.

Los costos de elaboración del proyecto de ingeniería base y de detalle fueron estimados en base a un porcentaje del 10% del monto total de la obra antes de aplicar el margen de seguridad. Lo mismo se hizo para estimar el costo de elaboración de los planes civiles y seguimiento de obra por un Ing. Civil, adoptando un porcentaje del 5%.

En la **Tablas 7.1, 7.2 y 7.3** se resumen los costos de las diferentes partes integrales de la Planta de Biogás, incluyendo materiales, equipos, mano de obra y costo total requerido como inversión inicial. Como se puede observar en las tablas, el monto final de inversión inicial asciende a \$14.846.765 (CATORCE MILLONES OCHOCIENTOS CUARENTA Y SEIS MIL SETECIENTOS SESENTA Y CINCO PESOS) o USD 84.839.

Tabla 7.1: Costo total de Inversión Inicial (CAPEX) para la Planta de Biogás diseñada. Parte 1.

| Item | Descripción Costos de Inversión | Unidad | Cantidad | Costo Unitario | Costo Sub Total | Costo Total | % de Insidencia | Total | |
|--|--|----------------|----------|----------------|-----------------|-------------|-----------------|------------|--|
| 1 Estructuras y Movimiento de Suelos | | | | | | | | | |
| 1.1 | Base de hormigón Tanques | m ³ | 2 | \$ 10,000 | \$ 20,000 | \$ 20,000 | 0.36 | \$ 53,900 | |
| 1.2 | Pozo de Bombeo | m ³ | 1 | \$ 1,900 | \$ 1,900 | \$ 1,900 | 0.01 | | |
| 1.3 | Canaleras | m | 40 | \$ 800 | \$ 32,000 | \$ 32,000 | 0.22 | | |
| 2 Equipos (No incluye instalación) | | | | | | | | | |
| 2.1 | Tanque PPFV 1000L Fondo Elíptico Humer* | u | 1 | \$ 265,000 | \$ 265,000 | \$ 265,000 | 1.78 | | |
| 2.2 | Tanque PPFV 13000L Fondo Elíptico Humer* | u | 1 | \$ 545,000 | \$ 545,000 | \$ 545,000 | 3.67 | | |
| 2.3 | Tanque PPFV 5000L Fondo Cónico Humer* | u | 1 | \$ 380,000 | \$ 380,000 | \$ 380,000 | 2.56 | | |
| 2.4 | Serpentina acero inoxidable | m | 17 | \$ 950 | \$ 16,150 | \$ 16,150 | 0.11 | | |
| 2.5 | Chimangera | u | 1 | \$ 132,932 | \$ 132,932 | \$ 132,932 | 0.90 | | |
| 2.6 | Motorreductor paletas planas 0.5HP | u | 2 | \$ 33,500 | \$ 67,000 | \$ 67,000 | 0.45 | | |
| 2.7 | Motorreductor 5HP | u | 1 | \$ 195,000 | \$ 195,000 | \$ 195,000 | 1.31 | | |
| 2.8 | Agitador Turbina 4 palas 45° 30 mm de Acero inoxidable | u | 1 | \$ 14,650 | \$ 14,650 | \$ 14,650 | 0.10 | | |
| 2.9 | Agitador Turbina 6 palas 45° 85 mm de Acero inoxidable | u | 1 | \$ 27,112 | \$ 27,112 | \$ 27,112 | 0.18 | | |
| 2.10 | Agitador 2 palas planas 120 mm de Acero inoxidable | u | 1 | \$ 25,765 | \$ 25,765 | \$ 25,765 | 0.17 | | |
| 2.11 | Sonda multiparamétrica | u | 2 | \$ 36,278 | \$ 72,556 | \$ 72,556 | 0.49 | | |
| 2.12 | Compuerta de 600mm acero inoxidable | u | 2 | \$ 23,888 | \$ 47,775 | \$ 47,775 | 0.32 | | |
| 2.13 | Tapa de ingreso | u | 1 | \$ 3,350 | \$ 3,350 | \$ 3,350 | 0.02 | | |
| 2.14 | Bomba centrífuga 0.5 HP | u | 2 | \$ 12,852 | \$ 25,704 | \$ 25,704 | 0.17 | | |
| 2.15 | Bomba Estercolera 1.5 HP | u | 3 | \$ 46,401 | \$ 139,203 | \$ 139,203 | 0.94 | | |
| 2.16 | Bomba Dosificadora LTM de Monolito ø de 72 bar | u | 1 | \$ 58,274 | \$ 58,274 | \$ 58,274 | 0.39 | | |
| 2.17 | Termotanque 160L | u | 1 | \$ 52,500 | \$ 52,500 | \$ 52,500 | 0.35 | | |
| 2.18 | Rejillas Canaleras 200 mm | m | 40 | \$ 7,080 | \$ 283,200 | \$ 283,200 | 1.91 | | |
| 2.19 | Muestradores Industriales | u | 3 | \$ 6,782 | \$ 20,346 | \$ 20,346 | 0.14 | | |
| 2.20 | Válvula de Seguridad | u | 2 | \$ 18,460 | \$ 36,920 | \$ 36,920 | 0.25 | | |
| 2.21 | Manómetros | u | 3 | \$ 11,689 | \$ 35,066 | \$ 35,066 | 0.24 | | |
| 2.22 | Gasómetro Membrana Modelo: BEG D310 L500 | u | 1 | \$ 880,000 | \$ 880,000 | \$ 880,000 | 5.93 | | |
| 2.23 | Material de laboratorio | Estim. | sid | \$ 105,000 | \$ 105,000 | \$ 105,000 | 0.71 | | |
| 3 Herrajes y Soldaduras (Solo materiales) | | | | | | | | | |
| 3.1 | Infraestructura Soporte Tanque de Perforamiento | u | 1 | \$ 25,399 | \$ 25,399 | \$ 25,399 | 0.17 | \$ 143,555 | |
| 3.2 | Infraestructura Soporte Biodigestor y Sedimentador | u | 1 | \$ 74,553 | \$ 74,553 | \$ 74,553 | 0.50 | | |
| 3.3 | Barandas de Seguridad | u | 1 | \$ 28,141 | \$ 28,141 | \$ 28,141 | 0.19 | | |
| 3.4 | Escaleras | u | 3 | \$ 7,154 | \$ 21,461 | \$ 21,461 | 0.14 | | |

Tabla 7.2: Costo total de Inversión Inicial (CAPEX) para la Planta de Biogás diseñada. Parte 2.

| 4 | | Cañerías y Accesorios (Solo materiales) | | | | | | | | 4,17 | \$ 619,235 |
|------|--|---|-----|------------|------------|------------|--|--|--|------|--------------|
| 4.1 | Cañería PVC 60 mm (2") | m | 5 | \$ 225 | \$ 1.125 | \$ 1.125 | | | | 0,01 | |
| 4.2 | Cañería PVC 110 mm | m | 20 | \$ 413 | \$ 8.250 | \$ 8.250 | | | | 0,06 | |
| 4.3 | Cañería PVC 15 mm (1/2") marón | m | 45 | \$ 917 | \$ 41.250 | \$ 41.250 | | | | 0,28 | |
| 4.4 | Válvula de cierre 110 mm | u | 7 | \$ 29.332 | \$ 205.324 | \$ 205.324 | | | | 1,38 | |
| 4.5 | Válvula de cierre 1/2" | u | 6 | \$ 1.984 | \$ 11.904 | \$ 11.904 | | | | 0,08 | |
| 4.6 | Válvula de cierre 110 mm | u | 7 | \$ 29.332 | \$ 205.324 | \$ 205.324 | | | | 1,38 | |
| 4.7 | Válvula Antirretorno | u | 1 | \$ 7.150 | \$ 7.150 | \$ 7.150 | | | | 0,05 | |
| 4.8 | Trampas de agua | u | 3 | \$ 5.540 | \$ 16.620 | \$ 16.620 | | | | 0,11 | |
| 4.9 | Condensador | u | 1 | \$ 4.700 | \$ 4.700 | \$ 4.700 | | | | 0,03 | |
| 4.10 | Flujómetro | u | 1 | \$ 12.400 | \$ 12.400 | \$ 12.400 | | | | 0,08 | |
| 4.11 | Corra Llama Serie 2040 FRANCO INSTRUMENTACIÓN S.A. | u | 2 | \$ 5.800 | \$ 11.600 | \$ 11.600 | | | | 0,08 | |
| 4.12 | Codo 90 grados PVC 60 mm | u | 2 | \$ 230 | \$ 460 | \$ 460 | | | | 0,00 | |
| 4.13 | Codo 45 grados PVC 110 mm | u | 4 | \$ 369 | \$ 1.476 | \$ 1.476 | | | | 0,01 | |
| 4.14 | Codo 90 grados PVC 110 mm | u | 4 | \$ 389 | \$ 1.556 | \$ 1.556 | | | | 0,01 | |
| 4.15 | Codo 45 grados PVC 15 mm marón | u | 2 | \$ 208 | \$ 417 | \$ 417 | | | | 0,00 | |
| 4.16 | Codo 90 grados PVC 15 mm marón | u | 8 | \$ 175 | \$ 1.403 | \$ 1.403 | | | | 0,01 | |
| 4.17 | Te normal PVC 60 mm | u | 3 | \$ 590 | \$ 1.770 | \$ 1.770 | | | | 0,01 | |
| 4.18 | Te normal PVC 110 mm | u | 4 | \$ 420 | \$ 1.681 | \$ 1.681 | | | | 0,01 | |
| 4.19 | Te normal PVC 15 mm marón | u | 6 | \$ 349 | \$ 2.094 | \$ 2.094 | | | | 0,01 | |
| 4.20 | Montura abrazadera para cañerías 110 mm | u | 24 | \$ 1.378 | \$ 33.072 | \$ 33.072 | | | | 0,22 | |
| 4.21 | Montura abrazadera para cañerías 60 mm | u | 4 | \$ 490 | \$ 1.960 | \$ 1.960 | | | | 0,01 | |
| 4.22 | Montura abrazadera para cañerías 15 mm marón | u | 36 | \$ 1.325 | \$ 47.700 | \$ 47.700 | | | | 0,32 | |
| 5 | | Aislaciones (Solo materiales) | | | | | | | | 0,35 | \$ 52.375 |
| 5.1 | Aislante Lana de Vidio Espeso 50 mm | m2 | 75 | \$ 485 | \$ 36.375 | \$ 36.375 | | | | 0,25 | |
| 5.2 | Pintura anti corrosiva epoxi pl interior Tanques | lts | 10 | \$ 1.600 | \$ 16.000 | \$ 16.000 | | | | 0,11 | |
| 6 | | Obras Electromecánicas | | | | | | | | 1,72 | \$ 2.234.197 |
| 6.1 | Tableros PLC de control de variables de proceso | Estim. | s/d | \$ 190.000 | | \$ 190.000 | | | | 1,28 | |
| 6.2 | Cableado eléctrico | Estim. | s/d | \$ 20.000 | | \$ 20.000 | | | | 0,13 | |
| 6.3 | Llaves, teclas, tomas, diyuntores, llaves termicas, jabalinas, otros | Estim. | s/d | \$ 45.000 | | \$ 45.000 | | | | 0,30 | |

Tabla 7.3: Costo total de Inversión Inicial (CAPEX) para la Planta de Biogás diseñada. Parte 3.

| | | | | | | | | | | | |
|--|--|--------|-----|--|--------------|--|--------------|-------|-------------------------|--------------------|---------------------|
| 7 Mano de Obra Tercerizada | | | | | | | | | | 6,73 | \$ 999,000 |
| 7.1 | Instalación Tanques | Estim. | s/d | | \$ 290,000 | | \$ 290,000 | 1,95 | | | |
| 7.2 | Cañerías y bombas Hidráulica | Estim. | s/d | | \$ 230,000 | | \$ 230,000 | 1,55 | | | |
| 7.3 | Electricidad | Estim. | s/d | | \$ 19,000 | | \$ 19,000 | 0,13 | | | |
| 7.4 | Adaptación quemadores | Estim. | s/d | | \$ 45,000 | | \$ 45,000 | 0,30 | | | |
| 7.5 | Instalación Gasómetro | Estim. | s/d | | \$ 120,000 | | \$ 120,000 | 0,81 | | | |
| 7.6 | Instalación Termotanque | Estim. | s/d | | \$ 20,000 | | \$ 20,000 | 0,13 | | | |
| 7.7 | Instalación Conducción Biogás | Estim. | s/d | | \$ 135,000 | | \$ 135,000 | 0,91 | | | |
| 7.8 | Pruebas Hidráulicas | Estim. | s/d | | \$ 140,000 | | \$ 140,000 | 0,94 | | | |
| 8 Trabajos Finales Supervisión y Capacitación | | | | | | | | | | 26,74 | \$ 3.970,000 |
| 8.1 | Realización del proyecto de ingeniería básica | u | 1 | | \$ 900,000 | | \$ 900,000 | 6,06 | | | |
| 8.2 | Realización del proyecto de ingeniería de detalle | u | 1 | | \$ 1.800,000 | | \$ 1.800,000 | 12,12 | | | |
| 8.3 | Supervisión y Capacitación | u | 1 | | \$ 320,000 | | \$ 320,000 | 2,16 | | | |
| 8.4 | Confección de planos obra y seguimiento de obra por Inq. Civil | u | 1 | | \$ 950,000 | | \$ 950,000 | 6,40 | | | |
| 9 Puesta en Marcha y Capacitación | | | | | | | | | | 2,29 | \$ 340,000 |
| 9.1 | Puesta en marcha de la planta | u | 1 | | \$ 250,000 | | \$ 250,000 | 1,68 | | | |
| 9.2 | Capacitación al personal | u | 1 | | \$ 90,000 | | \$ 90,000 | 0,61 | | | |
| 10 Margen para Imprevistos | | | | | | | | | | 20,20642104 | \$ 3.000,000 |
| 10.1 | 20% Margen de seguridad para usarse en caso de imprevistos | n/c | n/c | | n/c | | \$ 3.000,000 | | | | |
| Total AR\$ | | | | | | | | | \$ 14.846.765,76 | | |
| Total US\$D** | | | | | | | | | \$ 84,839 | | |

* Incluye instalación de aislamiento y perforaciones. ** Precio (08/2021) 1U\$D = 175 AR\$

7.2 Costos operacionales y de mantenimiento (OPEX)

Los costos operacionales y de mantenimiento u OPEX, por sus siglas en inglés Operating Expenditures, del caso de estudio pueden ser estimados a partir de los costos unitarios de insumos y materias primas, sueldos del personal contratado y subcontratado, mantenciones, seguros y gastos generales de la Planta de Biogás diseñada.

Entre los principales costos fijos por parte de las unidades de operación de consumo eléctrico (bombas, sistemas de agitación y sistema de carga). En la **Tabla 7.4** se detallan los consumos eléctricos estimados a partir de las unidades más relevantes del proceso.

Tabla 7.4: Consumos eléctricos de operación.

| Unidad | kW/Unidad | hs/día | kWh/año | Descripción |
|--------------------------|-----------|--------|---------------|---|
| Chimangera 1 HP | 1,1 | 0,25 | 96 | Carga línea sólida hacia tanque de pretratamiento |
| Bomba Centrífuga 0,5 HP | 0,6 | 0,25 | 48 | Carga línea líquida hacia el tanque de pretratamiento |
| Bomba Estercolera 1,5 HP | 1,7 | 0,25 | 144 | Carga del Biodigestor desde el tanque de pretratamiento |
| Agitador 0,5 HP | 0,6 | 1 | 193 | Mezcla Pretratamiento |
| Bomba Dosificadora 1 HP | 1,1 | 2 | 771 | Carga del Sedimentador desde el Biodigestor |
| Bomba Estercolera 1,5 HP | 1,7 | 1 | 595 | Recirculado |
| Agitador 5 HP* | 16,5 | 24 | 138697 | Mezcla Biodigestor |
| Agitador 0,5 HP* | 0,3 | 24 | 2774 | Desgasificación Sedimentador |
| Bomba Centrífuga 0,5 HP* | 0,3 | 24 | 2522 | Circulación agua Termotanque-Intercambiador de Calor |
| Consumo Total | | | 145840 | |

*Dados los caudales y dimensionamientos se asume que el equipo trabaja en continuo al 60% de su potencia máxima

Respecto al resto de los insumos, estos abarcan el recambio del material de los filtros de sulfuro de hidrógeno y humedad, insumos y material requeridos para los análisis de laboratorio necesarios para el control y monitoreo del sistema. Por otro lado, aproximadamente el 70% de los costos de operación anuales se deben a la contratación del personal calificado. En la **Tabla 7.5** se detallan todos los gastos de operación y mantenimiento anuales del sistema.

Como se puede observar en la **Tabla 7.5**, el monto total de costos de operación anual asciende a \$4.235.157 (CUATRO MILLONES DOSCIENTOS TREINTA Y CINCO MIL CIENTO CINCUENTA Y SIETE PESOS) o USD 24.201.

Tabla 7.5: Tabla de costos de operación y mantenimiento (OPEX) de la Planta de Biogás.

| Item | Descripción Costos de Operación y Mantenimiento | Unidad | Cantidad | Costo Unitario | Costo Total | % de Incidencia | Total | |
|----------------------------|---|--------|----------|----------------|--------------|-----------------|--------------|--|
| Insumos | | | | | | | | |
| 1.1 | Consumo de Energía Eléctrica | kWh | 147000 | \$ 3.194 | \$ 469.518 | 11,09 | \$ 4.117.795 | |
| 1.2 | Solución HCl 30% | lts | 2 | \$ 6.250 | \$ 12.500 | 0,30 | | |
| 1.3 | Viruta de Hierro Comercial | kg | 12 | \$ 1.200 | \$ 14.400 | 0,34 | | |
| 1.1 | Silica Gel | kg | 25 | \$ 960 | \$ 24.000 | 0,57 | | |
| 1.2 | Kit medición DOO x 24 Test | u | 16 | \$ 34.054 | \$ 544.864 | 12,87 | | |
| 1.3 | Kit Buffers Calibración pHímetros | u | 1 | \$ 2.500 | \$ 2.500 | 0,06 | | |
| 1.1 | Insumos Varios Laboratorio | Estim. | n/c | \$ 50.000 | \$ 50.000 | 1,18 | | |
| Personal Contratado | | | | | | | | |
| 2.1 | 1 Supervisor Ing. Ambiental | mes | 12 | \$ 136.000 | \$ 1.632.000 | 38,53 | | |
| 2.2 | 1 Técnico Químico Encargado de laboratorio | mes | 12 | \$ 89.000 | \$ 1.068.000 | 25,22 | | |
| 2.3 | Servicio de mantenimiento Técnico Electromecánico tercerizado | mes | 12 | \$ 30.000 | \$ 360.000 | 8,50 | | |
| 2.4 | Seguro ART (5,7% de masa salarial) | 0,057 | n/c | \$ 12.825 | \$ 12.825 | 0,30 | | |
| 2.5 | Jubilación (16% de masa salarial) | 0,16 | n/c | \$ 36.000 | \$ 36.000 | 0,85 | | |
| 2.6 | PANII (2% masa salarial) | 0,02 | n/c | \$ 4.500 | \$ 4.500 | 0,11 | | |
| 2.7 | Fondo Nacional de empleo (1,5% masa salarial) | 0,015 | n/c | \$ 3.375 | \$ 3.375 | 0,08 | | |
| 2.8 | Seguro de vida Obligatorio (0,03% masa salarial) | 0,003 | n/c | \$ 675 | \$ 675 | 0,02 | | |
| Total ARS | | | | | | | \$ 4.117.795 | |
| Total USD* | | | | | | | \$ 24.201 | |

*Precio (08/2021) 1 USD = 175 ARS

7.3 Evaluación económica del proyecto

7.3.1 Análisis de Viabilidad Económica

Para realizar la evaluación económica del proyecto y determinar su viabilidad, se determinaron los ahorros monetarios debidos a la generación autónoma de energía térmica con el biogás producido y ahorros en los costos de disposición del bagazo y otros sólidos.

Tal como se mencionó en el **Capítulo 6 (Tabla 6.35)**, en la **Cervecería A** se generarían entre 2800 y 4700 m³ de biogás por año (para el caudal actual y caudal de diseño respectivamente), lo que equivale a 1600 y 2700 m³ de ahorro en gas natural por año, dada la diferencia en poder calorífico. Según las tarifas publicadas por la Empresa Distribuidora y Comercializadora Norte S.A. (Edenor S.A.) para agosto del 2021, el costo de gas natural para una empresa de las dimensiones del caso de estudio, ronda los \$61,776 por m³.

Adicionalmente, se consideraron los ahorros indirectos de no requerir la disposición diaria del bagazo por parte de la empresa transportista privada. Estos alcanzaban un total de \$32.000 mensuales en febrero del 2021. En los costos se consideró que la purga de lodos provenientes del sedimentador deben ser retirados de igual modo 4 veces por mes, dando un costo fijo de \$6400 mensuales para ambos caudales.

En la **Tabla 7.6** que se muestra a continuación, se resumen los ahorros monetarios anuales y el ahorro total que asciende aproximadamente a \$406.000 (CUATROCIENTOS SEIS MIL PESOS) o USD 2.320 para un volumen productivo de 20.000 litros de cerveza mensuales (caudal actual) y a \$650.000 (SEISCIENTOS CINCUENTA MIL PESOS) o USD 3700 para un volumen productivo de 30.000 litros de cerveza mensuales (caudal de diseño).

Tabla 7.6: Ahorros monetarios anuales debidos a la autogeneración de energía utilizando los residuos sólidos orgánicos

| Tipo de Ahorro | Caudal Actual | Caudal de Diseño |
|---------------------------------|---------------|------------------|
| Energía Térmica/Gas Natural | \$ 98.842 | \$ 166.795 |
| Disposición de Residuos sólidos | \$ 307.200 | \$ 483.000 |
| Total ARS | \$ 406.042 | \$ 649.795 |
| Total USD* | \$ 2.320 | \$ 3.713 |

*Precio (08/2021) 1 USD = 175 ARS

Al contrastar los resultados de ahorro obtenidos respecto a los costos de operación y mantenimiento, se observa que los ahorros monetarios debido a la autoabastecimiento parcial de energía térmica llegan a cubrir solamente el 9,56 % (2,33% por generación de biogás y 7,25% por ahorro en la disposición de residuos) para el caudal actual y el 15,34% (3,94% por generación de biogás y 11,40% por ahorro en la disposición de

residuos) para el caudal de diseño. Por lo que se tendría un gasto anual neto final de aproximadamente 3.829.000 y de 3.585.000 para el caudal actual y de diseño respectivamente (21.900 y 20.500 USD). Esto indica que **el proyecto no es viable en términos económicos para el caso analizado**.

Esto se debe principalmente a los costos operativos dados por la necesidad de contar con mano de obra calificada para llevar adelante el proyecto, el consumo de energía eléctrica por el agitador del biodigestor y el bajo precio en la energía térmica (ahorro generado) con respecto a la eléctrica (costos energéticos extra). También, los bajos caudales productivos del caso de estudio, y por lo tanto de los residuos, no permiten amortizar los costos fijos de operación, ni el resto de los costos de inversión que requiere un proyecto de este tipo. Cuando los caudales productivos aumentan, el porcentaje de ahorro respecto a los gastos de operación crecen. Esta tendencia puede observarse en los porcentajes de cobertura mencionados en el párrafo anterior. Si esta tendencia se mantiene relativamente constante al aumentar los caudales productivos existen, teóricamente, escalas de producción a partir de las cuales, una Planta de Biogás similar a la planteada sería viable económicamente.

7.3.2 Viabilidad Económica según el tamaño de la Industria

Para facilitar el estudio de casos y la aplicación de tecnologías de biodigestión para el tratamiento de residuos biodegradables provenientes de industrias agroalimentarias en pos de la producción de energía, es de gran interés estimar los caudales mínimos a partir de los cuales es viable la instalación de una Planta de Biogás de características similares a la diseñada en el presente proyecto.

Para identificar esto, se relacionaron los caudales productivos del caso de estudio con los ahorros monetarios relacionados con la autogeneración de energía debido a la producción de biogás y el ahorro en costos de disposición del bagazo.

A partir de este indicador, suponiendo constante el rendimiento de la Planta de Biogás frente a los aumentos de caudal (se debe tener en cuenta que la capacidad y dimensiones del equipo puede variar los rendimientos), se tomó la variación del ahorro monetario entre el caudal actual (20.000 litros cerveza/mes) y el caudal de diseño (30.000 litros cerveza/mes). Asumiendo la simplificación de que los costos operativos no varían significativamente al aumentar el caudal productivo, y que la tendencia creciente de ahorro se mantiene constante al aumentar el caudal, se puede aproximar los rangos productivos a partir de los cuales un proyecto similar sería viable.

En el gráfico de la **Figura 7.1** a continuación, se muestran los resultados del ahorro monetario obtenidos para la **Cervecería A** y la extrapolación de los ahorros y costos anuales de operación y mantenimiento respecto a los caudales productivos. En ella se identifican los caudales a partir de los cuales, a modo simplificado, un proyecto de este tipo sería viable en su operación, y en su operación e inversión (asumiendo que los costos de inversión deben amortizarse en un plazo menor a 5 años).

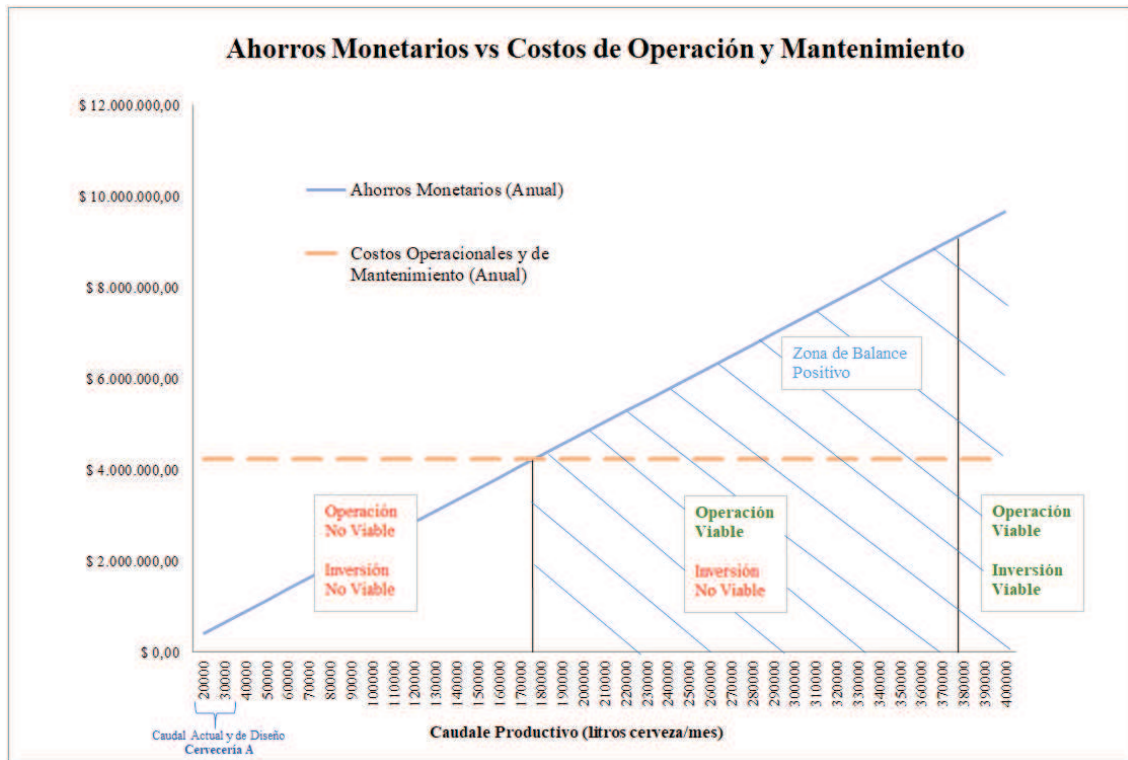


Figura 7.1: Gráfico de ahorro monetario por la generación de energía y tratamiento de los residuos sólidos de la Planta de Biogás a distintos caudales productivos versus el costo de operación y mantenimiento de la planta.

Como se observa en dicho gráfico, a partir de volúmenes productivos de 175.000 litros de cerveza/mes (caudal productivo 9 veces superior al actual del caso de estudio), el ahorro monetario anual supera los costos de operación y mantenimiento haciendo viable su funcionamiento pero no su inversión, alternativa que puede considerarse para casos donde se cuente con la posibilidad de un subsidio para la inversión del proyecto, evento cada vez más frecuente frente a las nuevas políticas ambientales nacionales. Luego, para industrias con caudal productivo superior a los 380.000 litros de cerveza/mes (caudal 19 veces superior al actual del caso de estudio), el ahorro monetario anual permitiría amortizar la inversión del proyecto en un plazo menor a 5 años.

Estos valores solo cumplen una función orientativa, ya que al aumentar la escala, el número, cantidad, potencia y consumo de los equipos también aumenta, así como la complejidad del proceso y con ello la cantidad de mano de obra calificada e insumos requeridos. Esto implica un aumento en los costos operativos y de inversión, el cuál no se contempla en el análisis efectuado. Otros factores a tener en consideración, son los costos impositivos del gas natural y la relación de costos entre el uso de gas natural y energía eléctrica, así como futuras implementaciones de subsidios hacia la producción de energías alternativas en la Argentina.

Debido a todas las razones mencionadas, la viabilidad económica de un proyecto de estas características queda sujeta a numerosas variables que requieren un análisis cuidadoso para cada caso.

CAPÍTULO 8

Manual de seguridad, uso y mantenimiento de la Planta de Biogás

A continuación se detallarán las normas y recomendaciones de uso y seguridad para la instalación, operación y mantenimiento de la Planta de Biogás. Éstas se basan en las recomendaciones de seguridad establecidas por el Organismo alemán de la Seguridad Social para la Agricultura, la Silvicultura y la Horticultura (SVLFG, por sus siglas en alemán) de reconocimiento internacional, desarrolladas y traducidas para su comprensión práctica por la Sociedad Alemana de Cooperación Internacional (GIZ, por sus siglas en alemán).

“A fin de que la explotación de las plantas de biogás sea sostenible, eficiente y fiable, la seguridad es una cuestión de vital importancia” (GIZ, 2016).

8.1 General

El biogás está clasificado como una mezcla de gases altamente inflamables que, si se inhala, puede ocasionar efectos nocivos para la salud debido a sus componentes tóxicos. Por otra parte, la Planta de Biogás se compone de sistemas de ingeniería de diversa complejidad que conllevan sus propios peligros. Es por ello que resulta fundamental contar con las medidas de protección y seguridad a fin de reducir al mínimo los riesgos derivados de las plantas del biogás para las personas y el ambiente.

Según los estudios realizados por el Organismo alemán de la Seguridad Social para la Agricultura, la Silvicultura y la Horticultura (SVLFG) sobre el tipo de accidentes laborales de trabajadores en plantas de biogás entre el 2009 y 2012 en Alemania, el tipo de lesiones sufridas (ver **Figura 8.1**) son generalmente de naturaleza mecánica (golpes causados por objetos, caídas, cortes, contusiones, etc.), la aplicación de sustancias químicas (auxiliares tecnológicos, agentes biológicos o compuestos utilizados para desulfurizar el biogás) son causa de varios accidentes, mientras que aquellos causados por explosión o fuego son relativamente infrecuentes, considerando los elevados estándares de seguridad que aplican en Alemania.

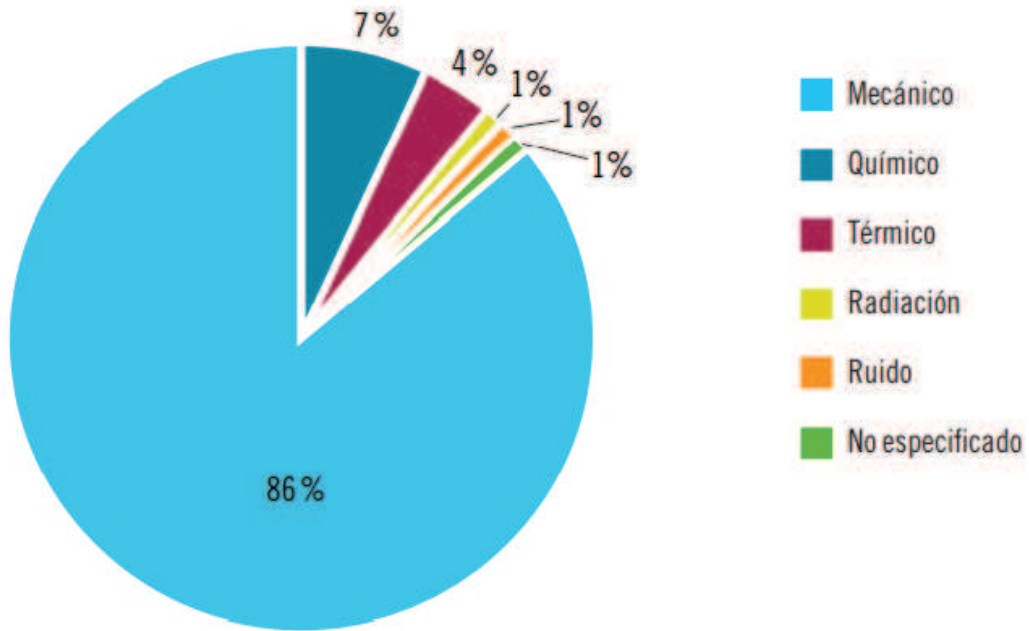
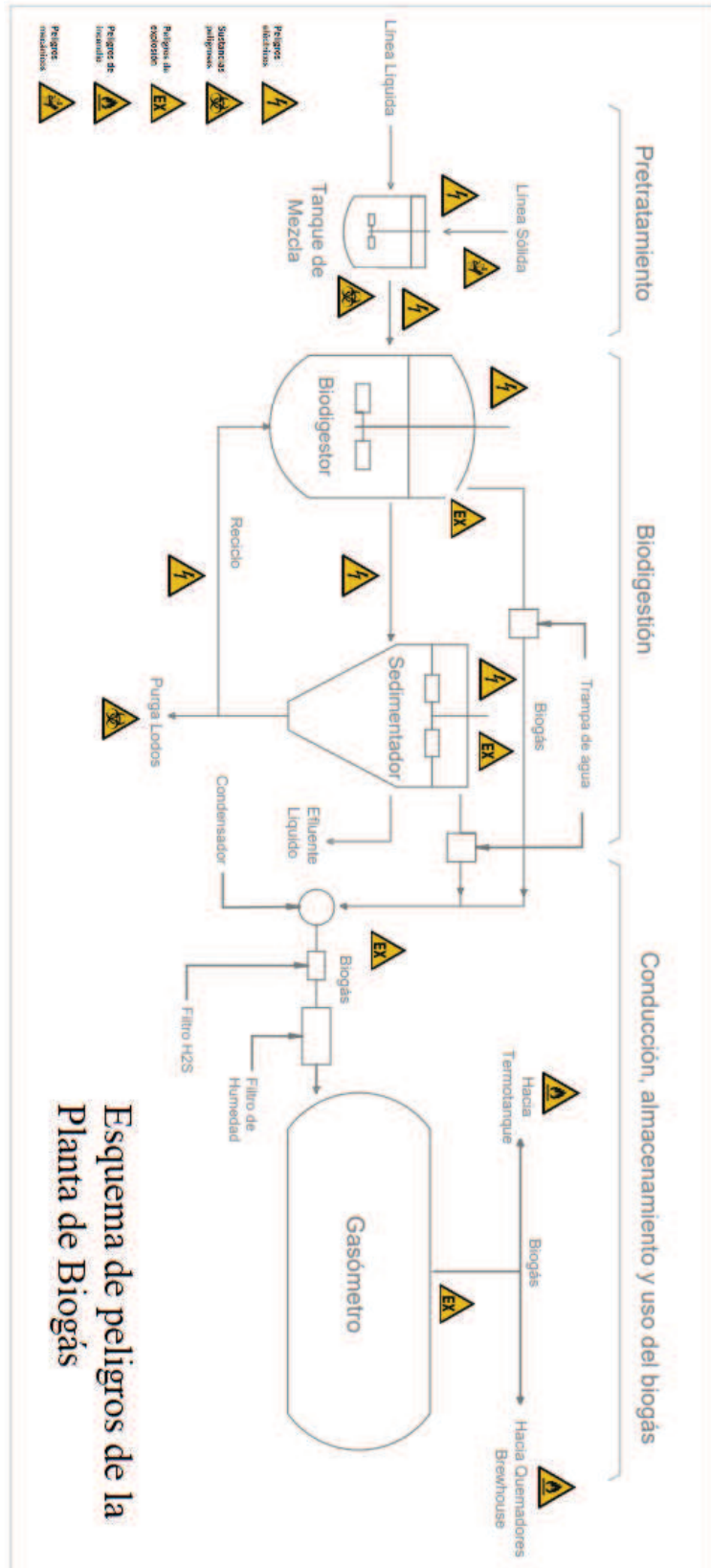


Figura 8.1: Tipos de peligro derivados de accidentes con resultado de lesiones a personas (SVLFG, 2012)

8.1.1 Peligros

Los posibles peligros de la Planta de Biogás son los incendios y explosiones, pero también sustancias peligrosas, corriente y dispositivos eléctricos, conducción y uso del biogás y los peligros mecánicos en determinados componentes de la planta.

La **Figura 8.2** muestra los principales peligros en relación a los componentes de la Planta de Biogás. En este diagrama la atención se centra en los peligros para la salud humana y no en los peligros para el ambiente.



Esquema de peligros de la Planta de Biogás

Figura 8.2: Sinopsis de los peligros en la Planta de Biogás

Los peligros a la salud humana se pueden dividir en cuatro categorías: peligros eléctricos, sustancias peligrosas, peligros de explosión e incendio, y peligros mecánicos.

- **Peligros Eléctricos** 

Los peligros eléctricos se deben a la gran variedad de aparatos eléctricos utilizados en la Planta de Biogás (bombas, equipos de control, agitadores, instrumentos de medición, etc.). Bajo determinadas circunstancias, éstos pueden tener efectos adversos sobre la salud como resultado de los riesgos que conlleva la presencia de energía eléctrica, tales como descargas directas (por ejemplo cables de potencia dañados en los agitadores) o por estática.

- **Sustancias Peligrosas** 

Las sustancias peligrosas presentes en la Planta de Biogás son el mismo biogás, aceites, lodos de purga y los químicos (hidróxido de sodio y ácido clorhídrico) utilizados para neutralizar la mezcla de alimentación. Entre los peligros más probables se encuentran el riesgo por asfixia o intoxicación por gases de fermentación/biogás, liberación de gases altamente tóxicos (sulfuro de hidrógeno) en el biodigestor y sedimentador. También se encuentran los riesgos asociados al manejo de soluciones de HCl y NaOH, de carácter ácido y alcalino respectivamente.

- **Peligros de explosión e incendio**  

Una explosión se define como una reacción química repentina entre una sustancia inflamable y oxígeno, liberando grandes cantidades de energía. Esto puede ser ocasionado por una atmósfera explosiva por ejemplo. Si la concentración de biogás en la atmósfera se sitúa entre el 6 y el 22 % V/V, existe riesgo de explosión en presencia de una fuente de ignición. La temperatura de ignición del biogás es aproximadamente de 700 °C, pudiendo variar con la composición del biogás.

- **Peligros mecánicos** 

Los peligros mecánicos no son específicos de la tecnología de biogás. Sin embargo constituyen el tipo de accidentes más comunes debido a caídas, impactos, contusiones, cortes debidos a el trabajo en altura sobre las estructuras de la Planta de Biogás, trabajos cerca de las piezas rotativas (sistemas de mezcla, chimangera) o trabajar cerca de vehículos en movimiento. Existe una gran probabilidad de que los accidentes ocurran durante las tareas de mantenimiento y reparación, si las medidas de protección son inadecuadas.

- **Peligros originados por el biogás**

Dado que el biogás es una mezcla de diferentes gases, sus riesgos varían según la composición de dichos componentes. Éstos aparecen enumerados junto con su relación de riesgos a la salud humana en la **Tabla 8.1**.

Tabla 8.1: Propiedades de los constituyentes gaseosos del biogás y sus riesgos asociados. Fuente: GIZ, 2016.

| | 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 |

- **Peligros para el medio ambiente**

El medio ambiente solo se encuentra expuesto al peligro si se produce una fuga de biogás a la atmósfera o los materiales de trabajo de la planta (bagazo y mezcla dentro del biodigestor/sedimentador, lodos de purga, aceites) penetran en medios acuáticos vecinos. Sin embargo, en la **Cervecería A**, esto es improbable dado su lejanía con potenciales cuerpos de agua receptor.

- **Peligros derivados de un comportamiento inadecuado**

Las acciones y operación por parte de personas no autorizadas en la planta, así como peligros derivados del personal tales como errores operativos, omisión deliberada de llevar a cabo medidas correctivas, sabotaje, etc, son peligros potenciales que también deben tenerse en cuenta durante el funcionamiento de la Planta de Biogás.

8.2 Requisitos de Seguridad

A continuación se presentan los lineamientos de seguridad generales indispensables para garantizar la seguridad en el arranque, operación y cierre de la Planta de Biogás.

8.2.1 Evaluación de Riesgos

Con el fin de prevenir accidentes, los peligros en la Planta de Biogás deben identificarse, evaluarse y minimizarse sistemáticamente. Para ello, se recomienda confeccionar y utilizar una matriz de riesgos (Ver **Tabla 8.2**), en la cual se muestran las probabilidades de que ocurra un evento no deseado en relación a las consecuencias de ese evento. Las categorías de probabilidad son: infrecuente, improbable, posible, probable y casi seguro.

Las categorías de gravedad de las consecuencias son: 1) lesiones o enfermedades de poca gravedad (p. ej. magulladuras, golpes leves); 2) lesiones o enfermedades de gravedad moderada (p. ej. fracturas óseas simples); 3) lesiones o enfermedades graves (p. ej. paraplejia); 4) posible fallecimiento, desastre (p. ej. lesiones graves a numerosas personas).

En base a la Evaluación de Riesgos, deben definirse e implementarse medidas de protección adecuadas. Los resultados obtenidos deben ser tenidos en cuenta en el diseño, selección de equipos y materiales a la hora de diseñar las estaciones de trabajo, procesos y secuencias operativas y su interacción conjunta con el proceso de producción cervecero.

Usualmente, el responsable de realizar la Evaluación de Riesgos debe ser una persona designada por el operador y ésta debe actualizarse antes del arranque de la planta, tras cualquier reanudación de las operaciones y después de haber realizado cambios relevantes en las condiciones de seguridad. Es recomendado que el experto calificado revise cada tanto la Evaluación de Riesgos y la eficacia de las medidas de protección siguiendo las diferentes fases de una Evaluación de Riesgo (Ver **Figura 8.3**). También, es necesario que se efectúe antes de que se realicen labores de mantenimiento y reparación.

Tabla 8.2: Matriz de riesgos. Fuente: GIZ (2016)

| | | Consecuencias potenciales | | | | | |
|--------------|--|--|--|---|---|---------------|----------|
| | | Lesiones de poca gravedad o malestar. Sin tratamiento médico o consecuencias físicas mensurables | Lesiones o enfermedad que requieren tratamiento médico. Incapacidad temporal | Lesiones o enfermedad que requieren hospitalización | Lesión o enfermedad que causan incapacidad permanente | Fallecimiento | |
| | | No significativas | De poca importancia | Moderadas | De gran importancia | Graves | |
| Probabilidad | Se espera que ocurra regularmente bajo circunstancias normales | Casi seguro | Media | Alta | Muy alta | Muy alta | Muy alta |
| | Se espera que ocurra en algún punto | Probable | Media | Alta | Alta | Muy alta | Muy alta |
| | Puede ocurrir en algún punto | Posible | Baja | Media | Alta | Alta | Muy alta |
| | No es probable que ocurra en circunstancias normales | Improbable | Baja | Baja | Media | Media | Alta |
| | Puede ocurrir, pero probablemente nunca sucederá | Infrecuente | Baja | Baja | Baja | Baja | Media |

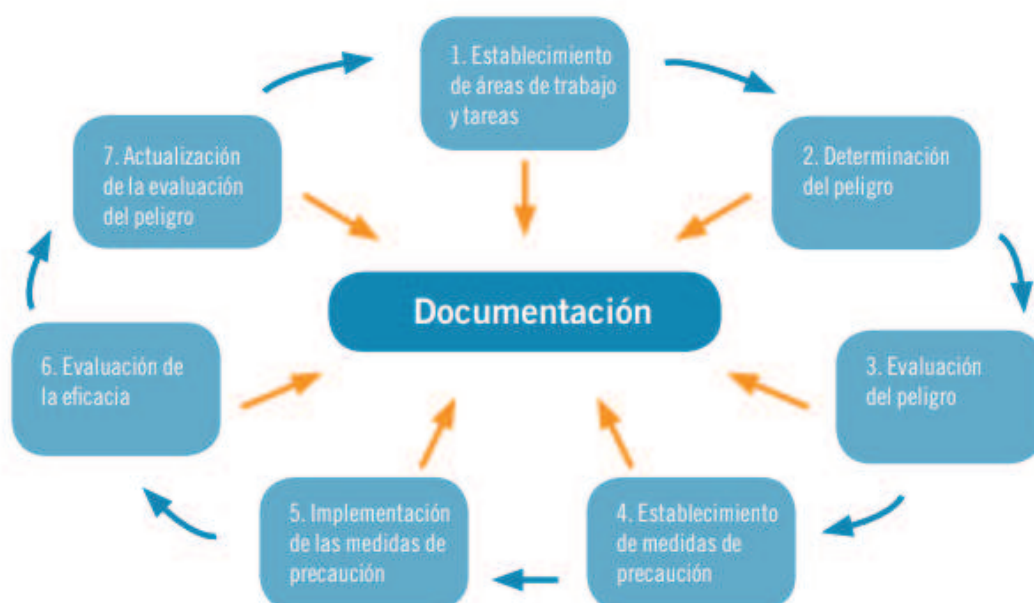


Figura 8.3: Medidas de las fases de evaluación de riesgo. Fuente: GIZ (2016).

Para implementar las medidas de protección, estas deben seguir el principio TOP (ver **Figura 8.4**) para determinar su orden de jerarquía. Primero es necesario adoptar las medidas técnicas de protección tales como cubrir las piezas rotatorias o garantizar el sello hidráulico del sistema. Una vez agotadas todas las medidas técnicas posibles, deben implementarse las medidas organizativas. Éstas consisten en la redacción de instrucciones operativas, capacitaciones e información, a fin de garantizar la operación de dispositivos y equipos en forma segura. En último lugar, en casos donde las medidas anteriores no alcanzan para evitar los peligros, deben utilizarse medidas de protección personal para proteger a los operarios en caso de riesgo. Esto incluye, p. ej., utilizar máscaras de respiración si es inevitable la liberación de biogás.



Figura 8.4: Medidas de Protección de acuerdo con el principio TOP. Fuente: Elaboración Propia.

8.2.2 Disposiciones de Planta

El funcionamiento normal de la planta es aquel en el cual la planta trabaja dentro de los parámetros de diseño normales. Esto no incluye las etapas de arranque, cierre o labores de mantenimiento y reparaciones. Es por ello que cada uno de estas etapas deben tener consideraciones propias, con instrucciones operativas específicas.

- **Arranque/puesta en marcha**

Es primordial para la seguridad elaborar un plan de arranque antes de iniciar la puesta en marcha y seguirlo estrictamente durante esta etapa.

Antes de proceder a llenar el biodigestor con el inóculo y la alimentación correspondientes, deben haberse completado todos los trabajos relacionados con el mismo, incluidos los sistemas de conducción y agitación, a fin de prevenir daños o lesiones. Para conocer la carga precisa de la Planta de Biogás, es necesario pesar el sustrato correctamente. También, deben realizarse análisis fisicoquímicos regulares sobre el sustrato y la mezcla dentro del biodigestor, para garantizar un arranque rápido. Se deben tomar precauciones ya que, si la carga orgánica aumenta demasiado rápido durante la adecuación del inóculo, el proceso puede sobrecargarse y se debe considerar, en última instancia, la necesidad de prolongar la duración del proceso de arranque.

Por otro lado, si los tanques no están completamente llenos hasta sus niveles de diseño, se pueden producir fugas incontroladas de biogás. Por lo tanto, es fundamental prestar atención a que los niveles de llenado sean los suficientes para garantizar que esté completamente sumergido en la fase líquida el ingreso de alimentación desde el tanque de pretratamiento en el biodigestor. De igual modo se deben controlar los niveles de líquidos

en las trampas de agua y de condensados, así como una correcta carga y sello de los filtros de biogás.

A su vez, durante el arranque de la planta, debido al aire inicial dentro del sistema, temporalmente estará presente una mezcla de gas explosiva debido al incremento de la proporción de metano en el biogás (6-22 % V/V de biogás en aire).

- **Mantenimiento y reparaciones**

La reparación y mantenimiento de la Planta de Biogás debe ser realizado únicamente por servicios especializados que cuenten con los conocimientos y experiencia necesarios para llevar a cabo los trabajos pertinentes en forma confiable.

Ciertos trabajos de mantenimiento en la Planta se llevan a cabo en un área con peligro de explosión y potencial presencia de sulfuro de hidrógeno. En caso de requerir ingresar dentro del biodigestor o sedimentador, o realizar reparaciones en el sistema de conducción, tratamiento y uso del biogás, deben cumplirse las siguientes medidas de protección adecuadas:

- Establecer y acordonar áreas en las que cabe esperar que exista riesgo de incendio/explosión u otros riesgos para la salud
- Apagar los sistemas eléctricos y térmicos
- Retirar el biogás de los componentes de la planta
- Utilizar equipos y herramientas adecuadas a prueba de explosiones
- Medir las concentraciones de gases en la zona de trabajo y circundantes y tomar las medidas de protección adicionales llegado el caso.
- Usar el equipo de protección personal
- Asegurar una ventilación adecuada
- Comunicar previamente al resto del personal las actividad a realizar y asegurar que terceros de la cervecería no accedan al área de trabajo
- Designar un supervisor

- **Cierre/clausura**

El cierre de la Planta de Biogás es una etapa operativa especial que requiere medidas particulares, por lo tanto, los peligros específicos se consideran separadamente de los anteriormente mencionados.

El proceso de carga del sustrato en el biodigestor se detiene, mientras que los egresos se mantienen. Para evitar la pérdida de los sellos hidráulicos, el biodigestor debe alimentarse con un volumen equivalente de agua. No deben retirarse los lodos hasta garantizar que prácticamente se detuvo toda la actividad metanogénica, y con ello la producción de biogás.

Una vez disminuida la producción de biogás, se debe establecer una conexión con la atmósfera para realizar la purga del sistema y evitar efectos de subpresión al extraer los lodos. En ese momento, puede formarse una atmósfera explosiva en el biodigestor debido al ingreso de aire, con lo cuál deben evitarse las fuentes de ignición.

Debe desconectarse el biodigestor y sedimentador del sistema de recogida de gas para prevenir un flujo de retorno de gas. Se debe realizar la purga del gasómetro y sistema de conducción a través de una conexión a la atmósfera. Se puede formar una atmósfera explosiva peligrosa en torno a las boquillas de salida con lo que deben evitarse las fuentes de ignición.

Antes de ingresar en el biodigestor para su desensamble, debe garantizarse que se ha prevenido de todo riesgo de asfixia, intoxicación, fuego o explosión mediante una ventilación adecuada y que se dispone de aire suficiente para respirar. Todo equipo operativo, tales como bombas o agitadores debe haberse asegurado que se encuentra desconectado previo al ingreso.

- **Plan de protección contra incendios**

Las plantas de biogás presentan varias cargas de fuego dependiendo de su diseño, tamaño, suministro de sustrato, equipos operativos y de trabajo y materiales utilizados. En la planta del caso de estudio, a pesar de ser una planta relativamente pequeña, es necesario incluir en su diseño y planificación medidas estructurales, técnicas y organizativas de protección contra incendios.

Entre las medidas estructurales de protección contra incendios se tiene en cuenta: 1) el aislamiento térmico del biodigestor y sedimentador consiste en un material no inflamable (lana de vidrio); 2) las instalaciones eléctricas deben cumplir las normas requeridas por Ente Nacional Regulador de la Electricidad (ENRE) y deben ser revisadas periódicamente por un electricista autorizado. El operador debe llevar a cabo regularmente controles visuales para detectar daños causados por roedores y signos de chamuscado en el cableado con el fin de minimizar los riesgos de que se inicie un incendio; 3) se deben mantener distancias de seguridad para disminuir la influencia recíproca en caso de que se produzca algún daño, evitar la propagación del fuego y proteger el gasómetro. Para tal fin, es necesario disponer de distancias de al menos 6 m en sentido horizontal entre tanques de almacenamiento de biogás, instalaciones y quemadores o puntos de ignición.

Respecto a las medidas de carácter organizativo se deben cumplir las siguientes condiciones: 1) no debe haber materiales combustibles almacenados dentro de las distancias de seguridad; 2) no se permiten maquinaria, actividades o vehículos que puedan constituir una fuente de peligro para el gasómetro (p. ej. equipos de soldadura o cortes) sin medidas de protección adicionales; 3) está prohibido hacer fuego, tener llamas abiertas y fumar; 4) los empleados y empresas externas deberán recibir instrucciones periódicamente en relación con las medidas que se deben tomar en caso de fallos operativos, accidentes, emergencias y cómo prevenirlas; 5) deben colocarse en lugares

pertinentes todas las rotulaciones de seguridad y protección de salud necesarias (salidas de emergencia, ubicación de extintores), colocarse extintores de acuerdo a la carga de fuego y designar personal de primeros auxilios.

- **Operación**

Durante el desarrollo normal de la actividades de la planta, el operador designado debe velar por que los equipos de trabajo se manipulen de forma segura y que la planta y sus componentes se operen de forma segura con ayuda de medidas técnicas de protección, estructura organizativa y equipo de protección adecuado.

El operador deberá diseñar y documentar la estructura organizativa de la planta de modo que todas las actividades puedan ser realizadas de forma segura y supervisadas en todo momento. Deberá acordarse como mínimo los siguientes puntos:

- 1) Responsabilidades (comprobar registro de operación, llevar a cabo las capacitaciones, evaluación de riesgos, etc.)

- 2) Regímenes de suplencia y guardia en caso de ser necesario donde la información deberá transmitirse de forma correcta y documentarse.

Las capacitaciones deben realizarse previo al inicio de la actividad y, posteriormente, a intervalos regulares, al menos una vez al año. Deberá llevarse un registro por escrito de la instrucción. Las tareas peligrosas deberán efectuarse siguiendo instrucciones escritas desarrolladas por el operador o persona responsable. Debe existir un sistema de autorización para trabajar cuando sea necesario realizar actividades peligrosas (p. ej. trabajar dentro de los tanques y en espacios angostos, soldaduras, perforaciones, etc.).

Deben garantizarse medidas de higiene básicas aplicables a todo el personal, como lavarse las manos antes de los descansos y tras finalizar el trabajo, limpiar el lugar de trabajo de forma regular, cambiar/lavar la ropa de trabajo y equipos de protección personal. La ropa de trabajo y protección personal deben mantenerse separados de la ropa de uso privado y los empleados deberán abstenerse de comer o beber en lugares de trabajo donde exista riesgo de contaminación por agentes biológicos (en presencia de los lodos de purga). Si acceden al área de trabajo plagas como roedores, palomas, insectos u otros animales, será de suma importancia realizar un control regular de plagas. Por último debe proporcionarse una ventilación adecuada del área de trabajo de acuerdo con la Evaluación de Riesgos.

Respecto a los elementos de protección personal, en la **Figura 8.5** se muestra un resumen de los diferentes elementos que componen el equipo de protección personal (EPP). Cabe destacar que no todos los elementos deben ser utilizados en cada caso.



Figura 8.5: Equipo de protección personal (EPP). Modificado de: GIZ (2016).

- **Documentación**

Para mantener y controlar estrictas condiciones de seguridad que garanticen mantener los riesgos de operación al mínimo, deben documentarse los siguientes elementos:

- Responsabilidades: lista de números de teléfono de personas a contactar (tanto internas como externas, autoridades, agencias).
- Plan de emergencia (instrucciones operativas para procedimientos en caso de accidente, incendio, explosión, liberación de sustrato, corte de corriente, evitar el acceso de personas no autorizadas, etc.)
- Evaluación del riesgo
- Capacitaciones para los empleados
- Manuales de instrucciones
- Registro de sustancias peligrosas
- Fichas de datos de seguridad
- Formularios de divulgación
- Plan de mantenimiento y reparación
- Visitas de inspección regulares
- Documentos que acreditan la ejecución de pruebas periódicas (pruebas eléctricas, pruebas del equipo de trabajo)
- Documentos que acreditan la realización de cursos de capacitación inicial y periódica

- Planos del actual inventario de instalaciones y equipos (plano de planta para extinción de incendios, diagrama de tuberías e instrumentación, plan de trazado de tuberías, etc.)
- Matriz de gestión de procesos
- Certificado de protección contra incendios

El operador de planta será responsable de mantener una documentación apropiada, es decir, de asegurar que esté completa y actualizada, con la calidad adecuada y en cumplimiento con las disposiciones legales. Esta documentación debe ser de fácil acceso en todo momento, debe guardarse en la planta y conservarse una copia de seguridad de los documentos en lugares alternativos en caso de emergencias o fallos.

8.3 Inspecciones y pruebas

Para lograr que la operación de la Planta sea segura de forma permanente, deben llevarse a cabo tanto una inspección y prueba iniciales como, posteriormente, inspecciones y pruebas periódicas de la Planta y la documentación correspondiente.

Las inspecciones y pruebas deben llevarse a cabo por expertos especialmente formados a este fin y que cuenten con los equipos de prueba e inspección necesarios. Las inspecciones y pruebas pueden dividirse en los siguientes elementos:

- Seguridad estructural
- Protección contra explosiones
- Sistemas presurizados
- Instalaciones eléctricas
- Protección de los recursos hídricos
- Control de la contaminación
- Seguridad funcional
- Protección contra incendios
- Organización empresarial

Se recomienda las siguientes metodologías para la Planta de Biogás: 1) inspección documental, para verificar que la documentación esté completa, correcta y actualizada; 2) inspección visual y prueba funcional, para verificar que las precauciones técnicas y organizativas estén completas, sean correctas y sigan el orden de trabajo adecuado.

8.4 Instrucciones Generales

A continuación se presentan lineamientos e instructivos generales en referencia a la puesta en marcha y operación normal de la Planta de Biogás.

8.4.1 Puesta en marcha Planta de Biogás

La puesta en marcha abarca el proceso desde la inoculación del biodigestor hasta alcanzar la carga orgánica diaria de operación en condiciones de estabilidad del sistema. Los plazos dependen principalmente del proceso de aclimatación del inóculo al sustrato. Durante este periodo inicial son frecuentes las inestabilidades del sistema, con lo cual, el aumento de carga se debe realizar paulatinamente y controlarse rigurosamente de la mezcla anaeróbica dentro del biodigestor.

- **Obtención del inóculo**

La inoculación es el agregado de lodos con altos contenidos de microorganismos anaeróbicos activos al biodigestor, donde se encargan de realizar la descomposición anaeróbica del sustrato. La elección del mismo dependerá de la facilidad de obtención y transporte en primer lugar, y del tipo de sustrato al que se lo desea aclimatar, en segundo término. La calidad, cantidad disponible y origen del inóculo son fundamentales para el proceso de puesta en marcha de la Planta.

La puesta en marcha se puede realizar de tres maneras: 1) obtención del inóculo anaeróbico ya adaptado al sustrato; 2) inóculo de lodos anaeróbicos no adaptados al sustrato, generalmente de origen domiciliarias. Éstos requieren un plazo de adaptación y aclimatación; 3) no utilizar inóculo, la generación de biomasa ocurre a partir de los microorganismos propios en el efluente, siendo este proceso de plazos muy extensos debido a la baja masa microbiana inicial.

La alternativa más recomendada es obtener lodos anaeróbicos provenientes del tratamiento anaeróbico de efluentes de una cervecería de mediana o gran escala, relativamente cercana a la **Cervecería A**, donde los volúmenes de lodos purgados disponibles sean suficientes para realizar la inoculación requerida por el biodigestor. Los lodos preadaptados son menos proclives a la desestabilización del sistema durante su aclimatación y toleran un aumento de carga de sustrato más rápida, disminuyendo los plazos de puesta en marcha de la Planta de Biogás.

En caso de no ser posible la obtención de lodos previamente adaptados, pueden obtenerse lodos anaeróbicos de tratamiento de aguas domiciliarias o tratamientos de agroindustrias asimilables y adaptarlos utilizando mezclas graduales entre el sustrato original y el planteado en el proyecto, hasta alcanzar las cargas orgánicas deseadas sin que el proceso se desestabilice. Este método es más lento, requiriendo plazos superiores a 4 meses.

Previo a la inoculación, para garantizar la calidad de los lodos anaeróbicos seleccionados se debe realizar el ensayo de Actividad Metanogénica Específica (AME).

Este ensayo permite conocer el potencial de la biomasa en convertir el sustrato soluble en metano y dióxido de carbono. Para su aplicación se recomienda seguir las especificaciones desarrolladas por Chernicharo et al., (2007). También se deben caracterizar los siguientes parámetros del inóculo: pH, alcalinidad, ácidos grasos volátiles (AGV's), ST, y SV. En términos generales se recomienda descartar los inóculos con un porcentaje de conversión del sustrato en metano inferior al 80% V/V y/o un porcentaje menor al 75% m/m SV/ST.

La cantidad de inóculo requerido para la puesta en marcha de la Planta está definida en función de la tasa de carga biológica inicial aplicada al sistema, tal como figura en la **Ecuación 8.1**.

Ecuación 8.1

$$L_s = \frac{Q \cdot S_0}{X_1 \cdot V_i}$$

Donde:

L_s es la carga biológica del sistema, expresada en kg DQO/kg SV.día

Q es el caudal de ingreso diario de diseño, expresado en m³/d

S_0 es la concentración de sustrato que ingresa con el afluente, expresada en kg DQO/m³

X_1 es la biomasa contenida dentro del biodigestor, expresada en kg SV/m³

V_i es el volumen de inóculo requerido para la inoculación inicial

Para la inoculación se recomienda alcanzar valores de carga biológica del sistema de 0,1 - 0,5 kg DQO/kg SV.día (Chernicharo et al., 2007) o un volumen de llenado de aproximadamente el 50% del volumen útil (Groppelli y Giampaoli, 2016).

- **Llenado y Aclimatación**

Se recomienda realizar la carga del biodigestor con el inóculo de lodo con el tanque vacío y esperar entre 12 y 24 horas para permitir la aclimatación de los lodos a la temperatura. Luego de ese plazo, se puede comenzar a alimentar el reactor hasta la mitad de su volumen activo. Una vez lleno la mitad, esperar otras 24 hs y controlar las condiciones de pH, temperatura, relación FOS/TAC y DQO del sobrenadante. Si los AGV's se encuentran por debajo de los 2000 ppm HAc (GIZ, 2010) puede continuarse el llenado hasta la totalidad del volumen activo. En caso contrario, se recomienda esperar 24 hs y volver a medir los parámetros sucesivamente hasta que alcancen los valores deseados.

Una vez que el reactor se encuentra lleno, con todas las entradas y salidas (sellos hidráulicos) sumergidas en el líquido, y los parámetros dentro de los valores aceptables, se debe continuar la alimentación de forma constante. Se debe aumentar su carga cada aproximadamente 15 días, siempre y cuando el sistema responda favorablemente. En caso contrario, se recomienda disminuir la tasa y realizar una alimentación más gradual.

Otra manera útil de determinar los requerimientos del sistema, es a través de los valores de la relación FOS/TAC. Esta es la relación entre los AGV's y la alcalinidad total del sistema, donde usualmente entre valores de 0,3 a 0,4 la alimentación es eficiente, valores menores indican que el sistema requiere un ingreso mayor de alimentación (agregar más biomasa) y valores superiores indican que el sistema está sobrecargado, es decir que debe disminuirse la alimentación por un tiempo (disminuir biomasa). En la **Tabla 8.3** se indican los rangos de valores y acciones a convenir para cada caso.

Tabla 8.3: Reglas empíricas para la evaluación de la relación FOS/TAC. Extraído de: Lossie, U. & Pütz, P. (2011)

| VALOR DE LA RELACIÓN FOS/TAC | ANTECEDENTES | MEDIDA |
|------------------------------|---------------------------------------|--|
| > 0,6 | Excesiva sobrealimentación de biomasa | Interrumpir la adición de biomasa |
| 0,5 - 0,6 | Excesiva entrada de biomasa | Agregar menos biomasa |
| 0,4 - 0,5 | La planta está muy cargada | Vigilar la planta más estrechamente |
| 0,3 - 0,4 | La producción de biogás es máxima | Mantener constante la entrada de biomasa |
| 0,2 - 0,3 | La entrada de biomasa es muy baja | Aumentar lentamente la entrada de biomasa |
| <0,2 | La entrada de biomasa es bajísima | Aumentar rápidamente la entrada de biomasa |

En cuanto a los factores ambientales dentro del biodigestor, la temperatura debe encontrarse en un rango de 35 a 37 °C, el pH debe estar por encima de 6,2, preferentemente entre 6,8 y 7,2 y los nutrientes (N, P, S y micronutrientes) deben encontrarse en cantidades y proporción suficientes. El proceso de aclimatación puede requerir largas fases debido a la complejidad del sustrato empleado, con lo cuál se recomienda tener un amplio margen de acción y no saltar etapas en el aumento de carga del biodigestor (**Figura 8.6**). Se estima que el tiempo de adaptación es mayor a tres veces el tiempo de residencia dentro del biodigestor ($\theta_c = 20$ días, aclimatación estimada >60 días).

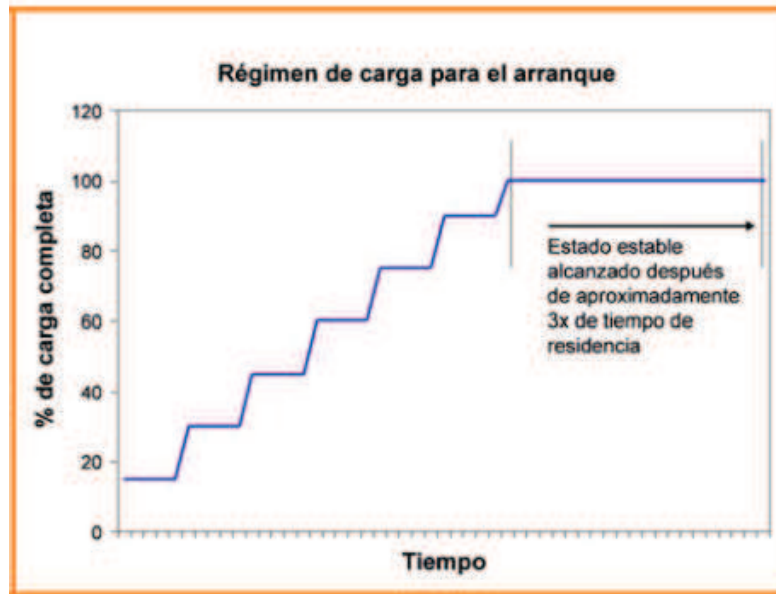


Figura 8.6: Régimen de carga para el arranque. Fuente: GIZ (2010).

La producción de biogás comienza luego de unos 10-15 días posteriores a la inoculación. Se debe recordar que inicialmente el biodigestor se encuentra con aire, con lo cual, se deben tener precauciones debido a la formación de la atmósfera explosiva detallada en el apartado de seguridad de Disposiciones de Planta (**Sección 8.2.2**). El biogás inicial es de bajo contenido de metano, es decir de baja calidad, con lo que se recomienda su quema diaria hasta que alcance los valores de calidad establecidos en el diseño (contenido de metano superior al 50%) y sea aplicable al uso del sistema productivo.

8.4.2 Operación Planta de Biogás

- **Parámetros de Control**

Para asegurar un buen funcionamiento de la Planta de Biogás es necesario tener un control riguroso de los parámetros de operación. Conocer las variables indicadoras del proceso y las acciones acorde a ellas genera una optimización del proceso, disminuye los costos de operación y aumenta el rendimiento. Además, el control de estas variables permite detectar potenciales fallas del sistema a tiempo, permitiendo acciones remediadoras que minimicen los efectos negativos.

Para garantizar el control operacional se debe de establecer un protocolo de control operacional que tenga en consideración los aspectos relevantes de operación del sistema y los recursos materiales y humanos disponibles para tal fin. A continuación, en la **Tabla 8.4**, se presentan los controles operacionales recomendados y su periodicidad.

Tabla 8.4: Programa de control operacional recomendado para la Planta de Biogás

| Parámetro de Control | Unidad | Periodicidad |
|--------------------------------|-------------------------|--------------|
| Pretratamiento | | |
| Caudal línea sólida | kg/día | Diaria |
| Caudal línea líquida | litros/día | Diaria |
| Temperatura Mezcla | °C | Diaria |
| pH Mezcla | | Diaria |
| Biodigestor | | |
| Temperatura | °C | Diaria |
| pH | | Diaria |
| Altura de líquido | m | Diaria |
| Presión | bar | Diaria |
| DQO | g O ₂ /L | Semanal |
| Sólidos Totales (ST) | % m/m | Semanal |
| Sólidos Volátiles (SV) | % m/m | Semanal |
| Sólidos Sedimentables (SS) | % m/V | Semanal |
| Alcalinidad | mg CaCO ₃ /L | Semanal |
| FOS/TAC | | Diaria |
| VFA | mg Hac/L | Semanal |
| Sedimentador Secundario | | |
| Altura de líquido | m | Diaria |
| DQO* | g O ₂ /L | Semanal |
| Sólidos Totales (ST)* | % m/m | Semanal |
| Sólidos Volátiles (SV)* | % m/m | Semanal |
| Presión | bar | Diaria |
| Línea Biogás | | |
| Caudal | m ³ /día | Diaria |
| Composición Biogás | %V/V | Semanal |
| Presión | bar | Diaria |

* Para sobrenadante y lodos

El monitoreo de estabilidad del reactor tiene por principal objetivo detectar signos de fermentación ácida. En caso de que ésta sea considerable, puede provocar la acidificación del biodigestor, provocando la falla del sistema. Es por ello que deben controlarse el pH, alcalinidad y concentración de ácidos volátiles. Otros factores relevantes son las variaciones de caudal y la composición del biogás generado.

Es posible añadir otros ensayos de control tales como Actividad Metanogénica Específica (AME), Estabilidad de Lodos, entre otros, así como aumentar la periodicidad de los ensayos en caso de considerarse necesario por parte del operador responsable.

● Problemas Operativos

Los problemas operativos devienen de perturbaciones del proceso que afectan la digestión anaeróbica de la Planta de Biogás negativamente, y por lo tanto, no se desarrolla el nivel óptimo, tanto de producción y calidad de biogás, como en la remoción de la materia orgánica del sustrato. Esto se traduce en deficiencias económicas por parte de la Planta de Biogás. Por lo tanto, se deben detectar las perturbaciones del proceso y corregirlas en la mayor medida de lo posible.

Las perturbaciones del proceso ocurren cuando las condiciones ambientales de los grupos de bacterias están por fuera del rango óptimo. En la mayoría de los casos, las perturbaciones del proceso se manifiestan como una elevación continua de las concentraciones de ácidos grasos. Esto ocurre por múltiples motivos, y se debe a la respuesta mucho más sensible, característica de las bacterias acetogénicas y metanogénicas, a cambios en el medio ambiente, respecto a otros grupos bacterianos.

A modo de resumen, (los mecanismos de la digestión anaeróbica se exponen en detalle durante el **Capítulo 5**) en caso de no mediar una intervención, el curso normal de una perturbación en el proceso es la siguiente:

- Elevación en las concentraciones de ácidos grasos: inicialmente ácido acético y propiónico, y si persiste la perturbación del proceso, también aumentan las concentraciones de ácidos grasos de cadena más larga.
- Elevación continua en la relación FOS/TAC (en paralelo con la elevación de ácidos grasos)
- Reducción del contenido de metano en el biogás
- Reducción del rendimiento de biogás a pesar de la alimentación constante
- Descensos del valor de pH en el biodigestor, acidificación del proceso
- Colapso completo de la producción de biogás

A continuación se describen las causas posibles de las perturbaciones del proceso para facilitar el diagnóstico de la situación en caso de que se ocasione una perturbación y así intentar prevenir una eventual falla:

- **Fluctuaciones de temperatura**

La caída de la temperatura afecta directamente a las bacterias metanogénicas, ya que éstas sólo sobreviven dentro de un rango de temperatura estrecho. Las bacterias que participan en la hidrólisis y acidogénesis son menos especializadas en este aspecto, con lo cual, inicialmente son más tolerantes a caídas de temperatura. Sin embargo, la baja en la tasa metabólica de las bacterias metanogénicas provoca indirectamente la acumulación de los ácidos en el biodigestor, especialmente si no se ralentiza o detiene temporalmente la alimentación.

La inhibición por temperatura no solo se debe a deficiencias en el sistema de calefacción: la adición de grandes cantidades de sustrato no calentado adecuadamente, fallas en los sensores de temperatura o una mezcla deficiente son algunos de los motivos que provocan gradientes de temperatura en el interior del biodigestor, provocando cierto nivel de perturbación. Es importante destacar que no es la temperatura absoluta la que es crucial para un proceso estable, sino mantener un nivel constante de temperatura. Si ocurre un cambio en la temperatura (hacia arriba o hacia abajo) dentro de un periodo corto, se espera generalmente que haya un efecto adverso en la degradación. En algunos casos la inhibición puede darse por un aumento en la temperatura dada por la propia liberación de calor por parte del proceso anaeróbico. Por lo tanto, es fundamental verificar regularmente la temperatura de biodigestión para asegurar la operación exitosa de la planta.

- **Deficiencia de macro y/o micronutrientes**

Los nutrientes deben encontrarse en concentraciones óptimas para la flora anaeróbica, especialmente las bacterias metanogénicas. Una deficiencia en las proporciones de nitrógeno y fósforo detalladas en la **Sección 5.2.2** provoca un bajo rendimiento en la generación de biogás. Lo mismo sucede con las concentraciones de micronutrientes, también denominados oligoelementos, sin embargo, en concentraciones altas estos pueden ser perjudiciales para el proceso ya que actúan como agentes inhibidores, con lo cual, es recomendable controlar sus concentraciones cada ciertos periodos de tiempo.

- **Deficiencias recirculado y purga**

Un recirculado deficiente provoca una disminución en la eficiencia del proceso de producción de biogás, debido a que el biodigestor “se lava”, ya que la pérdida de masa microbiana en dirección al sedimentador, es mayor a la tasa de reposición por el

recirculado. Esto puede controlarse fácilmente controlando las concentraciones de sólidos en el biodigestor.

Por otro lado, una purga excesiva en el sistema puede generar una deficiencia en las concentraciones de microorganismos en el proceso, mientras que una purga pobre provoca un envejecimiento de los lodos, disminuyendo su eficiencia y generando un aumento indeseado en la concentración de sólidos en el efluente del sedimentador.

- **Presencia de compuestos inhibidores**

Tal como se describió en la **Sección 5.2.4**, la inhibición del proceso anaeróbico puede ocurrir por múltiples factores. Por lo tanto, el correcto diagnóstico es fundamental para encontrar la contramedida correcta. Es importante diferenciar los inhibidores aportados por el sustrato, de los subproductos intermediarios originados durante la actividad metabólica de los microorganismos anaeróbicos.

Las inhibiciones más comunes son debido al oxígeno, AGV's, amoníaco, sulfuro de hidrógeno o metales pesados.

El oxígeno en concentraciones superiores a 0,1 mg/l inhibe los compuestos anaeróbicos estrictos. El diseño de la Planta de Biogás previene el ingreso indebido de oxígeno en el biodigestor y sedimentador secundario, sin embargo, este parámetro debe controlarse en caso de perturbación del sistema para descartar fallas en el sistema.

Las inhibiciones por amoníaco ocurren cuando se utilizan materiales de insumo ricos en proteínas. El nitrógeno amoniacal se divide en el ión amonio (NH_4^+) y en el amoníaco (NH_3) siendo el amoníaco libre la especie inhibidora, especialmente a pH alcalinos. Un aumento en el pH del biodigestor puede ser debido a un exceso de nitrógeno amoniacal.

La inhibición del sulfuro de hidrógeno es poco frecuente en plantas de biogás con sustrato de origen agrícola/alimenticio. La inhibición del sulfuro de hidrógeno se debe a la composición del sustrato con un alto contenido de azufre. Se espera de los sustratos utilizados un contenido de azufre relativamente bajo. Su determinación puede medirse la composición del biogás previo al ingreso a los filtros de desulfuración.

- **Modificaciones en la alimentación**

Las condiciones de operación de una planta de biogás deben mantenerse tan constantes como sea posible. Esto se aplica a las condiciones ambientales en el biodigestor respecto a la adición de sustrato. Si se añade demasiado sustrato en un corto periodo, si se añade en modo irregular, si se hace un cambio rápido entre sustratos de composiciones diferentes, si se añade demasiado sustrato luego de un corte de alimentación (por ejemplo, debido a una falla técnica), pueden provocar una perturbación en el proceso debido a una sobrecarga en la alimentación.

- **Medidas de estabilización**

Tal como se mencionó previamente, se puede corregir de manera duradera una perturbación al proceso sólo si se ha identificado y eliminado la causa. Se debe tener en cuenta que existen algunas medidas de ingeniería de control que pueden tomarse para aliviar la situación, al menos temporalmente.

Las recomendaciones expuestas a continuación describen las medidas fundamentales dirigidas a la estabilización del proceso y las bases de su mecanismo. El éxito de estas medidas generalmente depende del grado de perturbación que afecta al proceso, es decir, la medida en que los microorganismos ya han sido afectados adversamente. Además, se debe observar el proceso muy cuidadosamente mientras se implementan las medidas y durante la fase posterior de recuperación. Así puede reconocerse el éxito o el fracaso de la acción rápidamente y se puede tomar medidas adicionales según sea necesario.

- **Reducción del volumen de alimentación**

La reducción de la alimentación (sin modificar la composición del sustrato) disminuye la tasa de carga orgánica (COV) en el interior del biodigestor. Esto alivia eficazmente la tensión del proceso de digestión anaeróbica. Dependiendo de la medida en la que se reduzca la adición del sustrato, el contenido de metano del biogás se elevará luego de manera notoria. Esto es una indicación de la degradación de los ácidos grasos que se han acumulado en exceso. El ácido acético se degrada rápidamente mientras que el propiónico y butírico (ácidos grasos de cadena más larga) demoran mucho más. Si las concentraciones de ácidos de cadena más larga son muy altas, es posible que estas sustancias no se degraden, con lo cual se deben tomar otras medidas para aliviar la tensión del proceso.

Si la producción de biogás permanece constante luego de reducir la adición de sustrato, es indicador de que el biodigestor estaba sobre-alimentado. Antes de volver a aumentar paulatinamente la alimentación se deben verificar las concentraciones de AGV's y se debe observar una reducción en la producción de biogás.

- **Modificación de caudales de purga y recirculado**

Frente a una perturbación en el sistema debido a la sobrecarga, una medida potencial es aumentar el caudal de recirculado, manteniendo bajo el caudal de purga. Esta acción provoca por un lado una dilución, lo cual significa que la concentración de compuestos inhibidores dentro del biodigestor se reduce. Por otro lado, retornan bacterias “en ayuno” al biodigestor, que pueden desempeñar un papel eficaz en la degradación. En caso de aumentar el recirculado, se debe prestar atención a la temperatura de los lodos provenientes del sedimentador, ya que en mayor volumen podrían afectar al gradiente de

temperatura en el biodigestor y si es necesario se debe asegurar una temperatura constante en el biodigestor por calentamiento adicional (aumentar levemente la temperatura del agua proveniente del termotanque).

En caso de observarse una mala sedimentación en el efluente proveniente del sedimentador, y un aumento excesivo en la concentración de sólidos, es necesario aumentar el caudal de purga para evitar la acumulación de sólidos “envejecidos” dentro del sistema.

Es importante destacar que estas modificaciones en los caudales deben ser paulatinas y con lapsos de tiempo intermedios para poder observar cómo reacciona el sistema a las modificaciones realizadas. Se recomienda que cada aumento o reducción de tasa de recirculado y purga sea menor al 10%, con lapsos de 10 días entre cada modificación, hasta alcanzar finalmente los parámetros normales de control.

- Cambio de la composición del sustrato

Una variación en la composición del sustrato puede estabilizar el proceso de varias maneras. El cambio de la mezcla puede reducir la tasa de carga orgánica (por ejemplo, si se añade menos bagazo y más efluente a la mezcla de alimentación durante el pretratamiento), disminuyendo la concentración de elementos ricos en energía (por ejemplo, los granos de malta), y relajando así la tensión en el proceso. También, el uso de otros sustratos potenciales proveniente de otras industrias (por ejemplo, bosta fresca, guano), puede tener un impacto positivo debido al aporte de nutrientes y micronutrientes, así como nuevos grupos bacterianos. Se debe tener en cuenta que el proceso puede considerarse como una mono-fermentación, con lo cuál la adición de otro componente al sustrato tiene normalmente un impacto positivo sobre la estabilidad del proceso.

En caso de no tener disponibilidad de otros sustratos en cantidades suficientes o no se pueden utilizar por alguna razón, existen varios proveedores de aditivos de micro y macronutrientes en el mercado. Sin embargo, deben tomarse precauciones respecto a la aplicación de los micronutrientes ya que, si se agregan en cantidades excesivas, pueden tener un efecto inhibitor en el proceso. Por lo cual, el nuevo sustrato o aditivos debe analizarse previamente y adicionarse en modo muy paulatino para evitar efectos inhibidores inesperados en la digestión. Los análisis de micronutrientes son muy complejos y costosos, con lo cuál se deben examinar cuidadosamente las opciones antes de añadir otro sustrato o aplicar aditivos.

- Respuesta a la inhibición de amoníaco

La acción dirigida a reducir la inhibición de amoníaco es compleja, e implica una intervención fundamental en el proceso. Es por ello que debe verificarse la inhibición previo a tomar las medidas. La opción fundamental es cambiar la composición del sustrato utilizado como alimentación. El cambio en la composición del sustrato debe ir en

dirección a reducir la carga de nitrógeno (por ejemplo, reemplazar parcialmente el contenido proteico de la alimentación). Esto puede traer como consecuencia una reducción a largo plazo en la concentración de amoníaco dentro del biodigestor. Sin embargo, otras variables del proceso pueden verse afectadas, con lo cuál los cambios deben ser paulatinos y examinados previamente. La reducción del valor de pH por agregado de ácidos, para reducir la proporción de amoníaco no disociado, es extremadamente difícil de lograr en el largo plazo y, por lo tanto, no se recomienda ya que los riesgos de acidificar el biodigestor provocando una falla general son muy altos.

- Respuesta a la inhibición del sulfuro de hidrógeno

Para contrarrestar un exceso de sulfuro de hidrógeno pueden tomarse algunas de las medidas mencionadas a continuación: 1) Añadir sales de hierro para la precipitación del sulfuro; 2) Modificar la composición del sustrato utilizado para la alimentación buscando bajar la concentración de azufre presente; 3) Diluir la mezcla de alimentación para disminuir su concentración (por ejemplo, si se añade menos bagazo y más efluente a la mezcla de alimentación durante el pretratamiento).

La elevación del valor de pH con la ayuda de sustancias de buffer puede reducir la toxicidad del H₂S por periodos cortos, pero no debe confiarse en este método a largo plazo.

- Manejo de fallas y problemas técnicos

Para evitar con éxito potenciales fallas en la operación de la Planta de Biogás se debe elaborar un protocolo de acción basado en las instrucciones de operación de la planta, que contenga las recomendaciones para actuar y pasos para eliminar problemas con los componentes específicos de la planta. Es fundamental que se detecten y eliminen a tiempo todas las fallas y problemas técnicos. Por ello es esencial tener bien configurado el sistema de alerta automático. La condición operativa de los componentes clave de la planta se registra y monitoriza en el sistema de manejo del proceso. Si ocurre una falla técnica, se debe accionar una alerta en el sistema que envíe al operador de la planta u otro personal operativo por teléfono o mensaje de texto. Este procedimiento permite tomar rápidamente una acción de solución.

A su vez, para evitar largas perturbaciones en la operación, es importante que el operador almacene una selección de repuestos y partes que se cambian debido al desgaste. De esta manera, se puede reducir los tiempos de parada y reparación. Además, en caso de emergencia, el operador de la planta debe contar con un servicio confiable que pueda contactar en cualquier momento. Por último, para minimizar el riesgo de fallas técnicas, el operador de la planta debe asegurar que se realicen verificaciones regulares y que se respeten los intervalos de mantenimiento.

CAPÍTULO 9

Conclusiones y recomendaciones

En el presente capítulo, se desarrollan las conclusiones y recomendaciones sobre los resultados obtenidos a partir del proyecto y la experiencia realizada. Estas se dividen en: conclusiones alcanzadas por el estudio del Potencial de Biometano del bagazo cervecero proveniente del caso de estudio, conclusiones sobre el diseño y estudio de prefactibilidad de la Planta de Biogás, y por último, conclusiones personales luego de estos años de estudio y dedicación.

9.1 Conclusiones y Recomendaciones Estudio BMP

A partir de los ensayos realizados en las instalaciones del Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI), logró obtenerse con éxito la composición general del bagazo cervecero, dejando incertidumbre únicamente respecto a sus contenidos de macro y micronutrientes.

Pudo obtenerse sin inconvenientes el potencial de biometano del bagazo cervecero proveniente de una cervecería artesanal, el cual se encontraba entre los rangos esperados según lo indicado por la bibliografía estudiada. Éste se obtuvo a través de una metodología detallada y precisa, sumado a la calidad aportada por el uso del equipo AMPTS II y el asesoramiento por parte del personal del INTI, da la posibilidad de replicación y profundización en los resultados obtenidos.

Los valores obtenidos de volumen de metano productivo fueron relevantes y habilitaron el estudio de prefactibilidad técnico y económico para el aprovechamiento energético del bagazo cervecero a través del diseño y escalado de una planta de digestión anaeróbica.

Entre los resultados, se pudo discriminar los potenciales energéticos entre el bagazo sin pretratamiento y dos pretratamientos, para seleccionar la opción más viable en términos de diseño de biodigestión. También se obtuvieron los parámetros de salida del efluente, aunque estos presentaron cierta dispersión entre sí, dificultando su análisis detallado.

Debido a que durante los ensayos no se pudo observar un segundo pico de generación de metano, existe la posibilidad, dada la naturaleza lignocelulósica del sustrato, las altas proporciones de inóculo utilizado, los tiempos de retención relativamente cortos, relaciones utilizadas y la falta de adaptación previa del inóculo al sustrato, que la estabilización del sustrato durante el ensayo de BMP no se haya completado, dando como resultado un contenido de metano potencial más bajo que el real.

A raíz de la experiencia obtenida al realizar el ensayo, elaborar el informe y profundización del contenido bibliográfico, se recomienda volver a realizar el estudio de Potencial de Biometano del bagazo cervecero artesanal teniendo en cuenta ciertas recomendaciones, para obtener resultados de mayor certidumbre, permitiendo un diseño de Planta de Biogás más eficiente. Para ello se elaboró la siguiente lista de recomendaciones para aplicar durante el ensayo de BMP:

- Realizar las muestras por triplicado y un control de celulosa para cumplir con el protocolo establecido por Angelidaki et al., (2009) y permitir el análisis estadístico
- Realizar estudio de Actividad Metanogénica Específica (AME) en el inóculo utilizado, así como sus concentraciones de fósforo y nitrógeno para mayor control de su calidad
- Determinar macro y micronutrientes en el sustrato, especialmente los contenidos de fósforo y nitrógeno para conocer las relaciones C:N:P que ingresarían en el biodigestor, y analizar la potencial necesidad de añadir co-sustratos a la mezcla
- Utilizar mayor concentración de sólidos totales en la mezcla del ensayo (entre 6 y 12 % m/m ST)
- Analizar el comportamiento del bagazo diluido en efluente proveniente de la brewhouse como sustrato
- Analizar el comportamiento de el bagazo y los pretratamientos en tiempos de retención superiores a 20 días
- Analizar la composición del biogás generado durante el ensayo

También, para un mayor conocimiento de los potenciales problemas operativos en una planta de biogás basada en este tipo de sustrato y las cargas orgánicas soportadas, se recomienda realizar un ensayo a escala piloto.

9.2 Conclusiones sobre el diseño y estudio de prefactibilidad de la Planta de Biogás

Pudo realizarse el diseño y estudio de prefactibilidad de una planta de generación de biogás, utilizando el bagazo generado como subproducto del proceso cervecero, para una cervecería pequeña con una producción de 20.000 litros de cerveza mensuales con una proyección de aumentar su caudal productivo a 30.000 litros mensuales.

La selección del tipo de tecnología y el diseño de la planta se basó en numerosos criterios técnicos y prácticos donde se buscó una tecnología relativamente sencilla, de alto rendimiento y costos moderados, basándose en los resultados obtenidos en los ensayos realizados sobre el sustrato. La generación de biogás alcanza a cubrir entre un 66 y 81 % de los requerimientos totales de energía térmica de la cervecería (caudal actual y de diseño respectivamente), incluyendo los requerimientos propios de la Planta de Biogás. También ahorra los costos y molestias asociados a disponer del bagazo diariamente.

Respecto a los efluentes generados por la Planta de Biogás, si bien sus parámetros no alcanzan los valores requeridos por la normativa de vuelco, su estabilización ocurre en un gran porcentaje. Si bien un posterior tratamiento previo al vuelco es requerido, sus requerimientos se ven simplificados por el sistema desarrollado en el presente proyecto.

Respecto al análisis de prefactibilidad económico, la conclusión es que la instalación y operación de la Planta de Biogás para la **Cervecería A** no es viable bajo las condiciones planteadas, debido a los bajos precios de energía asociados a su reemplazo con la energía generada y, en comparación, los altos costos de inversión y operación de la planta.

Para facilitar el estudio de aplicación de proyectos similares, pudo estimarse un tamaño aproximado de cervecería, a partir del cual comenzaría a ser rentable su operación (en caso de que su inversión fuera, por ejemplo, subsidiada), y el tamaño a partir del cual comenzaría a ser rentable su instalación y operación, con un máximo de 5 años para amortizar la inversión. A partir de volúmenes productivos de 175.000 litros de cerveza/mes, el ahorro anual superaría los costos de operación y mantenimiento, y a partir de los 380.000 litros de cerveza/mes, el ahorro anual permitiría amortizar la operación, mantenimiento e inversión del proyecto.

El bajo rendimiento económico en la producción de biogás se debe principalmente a los bajos costos en energía regulados por subvenciones estatales. Esta situación dificulta la factibilidad de proyectos de generación de energías alternativas. En menor medida, influyen los resultados obtenidos de potencial de metano relativamente bajos y los tiempos de retención y carga conservadores seleccionados en el diseño debido a los altos contenidos de fibras del sustrato. Sin embargo, es importante considerar la reducción de costos ambientales, valores intrínsecos asociados a la disminución y estabilización de los residuos sólidos orgánicos, al tratamiento de los efluentes líquidos y a la disminución en la demanda de combustibles fósiles para la generación de energía térmica.

Por último, pudieron elaborarse las bases principales de un manual de seguridad, uso y mantenimiento de la Planta de Biogás, contemplando los principales riesgos, medidas preventivas y problemas operacionales.

9.3 Conclusiones Personales

La realización del presente Proyecto Final Integrador fue una práctica enriquecedora que me permitió no solo aplicar muchos conocimientos adquiridos a lo largo de toda la carrera, sino también integrarlos y profundizarlos, siendo un gran desafío que me preparó para los inicios del ejercicio de una profesión compleja como lo es la ingeniería ambiental.

CAPÍTULO 10

Anexos

Tabla 3.1a: Valores de vuelco máximos establecidos por el anexo B de la Ley 26221 y la Resolución N°336/03 de la Prov. de Buenos Aires.

| Limite de Descarga a Colectora Cloacal | CABA Anexo B – Ley N°26.221 | Prov. Buenos Aires Resolucion N°336/03 A colectora cloacal |
|---|-----------------------------|--|
| pH | 6,5-8 | 7-10 |
| Temperatura (°C) | 45 | 45 |
| DBO (mg/l) | 300 | 200 |
| DQO (mg/l) | - | 700 |
| OC – Oxígeno Consumido – del KMnO ₄ (mg/l) | 120 | - |
| Sólidos Sedimentables 2 hs (ml/l) | - | 5,0 |
| SSEE - sustancias solubles en éter etílico (mg/l) | 100 | 100 |
| Hidrocarburos (mg/l) | 100 | 30 |
| Sustancias Fenólicas (mg/l) | 0,5 | 0,5 |
| S.R.A.O. Detergentes (mg/l) | 5 | - |
| S.A.A.M. - Detergentes (mg/l) | - | 10 |
| Cromo Hexavalente (mg/l) | 2 | 0,2 |
| Cromo Trivalente (mg/l) | 0,2 | - |
| Cromo Total (mg/ml) | - | 2,0 |
| Cianuros destruibles por cloración (mg/l) | 0,1 | 1,0 |
| Cianuros Totales (mg/l) | 1 | 1,0 |
| Cloro libre (mg/l) | - | - |
| Sulfuros (mg/l) | - | 2,0 |
| Hierro Soluble (mg/l) | - | 10,0 |
| Manganeso Soluble (mg/l) | - | 1,0 |
| Cinc (mg/l) | - | 5,0 |
| Níquel (mg/l) | - | 3,0 |
| Cobre (mg/l) | - | 2,0 |
| Aluminio (mg/l) | - | 5,0 |
| Bario (mg/l) | - | 2,0 |
| Boro (mg/l) | - | 2,0 |
| Cobalto (mg/l) | - | 2,0 |
| Selenio (mg/l) | - | 0,1 |
| Cadmio (mg/l) | 0,1 | 0,5 |
| Plomo (mg/l) | 0,5 | 1,0 |
| Mercúrio (mg/l) | 0,005 | 0,0 |
| Arsénico (mg/l) | 0,5 | 0,5 |
| Plaguicidas Organoclorados (mg/l) | - | 0,5 |
| Plaguicidas Organofosforados (mg/l) | - | 1 |
| Nitrógeno Total (mg/l) | - | 105 |
| Nitrógeno Amoniacaal (mg/l) | - | 75 |
| Nitrógeno Orgánico (mg/l) | - | 30 |
| Fósforo Total (mg/l) | - | 10 |
| Coliformes fecales (NMP/100ml) | - | 20000 |

Tabla 4.1a: Valores de producción metano acumulado durante el ensayo de BMP para los blancos

| Blancos | Reactores | | |
|-----------------|-------------------------------------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 |
| Fecha | Volumen CH4 acumulado (Nml)* | | |
| 10/10/2019 | 24,3 | 24,1 | 24,2 |
| 11/10/2019 | 0 | 0 | 0 |
| 12/10/2019 | 0 | 0 | 0 |
| Promedio | 24,2 | | |

*Cada ensayo finalizó cuando la producción diaria fue < 5 Nml CH4/día

Tabla 4.2a: Valores de producción metano acumulado durante el ensayo de BMP para el bagazo sin pretratamiento

| Bagazo Crudo | Reactores | |
|---------------------|-------------------------------------|-------|
| | 4 | 5 |
| Fecha | Volumen CH4 acumulado (Nml)* | |
| 10/10/2019 | 82,5 | 83,3 |
| 11/10/2019 | 126 | 127 |
| 12/10/2019 | 167 | 169,4 |
| 13/10/2019 | 196,8 | 196,7 |
| 14/10/2019 | 214,6 | 211,2 |
| 15/10/2019 | 227,4 | 221,9 |
| 16/10/2019 | 232,5 | 227,9 |
| 17/10/2019 | 236 | 0 |
| Promedio | 232,0 | |

*Cada ensayo finalizó cuando la producción diaria fue < 5 Nml CH4/día

Tabla 4.3a: Valores de producción metano acumulado durante el ensayo de BMP para el bagazo pretratado mecánicamente

| Bagazo pretratado mecánicamente | Reactores | | | |
|------------------------------------|------------------------------|--------------|---------------|-------|
| | 6 | 7 | 8 | 9 |
| Fecha | Volumen CH4 acumulado (Nml)* | | | |
| 10/10/2019 | 124,6 | 129,8 | 101,1 | 92,6 |
| 11/10/2019 | 209,2 | 213,1 | 162,8 | 150,1 |
| 12/10/2019 | 297,1 | 298 | 195,9 | 185,7 |
| 13/10/2019 | 377,6 | 381,7 | 209,1 | 195,6 |
| 14/10/2019 | 406,1 | 409,2 | 219,3 | 204,2 |
| 15/10/2019 | 421,1 | 423,6 | 228,5 | 213 |
| 16/10/2019 | 433 | 430,6 | 235,1 | 219 |
| 17/10/2019 | | 432,1 | | |
| 18/10/2019 | | 433,7 | | |
| 19/10/2019 | | 435,2 | | |
| 20/10/2019 | | 436,8 | | |
| 21/10/2019 | | 438,3 | | |
| Promedio | | 434,9 | 227,05 | |

*Cada ensayo finalizó cuando la producción diaria fue < 5 Nml CH4/día

Tabla 4.4a: Valores de producción metano acumulado durante el ensayo de BMP para el bagazo pretratado mecánicamente y ácido-térmicamente

| Bagazo pretratado mecánicamente y ácido-térmicamente | Reactores | | | |
|---|-------------------------------------|--------------|-------|---------------|
| | 10 | 11 | 12 | 13 |
| Fecha | Volumen CH4 acumulado (Nml)* | | | |
| 10/10/2019 | 147,2 | 153,5 | 114,4 | 103,8 |
| 11/10/2019 | 221,7 | 232,2 | 183,2 | 166,5 |
| 12/10/2019 | 284,4 | 301 | 210,1 | 195,3 |
| 13/10/2019 | 367,1 | 387,1 | 218,9 | 202,7 |
| 14/10/2019 | 409,8 | 413 | 228 | 211,3 |
| 15/10/2019 | 425,2 | 426,5 | 238,7 | 218,1 |
| 16/10/2019 | 433,5 | 433,7 | 244,8 | 218,1 |
| 17/10/2019 | 435,6 | 437 | 249,3 | 218,1 |
| 18/10/2019 | 437,7 | 440,3 | 249,4 | 218,1 |
| 19/10/2019 | 439,8 | 440,6 | | |
| 20/10/2019 | 441,3 | 440,6 | | |
| Promedio | | 440,2 | | 233,75 |

*Cada ensayo finalizó cuando la producción diaria fue < 5 Nml CH4/día

Tabla 4.5a: Valores de producción metano acumulado durante el ensayo de BMP para los controles

| Control | Reactores | |
|-----------------|-------------------------------------|---------------|
| | 14 | 15 |
| Fecha | Volumen CH4 acumulado (Nml)* | |
| 10/10/2019 | 0 | 0 |
| 11/10/2019 | 77,5 | 88,8 |
| 12/10/2019 | 216,8 | 225,9 |
| Promedio | | 221,35 |

*Cada ensayo finalizó cuando la producción diaria fue < 5 Nml CH4/día

Tabla 4.6a: Valores de pH obtenidos antes y después del ensayo BMP para cada reactor

| Ensayo | Relación S/I (g SVs/gSVi) | n° Reactor | pH entrada mezcla | pH salida mezcla |
|----------------------|------------------------------|---------------|----------------------|---------------------|
| Blanco | - | 1 | 7,00 | 7,74 |
| | | 2 | 7,01 | 7,81 |
| | | 3 | 7,02 | 7,74 |
| Bagazo Crudo | 0,5 | 4 | 7,03 | 7,51 |
| | | 5 | 7,02 | 7,53 |
| Bagazo Mec | 1 | 6 | 7,01 | 7,52 |
| | | 7 | 7,01 | 7,45 |
| | 0,5 | 8 | 7,02 | 7,65 |
| | | 9 | 7,01 | 7,54 |
| Bagazo Mec+Ter+Ac | 1 | 10 | 7,01 | 7,50 |
| | | 11 | 7,01 | 7,47 |
| | 0,5 | 12 | 7,01 | 7,50 |
| | | 13 | 7,01 | 7,57 |
| Control | 0,5 | 14 | 7,00 | 8,00 |
| | | 15 | 7,01 | 7,96 |

Tabla 4.7a: Valores de generación de lodos obtenidos tras el ensayo de BMP

| Sedimentación | | | | | |
|-------------------|------------|-------|--------------|-------|-----------------|
| Ensayo | N° Reactor | Lodos | Sobrenadante | Total | Lodos generados |
| | Unidad | | | | |
| Blanco | 1-2-3 | 300 | 850 | 1150 | 26,1 |
| Bagazo Crudo | 4-5 | 240 | 510 | 750 | 32,0 |
| Bagazo Mec | 6-7 | 190 | 560 | 750 | 25,3 |
| | 8-9 | 250 | 510 | 760 | 32,9 |
| Bagazo Mec+Ter+Ac | 10-11 | 190 | 560 | 750 | 25,3 |
| | 12-13 | 250 | 510 | 760 | 32,9 |
| Control | 14-15 | 190 | 560 | 750 | 25,3 |

Tabla 4.8a: Valores de Sólidos Totales (ST) y Sólidos Volátiles (SV) obtenidos antes y después del ensayo BMP y el sobrenadante obtenido

| Ensayo | N° Reactor | Relación S/I | Entrada | | Salida mezcla | | Remoción SV mezcla | Sobrenadante | |
|-------------------|------------|--------------|---------|-------|---------------|------|--------------------|--------------|------|
| | | | ST | SV | ST | SV | | ST | SV |
| Unidad | | gSVs/gSVi | | % m/m | | | % | % m/m | |
| Blanco | 1-2-3 | 0,5 | 0,75 | 0,38 | 0,74 | 0,37 | 1,9 | - | - |
| Bagazo Crudo | 4-5 | 0,5 | 0,94 | 0,56 | 0,89 | 0,45 | 20,7 | 0,43 | 0,22 |
| Bagazo Mec | 6-7 | 1 | 1,11 | 0,73 | 0,86 | 0,43 | 41,0 | 0,47 | 0,20 |
| | 8-9 | 0,5 | 0,94 | 0,56 | 1,05 | 0,42 | 24,4 | 0,65 | 0,17 |
| Bagazo Mec+Ter+Ac | 10-11 | 1 | 1,10 | 0,71 | 0,89 | 0,45 | 37,5 | 0,52 | 0,22 |
| | 12-13 | 0,5 | 0,93 | 0,55 | 0,90 | 0,22 | 59,0 | 0,42 | * |
| Control | 14-15 | 0,5 | 0,92 | 0,55 | 0,83 | 0,21 | 62,3 | - | - |

*No se pudo determinar

Tabla 4.9a: Valores de DQO estimados y obtenidos antes y después del ensayo BMP y el sobrenadante obtenido

| Ensayo | N° Reactor | Relación S/I | DQOEntrada | DQOSalida | DQOSalida | Remoción DQOmezcla |
|-------------------|------------|--------------|------------|-----------|--------------|--------------------|
| | | | estimada | mezcla | Sobrenadante | |
| Unidad | | gSVs/gSVi | mg O2/kg | mg O2/kg | mg O2/kg | % |
| Blanco | 1-2-3 | - | 6476 | 5585 | 658,6 | 13,8 |
| Bagazo Crudo | 4-5 | 0,5 | 7692 | 6769 | 755,5 | 12,0 |
| Bagazo Mec | 6-7 | 1,0 | 8713 | 8031 | 884,8 | 7,8 |
| | 8-9 | 0,5 | 7623 | 6758 | 714,8 | 11,3 |
| Bagazo Mec+Ter+Ac | 10-11 | 1,0 | 10229 | 6646 | 987,1 | 35,0 |
| | 12-13 | 0,5 | 8380 | 7400 | 705,2 | 11,7 |
| Control | 14-15 | 0,5 | 8382 | 5538 | 916,7 | 33,9 |

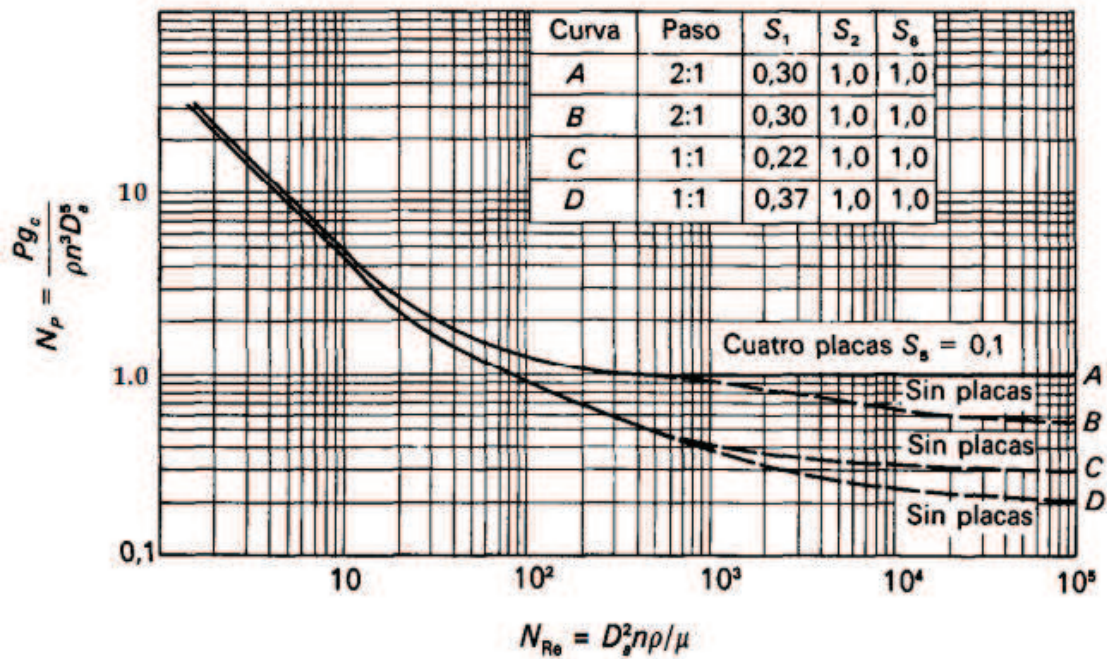


Figura 6.1a: Gráfico correlaciones de potencia entre número de Reynolds (N_{Re}) y número de Potencia (N_p) para mezclas con rodetes de 3 palas y tanques con placas deflectores y sin ellas. Fuente: McCabe et al., 2007.

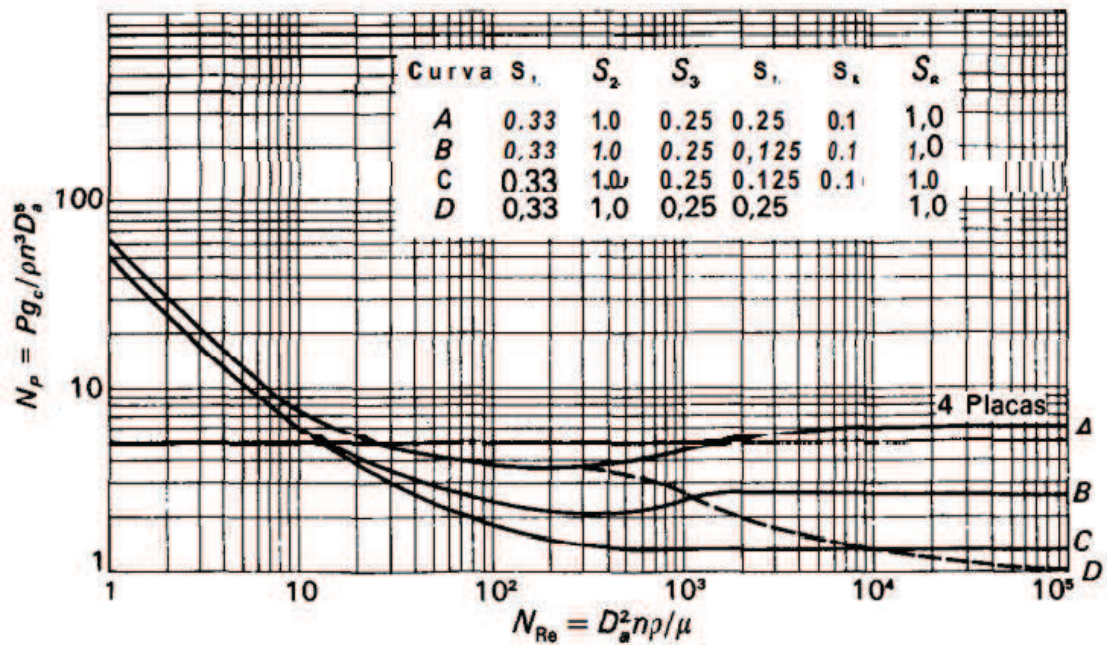


Figura 6.2a: Gráfico correlaciones de potencia entre número de Reynolds (N_{Re}) y número de Potencia (N_p) para mezclas con rodetes de 6 palas y tanques con placas deflectores y sin ellas. Fuente: McCabe et al., 2007.

CAPÍTULO 11

Bibliografía

- AINIA. (2005). Proyecto Info MTD's: Mejores técnicas disponibles en el sector cervecero. Instituto Tecnológico Agroalimentario. Disponible en: <http://www.prtr-es.es/data/images>
- Aliyu S., Bala M. (2011). Brewer's spent grain: A review of its potentials and applications. *Afr. J. Biotechnol.* 103(3):324-331.
- Alves I. (2008). Análise Experimental do Potencial de Geração de Biogás em Resíduos Sólidos Urbanos. Recife, Brasil: Universidade Federal de Pernambuco
- Angelidaki I, Alves MM, Bolzonella D. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops: a proposed protocol for batch assays. *Water Sci Technol* 59:927– 934. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.040>
- Anuario Cerveceros Sudamérica, (2016). Anuario Cerveceros Sudamérica. Ediciones InterAndina.
- Argentina.gov. (22 de Octubre, 2019). “La generación de energía de fuentes renovables alcanzó a cubrir el 7,9% de la demanda eléctrica durante el mes de Septiembre, alcanzando un nuevo hito para el sector”. Argentina.gov. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/noticias/la-generacion-de-energia-de-fuentes-renovables-alcanzo-cubrir-el-79-de-la-demanda-electrica>
- Bioprocess Control. (2016). AMPTS II &TS II Light Automatic Methane Potential Test System, Operation and Maintenance Manual. Bioprocess Control Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21^o Edition.
- Bochmann, G., Drogg, B., & Fuchs, W. (2015). Anaerobic digestion of thermal pretreated brewers' spent grains. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 34(4), 1092–1096. doi:10.1002/ep.12110
- Briggs, D., Boulton, C., Brookes, P., & Stevens, R. (2004). *Brewing: Science and Practice*. <https://doi.org/10.1201/9780203024195>
- Buffiere, P., Loisel, D., Bernet, N. & Delgenes, J. P. (2006). Towards new indicators for the prediction of solid waste anaerobic digestion properties. *Water Sci. Technol.*53(8), 233 – 241.
- Capurro Navarro, C. (2018). Optimización de la producción de metano a partir de los residuos cerveceros generados en la Cervecería BARRANCO BEER COMPANY. Universidad Científica del Sur. Lima, Perú.

- Cardenas, L., Parra, B., Torres Lozada, P., & Vásquez, C. (2016). Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. *Revista Investigación, Optimización y Nuevos procesos en Ingeniería*.
- Čater, M., Fanedl, L., Malovrh, Š., & Marinšek Logar, R. (2015). Biogas production from brewery spent grain enhanced by bioaugmentation with hydrolytic anaerobic bacteria. *Bioresource Technology*, 186, 261–269. doi:10.1016/j.biortech.2015.03.029
- Celus I., Brijs K., Delcour J.A. (2006). The effects of malting and mashing on barley protein extractability. *J. Cereal Sci.* 44:203-211.
- Chernicharo, C. (2007). *Anaerobic Reactors. Biological Waste Water Treatment Series. Vol 4 pp 28.*
- Colino, E., Civitaresi, H.M., Capuano, A., Quiroga, J.M, Winkelman, B. (2017). Análisis de la estructura y dinámica del complejo cervecero artesanal de Bariloche, Argentina. *Revista Pilquen - Sección Ciencias Sociales*, vol. 20, núm. 2, abril-junio, 2017, pp. 79-91 Universidad Nacional del Comahue Viedma, Argentina
- Colignon, M., Roldán, G. (2018). Automatización de proceso para la elaboración de cerveza artesanal. Universidad Tecnológica Nacional. Paraná, Argentina.
- Comisión Nacional de Energía, 2006. Guía del mecanismo de desarrollo limpio para proyectos del Sector Energía en Chile, Santiago, Chile.: Agencia Alemana de Cooperación Técnica (GTZ). Cooperación Intergubernamental Chile-Alemania (Eds).
- Conduah, J., Kusakana, K., & Hohne, P. A. (2019). Energy Efficiency Improvements in a Microbrewery in South Africa. 2019 Open Innovations (OI).
- Energy Usage, GHG Reduction, Efficiency and Load Management Manual (2015) Recueperado de <https://www.brewersassociation.org/educationalpublications/energy-sustainability-manual/>.
- EPA. (1978). Method 351.1: Nitrogen, Kjeldahl, Total (Colorimetric, Automated Phenate) by Autoanalyzer. USA: Environmental Protection Agency.
- FAO. (2019). Guía Teórico-Practica sobre el Biogás y los Biodigestores. Colección Informes Técnicos N.º 12. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura Buenos Aires, Argentina.
- FAO. (2019). Relevamiento Nacional de Biodigestores. Relevamiento de plantas de biodigestión anaeróbica con aprovechamiento energético térmico y eléctrico. Colección Documentos Técnicos N° 6. Buenos Aires. 80 pp.

- FAO. 2019. Informe técnico-analítico para una estrategia de promoción de la incorporación de biometano a la red de gas natural. Colección Informes Técnicos N.º 2. Buenos Aires. 76 pp
- Fernandez, B., Porrier, P. & Chamy, R. (2001). Effects of inoculum-substrate ratio on the start-up of solid waste anaerobic digesters. *Water Science and Technology*. Vol 44 No 4pp 103-108.
- Fillaudeau, L., Blanpain-Avet, P., & Daufin, G. (2006). Water, wastewater and waste management in brewing industries. *Journal of Cleaner Production*, 14(5), 463–471. doi:10.1016/j.jclepro.2005.01.002
- Fischer W. (1992). Reprocessing or disposal of kieselguhr sludge?. *Brauwelt International*; (1):60e5.
- Funk. (2008). Efficient Use of Energy in the Brewhouse. *Technical Quarterly*. <https://doi.org/10.1094/TQ-45-3-0263>
- Gencheva P, Dimitrov D, Dobrev G, Ivanova V (2012). Hydrolisates from malt spent grain with potencial application in the bioethanol production. *J. BioSci. Biotechnol.* p. 135-141.
- GIZ Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit. (2010). Guía sobre el Biogás: desde la producción hasta el uso. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR). Eschborn, Alemania
- Gopi KK, Sang HK (2013). Effects of chemical compositions and ansiling on the biogas productivity and degradation rates of agricultural and food processing by-products. *Bioresour. Technol.* 142:553-561.
- Groppelli, E. & Giampaoli, O. (2016). Biodigestores, una propuesta sustentable. Universidad del Litoral. Cátedra. Argentina.
- Gupta, M., Abu-Ghannam, N., & Gallagher, E. (2010). Barley for Brewing: Characteristic Changes during Malting, Brewing and Applications of its By-Products. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 9(3), 318-328. doi.org/10.1111/j.1541-4337.2010.00112.x
- Gupta S., Jaiswal A.K, Abu-Ghannam N. (2013). Optimization conditions for the utilization of brewing waste to develop a nutraceutical rich liquid product. *Industrial Crops and Products*. 44:272-282.
- Hashemi M., Razava SH, Shojaosadati SA, Mousavi SM (2011). The potential of brewer's spent grain to improve the production of α -amylase by *Bacillus* sp. KR-8104 in submerged fermentation system. *New Biotechnol.* 28(2):165-172.
- Huige, N.J. (1994). Brewery by-products and effluents. Hardwick, W.A. (Ed.), *Handbook of Brewing*. Marcel Dekker, New York, pp. 501–550.

- INTI. (2017). “Introducción a la elaboración de cerveza artesanal”. Grupo Cerveceros Agroalimentos y disertantes invitados. Buenos Aires, Argentina.
- Ishiwaki, N., Murayama, H., Awayama, H., Kanauchi, O., Sato, T. (2000). Development of high value uses of spent grain by fractionation technology. *MBAA Technical Quarterly* 37, 261–265
- Kaur VI, Saxena PK (2004). Incorporation of brewery waste in supplementary feed and its impact on growth in some carps. *Bioresource Technol.* 91:101-104.
- Keller-Reinspach, H.W. (1989). Emissions during the combustion of spent brewers’ grains. *Brauwelt* 129, 2316–2319.
- Kirin Holdings Company. (2019). Global Beer Consumption by Country in 2018. Disponible en: <https://www.kirinholdings.com/>
- Kopsahelis N., Agouridis N., Bekatorou A., Kanellaki M. (2007). Comparative study of spent grains and delignified spent grains as yeast supports for alcohol production from molasses. *Bioresource Technol.* 98:1440-1447.
- Koss, F.E. (2019). Generación de biogás a partir de subproductos y efluentes líquidos de la industria de la cerveza artesanal mediante digestión anaerobia. Universidad Nacional de San Martín. Argentina.
- Lebo, Stuart E. Jr. (2001). «Lignin». *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology*. John Wiley & Sons, Inc. doi:10.1002/0471238961.12090714120914.a01.pub2.
- Lima U.A. (2010). *Matérias-primas dos Alimentos*. São Paulo: Ed Blucher. 402p.
- Lossie, U. & Pütz, P. (2011). Control orientado de plantas de biogás con la ayuda de FOS/TAC.HACH LANGE.
- Low, K.S., Lee, C.K., Liew, S.C. (2000). Sorption of cadmium and lead from aqueous solutions by spent grain. *Process Biochemistry* 36, 59–64.
- Manual de Biogás (2011). *Manual de Biogás*. Gobierno de Chile, Ministerio de Energía, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, FAO & Global Environment Facility.
- Marqués, M. L. (2001). Modelización de la operación de secado de malta, por aire caliente, en lecho fijo y en capa profunda. 141.
- McCabe, W. L., Smith, Julian C., & Harriot, P. (2007). *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química* (Septima Ed). McGraw-Hill Interamericana.
- Metcalf & Eddy (1991). *Tratamiento y Depuración de las aguas residuales*. Trad. Trillo Monsoriu J., Virto, L., Rullo Aviñó, I. Editorial Labor, S.A.
- Moll M. (1991). *Bieres et coolers*. Paris: Tech & Doc Lavoisier. Cap. III, pp. 15-263.

- Muenchow, K. E. (2019). Determining the Effect of Ultrasonic Pretreatment on Anaerobic Digestion of Barley Bagasse. Disponible en: <https://digitalcommons.wpi.edu/mqp-all/7073>
- Mussatto, S.I., Dragone, G. , Roberto, I.C. (2006). Brewers' spent grain: generation, characteristics .and potential applications. *Journal of Cereal Science* 43, 1–14
- Mussatto S.I., Dragone G., I.C. Roberto, (2004). Brewers' spent grain: generation, characteristics and potential applications, *Journal of Cereal Science* 43 (2006) 1–14 p.
- Mussato SI, Fernandes M, Mancilha IM, Roberto IC (2008). Effects of medium supplementation and pH control on lactic acid production from brewer's spent grain. *Biochem. Eng. J.* 40:437-444.
- Nassary, Eliakira Kisetu, and Emmanuel Richard Nasolwa. "Unravelling disposal benefits derived from underutilized brewing spent products in Tanzania." *Journal of environmental management* 242 (2019): 430-439.
- Nielsen CE. Microfiltration route to recovering beer from tank bottoms. *Brewing & Distilling International* 1989;September: 20e1.
- Niemi P, Martins D, Buchert J, Faulds CB (2013). Pre-hydrolysis with carbohydratases facilitates the release of protein from brewer's spent grain. *Bioresource Technol.* 136:529-534.
- Okamoto, H., Sato, K., Yagi, N., Inoue, M., Yamasaki, S., Ishida, S., Shibata, J. (2002). Development of production process of charcoal bricks from spent grain. *Kagaku Kogaku Ronbunshu* 28, 137–142
- Olajire, A. A. (2012). The brewing industry and environmental challenges. *Journal of Cleaner Production.* doi:10.1016/j.jclepro.2012.03.003
- Oliveira, J. V., Alves, M. M., & Costa, J. C. (2018). Biochemical methane potential of brewery by-products. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20(2), 435–440. doi:10.1007/s10098-017-1482-2
- Panjičko, M., Zupančič, G. D., Fanel, L., Logar, R. M., Tišma, M., & Zelić, B. (2017). Biogas production from brewery spent grain as a mono-substrate in a two-stage process composed of solid-state anaerobic digestion and granular biomass reactors. *Journal of Cleaner Production*, 166, 519-529. doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.197
- Panjičko, M., Zupančič, G. D., & Zelić, B. (2015). Anaerobic Biodegradation of Raw and Pretreated Brewery Spent Grain Utilizing Solid State Anaerobic Digestion. *Acta Chimica Slovenica*, 818-827. doi.org/10.17344/acsi.2015.1534
- Parawira, W., Kudita, I., Nyandoroh, M. G. and Zvauya, R. (2005). A study of industrial anaerobic treatment of opaque beer brewery wastewater in a tropical climate using

a full-scale UASB reactor seeded with activated sludge. *Process Biochemistry*, 40: 593–599

- Pellet Lastra, T., E. & Nougues, E.,J. (2016). Plan de negocios: producción y venta de cerveza artesanal. Trabajo Final de Ingeniería Industrial. Universidad Católica Argentina. Facultad de Ciencias Fisicomatemáticas e Ingeniería, 2016. Disponible en:
<http://bibliotecadigital.uca.edu.ar/repositorio/tesis/plan-produccion-venta-cerveza-artesanal.pdf>
- Perry M, De Villiers G. (2003). Modelling the consumption of water and other utilities. *Brauwelt International*;5(3):286e90.
- Perry, R. H., Green, D. W., & Maloney, J. O. (Eds.). (1997). *Perry's chemical engineers' handbook* (7th ed). New York: McGraw-Hill.
- Priest F.G., Stewart G.G. (2006). *Handbook of Brewing*. 2 ed. Flórida: CRC Press and Taylor & Francis Group, 829p. Purification 3M.
- Raposo F, De La Rubia MA, Fernández-Cegrí V, Borja R. Anaerobic digestion of solid organic substrates in batch mode: An overview relating to methane yields and experimental procedures. *Renew Sust Energ Rev*. 2012;16(1):861-77
- Raposo F, Banks CJ, Siegert I, Heaven S, Borja R. (2006). Influence of inoculum to substrate ratio on the biochemical methane potential of maize in batch tests. *Process Biochem*. 2006;41:1444-50
- Reynolds T.D, & Ritchard, P.A. (1996). *Unit operations and processes in Environmental Engineering*. Second Ed. PWS Publishing Company.
- Reinold, M., R. (1997). *Manual práctico de cervejaria*. First ed. Aden Editora e Comunicacoes Ltda, Sao Paulo. 214 p
- Rodriguez Venady, C., A. (2012). *Producción de Biogás a partir el Bagazo Cervecerero*. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Económicas. Santiago, Chile.
- Rowse, L.E. (2011). *Design of Small Scale Anaerobic Digesters for Application in Rural Developing Countries*. Graduate Theses and Dissertations.
- Russ, W., Mortel, H., Meyer-Pittroff, R. (2005). Application of spent grains to increase porosity in bricks. *Construction and Building Materials* 19, 117–126.
- Sanchez, E. Gastón. (2018). *Estudio de prefactibilidad de generación de biogás a escala industrial, utilizando suero de queso de las PyMEs lácteas en la provincia de Santa Fe*. Universidad Nacional de San Martín. Argentina.
- Simate GS., Cluett J., Iyuke SE., Musapatika ET., Ndlovu S., Walubita LF., Alvarez AE. (2011). The treatment of brewery wastewater for reuse: State of the art. *Desalination*, 273, 235-247.

- Steinmacher N.C., Honna F.A., Gasparetto A.V., Anibal D., Grossmann M.V.E. (2012). Bioconversion of brewer's spent grains by reactive extrusion and their application in bread-making. *Food Sci. Technol.* 46:542-547
- Stredansky M, Conti E (1999). Xanthan production by solid state fermentation. *Process Biochem.* 34:581-587.
- Thiago, R. dos S. M., Pedro, P. M. de M., & Eliana, F. C. S. (2014). Solid wastes in brewing process: A review. *Journal of Brewing and Distilling*, 5(1), 1-9. <https://doi.org/10.5897/JBD2014.0043>
- Tobares, Lorena. (2012). La importancia y el futuro del biogás en la Argentina. *Petrotecnica, Notas Técnicas*. Disponible en: <http://www.petrotecnica.com.ar>
- Treimo J., Aspino S.I., Eusink V.G.H., Horn S.J., (2008). Enzymatic solubilization of proteins in brewer's spent grains. *J. Agric. Food Chem.* 56:5359-5365.
- Uzodinma, E.O., & Ofoefule, A. U. (2008). Effect of abattoir cow liquor waste on biogas yield of some agro-industrial wastes. *Scientific Research and Essays*, 3(10) 473-476.
- Varnero, María T, Carú, Margarita, Galleguillos, Karina, & Achondo, Patricio. (2012). Tecnologías disponibles para la Purificación de Biogás usado en la Generación Eléctrica. *Información tecnológica*, 23(2), 31-40. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642012000200005>
- Wang D., Sakoda A., Suzuki M (2001). Biological efficiency and nutritional value of *Pleurotus ostreatus* cultivated on spent beer grain. *Bioresour. Technol.* 78:293-300
- Wang, D. (2008). Breakthrough Behavior of H₂S Removal with an Iron Oxide Based CG-4 Adsorbent in a Fixed-Bed Reactor; University of Saskatchewan: Saskatoon, SK, Canada.
- Zhang, L., De Schryver, P., De Gussemé, B., De Muynck, W., Boon, N., & Verstraete, W. (2008). Chemical and biological technologies for hydrogen sulfide emission control in sewer systems: A review. *Water Research*, 42(1-2), 1-12. [doi:10.1016/j.watres.2007.07.013](https://doi.org/10.1016/j.watres.2007.07.013)