

PROYECTO FINAL INTEGRADOR

Ingeniería Ambiental

“Estudio de prefactibilidad para la digestión
anaeróbica de WDGS; subproducto de una
biorrefinería”

Autora: Delfina Elena Visciglio

DNI: 41.352.616

N° Legajo: CYT-8455

Resumen Ejecutivo

El presente Proyecto Final Integrador (PFI) aborda el diseño de una planta de digestión anaeróbica para la WDGS (Wet Distillers Grains with Solubles), un subproducto semisólido de la industria del bioetanol a partir de maíz. El objetivo es valorizar la WDGS, generando un beneficio económico para la empresa al transformarla en energía eléctrica para autoconsumo, reduciendo costos de energía y obteniendo beneficios por la producción de energía renovable.

La biorrefinería se encuentra en Villa María, Córdoba, con una producción anual promedio de 145.000 m³ y una producción estimada de 175.000 toneladas de WDGS.

El alcance del proyecto incluye una descripción del proceso productivo del etanol y sus subproductos. Explica cómo se valora la WDGS actualmente, secándola y comercializándola como complemento de alimento para ganado. Incluye una etapa experimental donde se caracteriza el subproducto y se determina el PBM (Potencial de Biometano), definiendo parámetros, materiales, métodos y resultados. Se obtuvieron tres valores de PBM para diferentes relaciones Sustrato/Inóculo (S/I).

Se incluye una introducción a los digestores anaeróbicos, indicando sus componentes, parámetros operativos, consideraciones y configuraciones según el sustrato a digerir. A partir del análisis de los resultados experimentales y la generación de la industria, se seleccionó un sistema de Proceso Anaeróbico de Contacto (PAC) con un reactor CSTR y un sedimentador secundario con reciclaje de lodos. Previo al ingreso del digestor anaeróbico, se diseñó una unidad de pre-fermentación para alcanzar los parámetros requeridos para un buen rendimiento. También se incluye un intercambiador de calor y un sistema para el tratamiento del biogás.

Finalmente, se realizó un análisis financiero contemplando la inversión de la planta, su mantenimiento y el ahorro energético. Los resultados indican que es un proyecto viable, con un retorno de inversión en aproximadamente seis años. Se incluyen planos de ingeniería básica con vistas individuales para cada unidad y vistas en planta.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todas las personas que fueron parte de este importante recorrido.

En primer lugar, a mis abuelos, por su sabiduría y amor incondicional. A mis padres, por su apoyo, su paciencia y por creer en mí. A mis hermanos, por su compañía y aliento.

A mis compañeros y amigos de la carrera, tanto los que estuvieron al inicio como los que me acompañaron hasta el final. Gracias por ser un pilar para la perseverancia, apoyo moral y por ser una constante fuente de inspiración. Su amistad y colaboración fueron esenciales para superar los desafíos y celebrar los logros.

A mi novio, por su amor, comprensión y apoyo incondicional.

Y finalmente, quiero agradecerme por la dedicación, esfuerzo y perseverancia que puse en cada etapa de la carrera. Por no rendirme ante los obstáculos y por seguir adelante con determinación.

A todos ustedes, mi más profundo agradecimiento por hacer posible este gran logro.

Índice

Resumen Ejecutivo	1
Agradecimientos	2
Índice	3
Glosario	7
Introducción	8
Justificación del Proyecto	9
Objetivo del Proyecto	11
CAPÍTULO 1: Contexto y Diagnóstico de la Situación	12
Energía	12
Historia de la Industria del bioetanol	13
Industria del bioetanol en Argentina	16
Producción de biogás en el mundo	18
Producción de biogás en Argentina	20
Córdoba	22
CAPÍTULO 2: Descripción del Proceso	25
Proceso productivo	25
Planta de Bioetanol	25
Materia Prima	26
Etapas del proceso	29
Molienda seca	29
Licuefacción	31
Propagación	32
Sacarificación y Fermentación	33
Destilación	35
Deshidratación	37
Subproductos	37
Dióxido de Carbono	38
Vinaza, WDGS y DDGS	39
Contaminantes	40
Residuos sólidos	40
Efluentes líquidos	40
Emisiones a la atmósfera	41
Servicios	42
Layout: Proceso, efluentes, residuos y emisiones	43
Marco Legal	48
CAPÍTULO 3: Análisis del subproducto	50
Vinaza	50
Burlanda: subproducto	51
Composición	51
Alternativas de tratamiento	53
Análisis de Mercado	54
CAPÍTULO 4 : Determinación del Potencial Bioquímico Metanogénico (PBM)	57

Producción de Biogás	57
Ensayo Potencial de Biometano (PBM)	59
Inóculo	60
Sustrato	61
Condiciones operacionales	62
Condiciones Experimentales	64
Determinación del PBM	67
Materiales y métodos	69
Sustrato	69
Determinación del pH	69
Determinación de sólidos totales (ST) y volátiles (SV)	69
Inóculo	71
Ensayo PBM	71
Pretratamiento de las muestras	71
Inicio del ensayo	72
Resultados	73
Caracterización inicial	73
Ensayo PBM	74
Preliminares	74
Conclusiones del ensayo	79
Capítulo 5: Digestión Anaeróbica	81
Digestion Anaeróbica	81
Hidrólisis	83
Acidogénesis	84
Acetogénesis	84
Metanogénesis	85
Microorganismos	86
Síntesis de Biogás	87
Materia Orgánica	88
Temperatura	89
Tiempo de retención hidráulico y velocidad de carga orgánica	91
pH	92
Inhibidores	94
AGV	94
Nitrógeno	95
H ₂	95
Azufre	96
Cationes y metales pesados	96
Potencial Redox	97
Nutrientes	98
Agitación y Mezclado	98
Aplicaciones del biogás	100
Purificación o acondicionamiento del biogás	102
Biofertilizante	103

Componentes de la digestión anaeróbica	105
Reactor	105
Entrada y salida del efluente	105
Extracción de lodos	106
Sistema de gas	106
Muestreador	106
Sistema de calentamiento del digestor	106
Tipos de digestión anaeróbica	107
Reactor Anaerobio en Secuencia tipo Batch	108
Digestor de Mezcla Completa (CSTR)	109
Proceso anaeróbico de contacto (PAC)	110
CAPÍTULO 6: Memoria Descriptiva	111
CAPÍTULO 7: Memoria de cálculo	116
Datos	116
Parámetros de diseño	116
Pre-Fermentador	117
Dilución	118
Caudales	118
Concentración de Sólidos Totales	118
Temperatura	119
pH	120
Dimensiones	121
Neutralización del pH	122
Agitación	122
Digestor Anaeróbico	123
Agitación	125
Aislación térmica	126
Intercambio de Calor	126
Producción de biogás	135
Tratamiento del biogás	139
Trampa de Humedad	139
Columna de adsorción de H ₂ S	140
Balances	142
Sedimentador Secundario	146
Diseño Hidráulico	151
Línea de sustrato	151
Línea de biogás	153
Pérdidas de Carga	153
Bombas y Equipos de Conducción	154
Capítulo 8: Evaluación de Impacto Ambiental	158
Resumen Ejecutivo	158
Introducción	159
Descripción del proyecto	159
Nombre del proyecto	160

Acceso al sitio	160
Etapas	160
Etapa Constructiva	160
Etapa Operativa	161
Etapa de Cierre	162
Marco Legal	162
Caracterización Ambiental	163
Área de Influencia Directa (AID)	163
Área de influencia Indirecta (AI)	164
Línea de Base del Medio Físico	165
Edafología	165
Precipitaciones	165
Vientos	166
Temperaturas	166
Hidrografía	167
Sismicidad	168
Línea de Base del Medio Biológico	168
Flora	168
Fauna	169
Línea de Base Socioeconómica	169
Población	169
Empleo	170
Servicios	170
Transporte y Accesos	171
Educación	171
Salud	171
Identificación y Valoración de Impactos Ambientales	172
Identificación y valorización de impactos ambientales	172
Etapa de construcción	172
Etapa de operación	172
Etapa de cierre	173
Metodología	174
Matriz de Evaluación de Impacto Ambiental	174
Análisis de Riesgos	175
Identificación de Riesgos	175
Metodología	176
Matriz de Riesgos	176
Plan de Gestión Ambiental	177
Plan de Mitigación	177
Plan de Contingencias	179
Incendios	180
Evacuación Médica	180
Plan de Monitoreo	180
Conclusiones	181

Capítulo 9: Cómputo y Presupuesto	182
Presupuesto	182
Inversión Inicial	182
Operación y Mantenimiento	184
Análisis Financiero	185
Ingresos	186
Rentabilidad	187
Capítulo 10: Conclusiones	190
Capítulo 11: Planos	192
ANEXO	193
Anexo 1: Valoración de Impacto Ambiental	193
Anexo 2: Parámetros de análisis de riesgo	194

Glosario

Biorefinería: Industria que utiliza biomasa en lugar de petróleo para la obtención de diversos productos químicos y combustibles.

Bioetanol: Etanol obtenido por biomasa energética y levadura.

Biogás: Gas renovable que se suele implementar para la generación de energía eléctrica. Compuesto mayormente por CO₂ y CH₄.

Digestor Anaeróbico: Unidad donde se produce el biogás mediante la biodigestión de microorganismos anaeróbicos.

DDGS: Distillers Dried Grains with Solubles, burlanda seca, proteína vegetal utilizada como alimento para el ganado, principalmente vacuno.

WDGS: Wet Distillers Grains with Solubles, burlanda húmeda, producto previo a la DDGS.

Vinaza: Efluente líquido generado en la columna mostera en la etapa de destilación. Se trata para producir WDGS y DDGS.

Introducción

El etanol es una sustancia orgánica incolora, volátil e inflamable, ampliamente conocida y utilizada alrededor del mundo en múltiples industrias. Pero, retrocediendo unos pasos, detrás de esta sustancia tan común, se halla un proceso productivo complejo que involucra desde cultivar la tierra hasta la actividad de pequeños microorganismos. Es durante estas etapas que paralelamente se generan productos secundarios y se emiten efluentes líquidos que son el foco de estudio del presente proyecto.

En los últimos años, Argentina ha evidenciado un crecimiento productivo notable en la producción de etanol, especialmente en las provincias de Córdoba y Santa Fe. Este avance implica que el negocio posee una demanda en el mercado que lo hace rentable y viable. No obstante, este progreso conlleva la generación de un efluente líquido conocido como vinaza. A partir de este subproducto, se obtiene principalmente la burlanda seca (DDGS), cuyo destino más común gracias a su valioso aporte nutricional, es su posterior comercialización como alimento para el ganado.

Desde la vinaza hasta la obtención de la DDGS hay un producto intermedio; la burlanda húmeda (WDGS). En su síntesis se recupera abundante cantidad de agua que es reutilizada en el proceso, disminuyendo los costos de producción. Teniendo en cuenta que la vinaza tiene un alto contenido orgánico, se puede esperar que la WDGS conserve las mismas propiedades de biodegradabilidad. Es por ello que resulta interesante estudiar la capacidad de producción de energía de la burlanda húmeda para proponer una alternativa al destino final actual.

Se puede obtener energía de un sustrato nutritivo mediante la actividad de un consorcio de microorganismos anaeróbicos. La digestión anaeróbica actúa como un proceso productivo donde se descompone el sustrato y se obtiene CO_2 y CH_4 como productos principales. Estos gases componen al biogás, que mediante un proceso de generación distribuida, se transforma en energía eléctrica. Esto no es un proceso sencillo, ya que se deben mantener condiciones específicas, no solo para la supervivencia de los seres microscópicos, sino también para la obtención de un gas con la suficiente calidad para convertirlo en energía utilizable.

En el marco de este proyecto, se desarrollará una exhaustiva investigación del proceso productivo del bioetanol, abarcando la materia prima, los residuos, los efluentes y los servicios de agua y electricidad en una planta ubicada en Villa María, Córdoba. A

continuación, se focalizará en el estudio detallado de la burlanda, evaluando sus características y propiedades fisicoquímicas con el fin de identificar posibles usos y aplicaciones. En particular, se analizará la viabilidad de utilizar un Digestor Anaeróbico para la generación de energía eléctrica, tanto para uso interno como para su comercialización. Además, se realizará un análisis del mercado de la burlanda y el biogás con el objetivo de comprender el contexto económico en el que se desenvuelven.

Con el fin de evaluar la calidad del sustrato en estudio, se realizará en laboratorio un estudio PBM (Potencial Biometano Metanogénico). Este ensayo permitirá no solo determinar el volumen de producción de metano, sino también evaluar diversas condiciones y preparaciones previas que pueden brindar resultados más favorables; información crucial para el diseño.

Con base al estudio mencionado, se procederá a diseñar un Digestor Anaeróbico destinado a los subproductos asociados a la producción de 145.000 m³ de etanol anuales. Además, se llevará a cabo un análisis de costo-beneficio para evaluar la viabilidad y determinar la opción más favorable entre utilizar el Digestor Anaeróbico para el tratamiento de la WDGS, la vinaza o continuar produciendo DDGS. Esta evaluación será crucial a la hora de tomar una decisión para maximizar los beneficios de la industria.

Justificación del Proyecto

La producción de bioetanol implica la conversión de biomasa de cultivos energéticos, como el maíz. El proceso comienza con la molienda de la biomasa para obtener harina, que luego se mezcla con agua para formar mosto. Dado que la energía almacenada en el cultivo se encuentra en forma de almidón, se agregan enzimas para descomponer los carbohidratos complejos en azúcares más simples. A través de la actividad metabólica de una levadura, por lo general *Saccharomyces cerevisiae*, estos azúcares se descomponen y consumen, generando etanol en el proceso.

Una vez obtenido el alcohol, se aplican técnicas separativas de destilación y deshidratación para aislar y concentrar el producto final, alcanzando el grado de pureza requerido por ley, 99,5%. Este proceso se lleva a cabo mediante el uso de cuatro columnas de destilación seguidas por una de deshidratación que permiten obtener el resultado deseado.

Es en la etapa de aislamiento del etanol que se generan efluentes líquidos que a su vez derivan en otros subproductos. Los principales subproductos identificados son:

1. Vinaza: Es un efluente líquido que se obtiene en la etapa de destilación. Por lo general, se somete a un tratamiento adicional para producir burlanda, aprovechando así sus componentes nutricionales.

2. Burlanda: Se compone principalmente de los restos sólidos de la fermentación, incluyendo los granos de maíz que han sido sometidos a un proceso de remojo, calentamiento y triturado. Existen dos tipos de burlanda; WDGS (Wet Distillers Grains with Solubles) y DDGS (Dried Distillers Grains Solubles).

3. CO₂: El gas se libera durante el proceso de fermentación. Es un subproducto gaseoso que puede ser capturado y utilizado en aplicaciones industriales, como por ejemplo en la carbonatación de bebidas.

La burlanda seca (DDGS) se obtiene a partir de la vinaza, la cual es sometida a una serie de procesos. Uno de los procedimientos clave es la evaporación, que permite la recuperación y reutilización de la materia prima, generando beneficios significativos para la producción. En esta instancia, se obtiene WDGS. Posteriormente, se lleva a cabo la operación unitaria de secado, la cual se enfrenta a una demanda energética considerable, representando aproximadamente el 40% del consumo total del proceso. El secado es fundamental para obtener la burlanda seca.

Asimismo, la DDGS es una proteína vegetal que se comercializa regionalmente. No tiene un mercado muy amplio en Argentina y compite con los otros alimentos para el ganado, como la soja, trigo y sorgo. Es por ello, que está abierta la posibilidad de analizar otros destinos para los subproductos que resulten más eficientes económicamente y ambientalmente.

Con el objetivo de maximizar la valorización, se propone llevar a cabo un ensayo de prefactibilidad para analizar el potencial de generación de metano de la WDGS. Este estudio permitirá evaluar la capacidad de descomposición de la burlanda húmeda en un Digestor Anaeróbico y determinar si es factible utilizar esta tecnología para la generación de energía utilizable en el propio proceso productivo o para fines comerciales. De esta manera, se lograría un doble beneficio al aprovechar y valorizar los residuos, al mismo tiempo que se contribuye a la reducción de la huella de carbono y se promueve la economía circular en el sector de la producción de bioetanol.

El presente proyecto está situado en un predio de 30 hectáreas ubicado en Villa María, Córdoba, Argentina. Posee una planta de producción de bioetanol que ocupa 1.5 hectáreas que tiene una capacidad máxima de operación de 380.000 ton/año de maíz

donde se obtiene 145.000 m³/año de etanol anhidro. El volumen anual de subproducto corresponde a 2.030.000 m³/ año de vinaza que se transforma en 70.000 toneladas de granos destilados secos y solubles (DDGS), 175.000 toneladas de granos destilados húmedos y solubles (WDGS) y 33.000 toneladas de gas anhidro.

Objetivo del Proyecto

Al tratarse de un proyecto donde se llevarán a cabo ensayos de laboratorio, la escala comprende dos niveles diferentes. En primera instancia, la escala de laboratorio, donde se desarrollará el estudio del Potencial de Biometano (BMP) y caracterización de las muestras de WDGS. Además, teniendo en cuenta que se desea diseñar y dimensionar un Digestor Anaeróbico adecuado a este caso particular, la escala en esta segunda etapa es diferente. Se deben considerar tanto las capacidades de producción de la planta y los volúmenes de residuos a procesar; en esta etapa la escala es industrial.

El alcance de este proyecto está destinado a los efluentes de la industria del bioetanol y a la burlanda. No incluye los impactos de los cultivos de maíz, sus consumos y el transporte, pero sí los asociados al del proceso productivo y de la burlanda.

El objetivo del proyecto es realizar un estudio de prefactibilidad para la biodigestión de la burlanda húmeda. De esta manera, se puede proponer un tratamiento alternativo y más conveniente para el modo operativo actual de la planta. Conociendo la composición de la burlanda por bibliografía, se propone *a priori* el tratamiento mediante un Digestor Anaeróbico con producción de energía y fertilizantes que podrán ser reutilizados en el proceso productivo. Se desea comparar este proyecto con la producción y comercialización actual de la burlanda seca, teniendo en cuenta el almacenaje y logística que esta implica.

Los objetivos específicos son:

1. Categorizar la burlanda
2. Determinar el potencial de biometano de la WDGS a escala laboratorio.
3. Analizar la factibilidad de implementar un Digestor Anaeróbico para la generación de energía.
4. Definir y dimensionar qué Digestor Anaeróbico utilizar en este caso.
5. Análisis costo beneficio.
6. Realizar un Estudio de Impacto Ambiental del proyecto.

CAPÍTULO 1: Contexto y Diagnóstico de la Situación

Energía

La energía existe en diferentes formas; como la energía mecánica, eléctrica, nuclear, térmica, y más. En todos los casos, es esencial para el desarrollo humano, económico y el bienestar de las sociedades. Participa en todas las actividades de las personas; desde producir alimentos hasta transportar, iluminar, brindar servicios, entre otras muchas cosas. Sin ella, muchas de estas acciones serían imposibles de realizar.

La principal fuente de energía proviene del sol. Es una de las más abundantes e importantes para la vida, ya que es inagotable y está disponible en todo el mundo. Otras fuentes surgen de la superficie terrestre o el interior del planeta. Dividiéndose en lo que se conoce como energías renovables y no renovables. Dentro de la segunda categoría se hallan los combustibles fósiles, comúnmente conocidos como el petróleo, carbón mineral y gas natural. Este tipo de energía, además de ser la más utilizada, es de uso limitado, excesivo y no sostenible.

El consumo excesivo puede tener consecuencias para la salud humana y nuestro entorno. Las emisiones masivas de gases como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorcarbono (HFC), perfluorocarbonos (PFCs) y hexafluoruro de azufre (SF_6) son tóxicos y ocasionan cambios en el balance radiativo de la tierra, que se traduce a calentamiento global y consecuentemente, al cambio climático. Desde un enfoque más social, existen conflictos económicos y políticos por las fluctuaciones de los precios internacionales de los combustibles y entre los países vendedores y compradores.¹

Como resultado, surge la necesidad de buscar fuentes alternativas de energía y disminuir la dependencia de los combustibles fósiles. Desde este enfoque, emergen las energías renovables dando lugar al desarrollo científico y tecnológico para aprovechar los recursos de manera sustentable. Dentro de este grupo se presenta como una de las alternativas la producción de biocombustibles líquidos mediante una biorefinería.

Los biocombustibles líquidos son considerados de origen renovable. Se producen a partir de materia orgánica, como cultivos agrícolas, residuos orgánicos, biomasa y/o algas

¹ Castro-Martínez, C., Beltrán-Arredondo, L. I., & Ortiz-Ojeda, J. C. (2012). Producción de biodiesel y bioetanol: ¿Una alternativa sustentable a la crisis energética?

en lugar de petróleo. Se utilizan como una alternativa a los combustibles fósiles tradicionales, como la gasolina y el diésel. Los biocombustibles más comunes son el bioetanol y el biodiésel, los cuales se utilizan para la movilidad terrestre, aérea y marítima; aunque también pueden emplearse para la generación de energía eléctrica.²

Para comprender la dimensión de los consumos energéticos, en la *figura 1.1* se muestran en detalle las diferentes fuentes de energía utilizadas con el pasar de los años. Según los datos actualizados en noviembre del 2022, el consumo energético alrededor del mundo para finales del año 2020 fue de aproximadamente un 64.9 % de combustibles fósiles (gas, carbón y aceite) mientras que apenas un 11.5% provino de fuentes renovables y residuos.

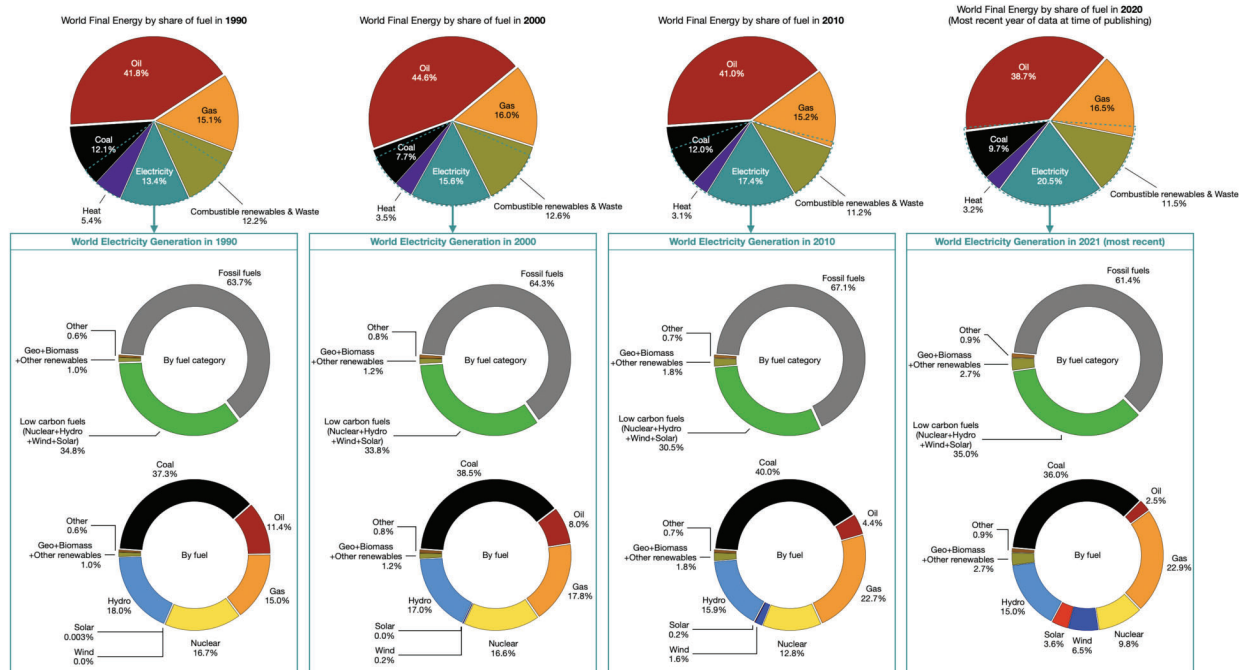


Figura 1.1 Gráficos de torta con el consumo energético mundial desde la década del 1990 hasta el 2020.

Fuente³

Historia de la Industria del bioetanol

El bioetanol, conocido también como etanol o alcohol etílico, es un líquido transparente e incoloro que presenta características como biodegradabilidad y baja toxicidad. Su amplio rango de aplicaciones se extiende a diversas industrias. En el sector

² World Energy Data (WOD), 2022

³ World Energy Data (WED), Noviembre de 2022.

farmacéutico, se utiliza como disolvente, anticongelante y desinfectante. En la industria química, es empleado para la obtención de otros compuestos. Asimismo, desempeña múltiples roles en la industria alimentaria, desde bebidas alcohólicas hasta su uso en cosméticos y como sanitizante en nuestra vida cotidiana.⁴

La principal utilidad del bioetanol radica en su uso como combustible o aditivo para la gasolina. Esta aplicación presenta beneficios ambientales, ya que al quemarse, el dióxido de carbono liberado retorna a las plantas a través de la fotosíntesis, las cuales a su vez serán utilizadas nuevamente para producir bioetanol. Esto implica un equilibrio entre las emisiones y el crecimiento de la materia prima. Además, la oxidación de los hidrocarburos de la gasolina con etanol es más completa, lo que contribuye a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero.⁵

Si bien la síntesis de bioetanol a partir de la fermentación natural de cultivos y granos se ha llevado a cabo durante varios siglos, su producción a nivel industrial tuvo sus inicios en la década de 1920. En ese momento, los altos precios del petróleo y los riesgos ambientales asociados al plomo presente en la gasolina motivaron la búsqueda de combustibles alternativos. El bioetanol comenzó a ganar relevancia, especialmente durante la Segunda Guerra Mundial, cuando la demanda se incrementó aún más debido a la escasez de combustible.⁶

En la década de los 90, Brasil se posicionó como el principal productor de bioetanol a nivel mundial. Durante este período, también se observó un aumento significativo en la producción de bioetanol en Europa. Según se muestra en la *figura 1.2*, a partir de la década del 2000, la producción experimentó un nuevo crecimiento, siendo el continente americano el principal productor.⁷

El aumento en la producción de bioetanol se ha visto impulsado en gran parte por los incentivos y políticas promovidos en todo el mundo. En Brasil, por ejemplo, se requiere el uso de mezclas que contengan un 25% de bioetanol, además de proporcionar beneficios fiscales preferenciales. En Estados Unidos, aproximadamente el 20% de las cosechas de maíz se destinan a la producción de biocombustibles debido a los incentivos económicos y

⁴ Gelsumino, S., López de Armentia, L., & Tous, L. Diseño de una planta de producción de bioetanol a partir de maíz.

⁵ Castro-Martínez, C., Beltrán-Arredondo, L. I., & Ortiz-Ojeda, J. C. (2012). Producción de biodiesel y bioetanol: ¿Una alternativa sustentable a la crisis energética?. *Ra Ximhai*, 8(3), 93-100.

⁶ Niphadkar, S., Bagade, P., & Ahmed, S. (2017). Bioethanol production: insight into past, present and future perspectives.

⁷ Valderrama Mendes, D.D. (2012). Mercado internacional de biocombustibles. Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Madrid.

los requisitos obligatorios. Fuera de América, la Unión Europea estableció un objetivo del 2% de producción de biocombustibles en 2005, el cual se incrementó al 5.75% para el año 2010. Estas medidas y regulaciones han fomentado el crecimiento y la expansión de la industria del bioetanol a nivel mundial.⁷

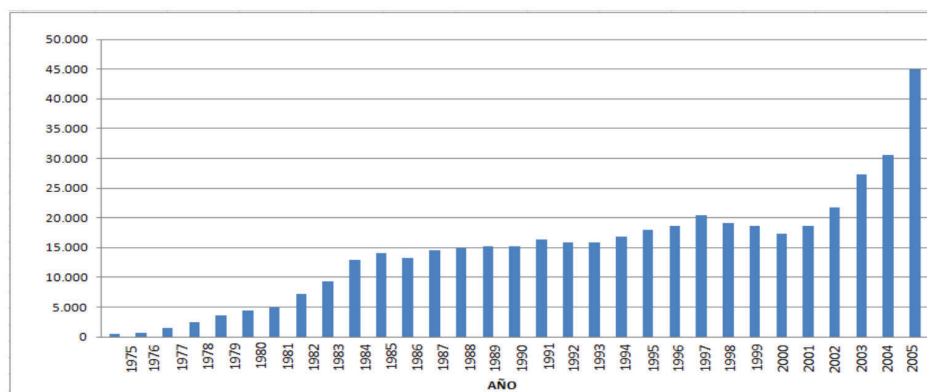


Figura 1.2. Generación de bioetanol desde 1975 hasta el 2005..

Fuente⁷

A medida que ha transcurrido el tiempo, se han logrado mejoras significativas en los métodos de producción y los enfoques de estudio del etanol. Esto ha dado lugar al desarrollo de nuevas formas de producir etanol a partir de diversas fuentes de biomasa. Inicialmente, se utilizaba la llamada "primera generación", que se basa en cultivos que también son utilizados como alimentos básicos, como el maíz. Posteriormente, surgió la "segunda generación", que involucra el uso de biomasa vegetal no alimentaria, como residuos agrícolas y desechos forestales. Más recientemente, ha surgido la "tercera generación", que se centra en el uso de algas marinas con alto contenido de carbono. La *tabla 1.1* presenta una comparación de los volúmenes de bioetanol producidos por hectárea de biomasa, donde se puede observar que dentro de la lista, la materia prima cuenta con contenidos relevantes de carbono, azúcares, lignina, celulosa y hemicelulosa en la mayoría de los componentes enumerados.⁸

Tabla 1.1. Principales fuentes de biomasa para la producción de bioetanol y su rendimiento.

Materia Prima	Rendimiento (L/ha)
Caña de azúcar	5.882
Maiz	3.460 - 4.020

⁸ Niphadkar, S., Bagade, P., & Ahmed, S. (2017). Bioethanol production: insight into past, present and future perspectives.

Rastrojo de maíz	1.050 - 1.400
Residuos forestales	3.000 - 5.000
Aserrín	1.500 - 3.000
Arroz paddy	2.250
Trigo	2.590
Mandioca	3.310
Remolacha	5.000
Sorgo dulce	3.050 - 4.070
Algas	46.760 - 140.290

Fuente: Elaboración propia basada en ⁸.

En la actualidad, el maíz es la principal fuente de biomasa utilizada en la producción de etanol. Sin embargo, su uso plantea desafíos socioeconómicos debido a que también es un alimento básico. Esto ha generado un aumento en el precio del maíz a nivel global, lo cual es un problema común asociado a la producción de “primera generación”. Además, el uso de pesticidas y fertilizantes en los cultivos de maíz aumenta los costos y puede resultar en la contaminación del suelo y el agua, por lo que es necesario implementar una adecuada gestión para prevenir riesgos ambientales.⁹

Por otro lado, el crecimiento del maíz es relativamente lento y su rendimiento no es óptimo en comparación con otras materias primas disponibles. Sin embargo, tanto en Estados Unidos como en Brasil, el maíz y la caña de azúcar son ampliamente utilizados debido a que estos países cuentan con mercados maduros y tecnologías bien establecidas en la producción de etanol. Además, la demanda de energía y los objetivos de reducción de dependencia del petróleo han impulsado el desarrollo de este proceso, lo que ha llevado a una comprensión y aplicabilidad relativamente sencillas.⁹

Industria del bioetanol en Argentina

La historia del bioetanol en Argentina ha sido impulsada principalmente por políticas estatales. En la década de 1970, se registraron algunos intentos de síntesis de bioetanol utilizando caña de azúcar como materia prima, en el marco del Programa Alconafta vigente

⁹ Niphadkar, S., Bagade, P., & Ahmed, S. (2017). Bioethanol production: insight into past, present and future perspectives.

en ese momento. Sin embargo, el momento clave para el desarrollo del bioetanol en el país ocurrió en 2006, cuando se promulgó la Ley 26.093 de biocombustibles. Esta ley estableció un régimen de regulación y promoción de la producción y uso sustentable de biocombustibles, proporcionando un marco legal para su desarrollo. Además, la ley estableció un porcentaje obligatorio de incorporación de biocombustibles en los combustibles convencionales, impulsando aún más la producción y el uso de bioetanol en Argentina.

La producción de bioetanol a partir de caña de azúcar tuvo un fuerte inicio en 2008, mientras que la producción a partir de maíz comenzó en 2012 y experimentó un crecimiento constante hasta superar a la primera en 2014. La *figura 1.3* ilustra un esquema que muestra cómo aumenta la síntesis de bioetanol según la fuente de biomasa utilizada.¹⁰

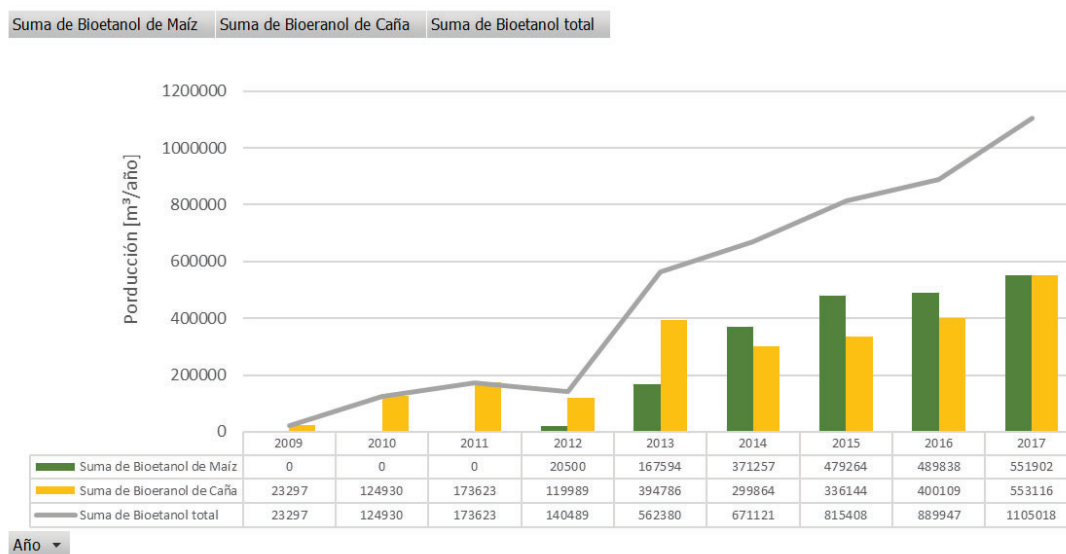


Figura 1.3. Generación de bioetanol a base de caña y maíz en Argentina.

Elaboración Propia¹¹

En la actualidad, la producción de bioetanol en Argentina se lleva a cabo utilizando maleza, caña de azúcar y cereales, principalmente maíz. Existe un requisito obligatorio de mezclar un 12% de biocombustibles, siendo el 6% proveniente de maíz y el 6% restante de caña de azúcar. La capacidad instalada en el año 2018 era de 950.000 toneladas por año, y la producción total para esa fecha alcanzó las 880.000 toneladas por año, de las cuales 417.000 provinieron de la caña de azúcar y las 463.000 restantes del maíz. En el país

¹⁰ El Bioetanol en base a maíz y su inserción en cadenas de valor en la Provincia de Córdoba, Argentina (2020) Revista do Desenvolvimento Regional, vol. 25, núm. 3, pp. 1302-1321, Universidade de Santa Cruz do Sul.

¹¹ INDEC.

existen 19 plantas productoras de bioetanol, con un 28% basadas en cereales y un 72% basadas en caña de azúcar. Estas implementaciones han permitido un ahorro del 64% en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).¹²

En Argentina, la producción de bioetanol se concentra principalmente en las provincias del noroeste del país (NOA) utilizando la caña como materia prima y en Córdoba y Santa Fe mediante maíz. La provincia de Córdoba se destaca en particular, ya que alberga tres de las cinco plantas de producción de bioetanol basadas en maíz en el país. Estas plantas son ACABIO Cooperativa Limitada en Villa María, Bioetanol Río Cuarto S.A. en Río Cuarto y Promaiz en Alejandro Roca. Estas instalaciones desempeñan un papel crucial en la producción de bioetanol en Argentina.

Según la ley de biocombustibles en Argentina, el bioetanol producido se destina principalmente al mercado interno. Los compradores del bioetanol suelen recoger el combustible directamente en las plantas de producción, lo que les permite ahorrar costos de transporte. Entre los principales compradores se encuentra YPF S.A., que adquiere el 56% del bioetanol producido. Le sigue SHELL Argentina C.A.P.S.A. con el 21%, Pan American Energy LLC con el 16%, y el 7% restante corresponde a otros compradores. Estas empresas desempeñan un papel importante en la adquisición y distribución de bioetanol en Argentina.

El proceso de producción de bioetanol genera diversos subproductos. Uno de los principales es la burlanda, que se utiliza como proteína vegetal en la industria ganadera. El aceite crudo de maíz se destina a la generación de otros biocombustibles y también se comercializa como aceite reciclado. Además, se producen emisiones de CO₂ que pueden ser capturadas y vendidas a otras industrias. Por último, otro subproducto relevante es el biogás, obtenido a través de la digestión anaeróbica del silaje de maíz y otros desechos de la industria ganadera. Estos subproductos son importantes en términos de aprovechamiento y valorización de los residuos generados durante el proceso de producción de bioetanol.¹³

Producción de biogás en el mundo

La digestión anaeróbica es un proceso en el cual se introduce materia orgánica en un tanque para que sea descompuesta por microorganismos, conocidos como Digestores

¹² Ministerio de Economía Argentina. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca (2018).

¹³ El Bioetanol en base a maíz y su inserción en cadenas de valor en la Provincia de Córdoba, Argentina (2020) Revista do Desenvolvimento Regional, vol. 25, núm. 3, pp. 1302-1321, Universidade de Santa Cruz do Sul.

Anaeróbicos. Durante este proceso natural, se produce biogás como uno de los productos principales. El biogás está compuesto principalmente por dióxido de carbono (CO_2) y metano (CH_4), aunque también contiene trazas de otros gases como sulfuro de hidrógeno (H_2S), hidrógeno (H_2), nitrógeno (N_2), agua (H_2O), entre otros. Este biogás puede ser aprovechado como fuente de energía renovable y tiene aplicaciones en la generación de electricidad y calor, así como en la producción de biocombustibles.

El primer digestor anaeróbico fue construido en 1897 en India con el propósito de gestionar los residuos domésticos. En ese momento, la generación de biogás se utilizaba para la iluminación, mientras que el lodo resultante se aprovechaba como fertilizante. A partir de este evento, se difundió la idea y se perfeccionaron los diseños de los digestores en diferentes partes del mundo. Durante la Segunda Guerra Mundial, debido a la escasez de combustibles y energía, se construyeron plantas de metano en áreas rurales de varios países europeos. Sin embargo, una vez que los precios de los combustibles volvieron a ser más económicos, la investigación y desarrollo en este campo perdieron impulso.¹⁴

Después de la crisis del petróleo en la década de 1970 y el creciente reconocimiento de los impactos ambientales, se renovó el interés en la investigación y el desarrollo de fuentes de energía alternativas. En Europa, en particular, se han establecido constantemente objetivos para aumentar el uso de energías renovables, lo que ha llevado a un mayor consumo de biogás. A nivel global, las posibles fuentes de biogás provienen en un 75% de cultivos agrícolas y sus subproductos, así como del estiércol, el 17% de residuos orgánicos industriales y el 8% de efluentes domiciliarios. Estas fuentes ofrecen un gran potencial para la producción de biogás y la generación de energía renovable.¹⁵

En la actualidad, el biogás se ha convertido en una fuente de energía renovable ampliamente utilizada, capaz de satisfacer las demandas de calor, electricidad y combustibles. Si bien su adopción se ha extendido en todo el mundo, países como Estados Unidos, Brasil, China y Alemania se destacan como los principales productores de biogás, representando el 48% de la producción global. Estos países han implementado políticas y programas para fomentar el uso del biogás y han desarrollado una infraestructura sólida para su producción y utilización. Además, han reconocido los beneficios económicos y

¹⁴ Anaerobic Digestion - Making Biogas - Making Energy: The Earthscan Expert Guide (Libro).

¹⁵ R. L. Grandoa , A. M. de Souza Antunea, F. V. da Fonseca , A. Sánchezc , R. Barrenac , X. Font. Technology overview of biogas production in anaerobic digestion plants: A European evaluation of research and development

ambientales que ofrece el biogás como una alternativa sostenible a los combustibles fósiles.¹⁶

Producción de biogás en Argentina

En Argentina, el año 2004 marcó un aumento significativo en el desafío del suministro energético del país. Uno de los principales factores fue la alta dependencia de los hidrocarburos convencionales, los cuales comenzaron a escasear. Esta creciente demanda energética se intensificó hasta convertirse en un problema considerable en 2010, generando un déficit en la balanza comercial del sector y salida de divisas.

Como respuesta a esta situación, se abrió paso a la exploración de nuevas tecnologías y fuentes de energía, entre las cuales el biogás representó una opción prometedora. Ya que ofrece una alternativa sostenible y renovable para cubrir parte de la demanda energética, al aprovechar la descomposición de la materia orgánica y convertirla en una fuente de energía utilizable. Esta apertura hacia la innovación fue impulsada por la necesidad de diversificar la matriz energética del país, reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles y promoviendo la sostenibilidad ambiental.

El biogás también está regulado por la Ley 26.093 mencionada previamente. Según los estudios más recientes realizados por el INTI, en Argentina hay 62 plantas de Digestión Anaeróbica. De ellas, el 14% tiene una capacidad mayor a 100 m³, el 38% son de tamaño mediano y el 48% restante son plantas pequeñas, con una capacidad menor a 100 m³. Sin embargo, se estima que existen aproximadamente 105 instalaciones, pero solo se disponen de datos relevados de 62 de ellas. La mayoría de estas plantas se encuentran distribuidas en Santa Fe, seguidas por Buenos Aires y Córdoba.

Los usos del biogás en Argentina son diversos. Los más comunes incluyen el tratamiento de efluentes, la generación de energía y fines educativos, entre otros. Según los datos relevados, más del 80% de las plantas utilizan los Digestores Anaeróbicos para el tratamiento de efluentes, pero no generan biogás. En cuanto a los sustratos utilizados, los residuos industriales son los más empleados, seguidos por los residuos urbanos y la ganadería. En menor medida, se utilizan residuos agrícolas y biomasa virgen.

¹⁶ Biogas, renewable energy for the development of pig farms in the state of Chiapas José Apolonio Venegas Venegas Deb Raj Aryal² René Pinto Ruíz

En cuanto a la utilización del biogás generado, el 42,6% no se utiliza, mientras que el 44,3% se utiliza como energía térmica. El resto se divide entre la generación de energía eléctrica y térmica.¹⁷ La *figura 1.4* presenta información proporcionada por el gobierno argentino sobre la producción de biogás en el país.

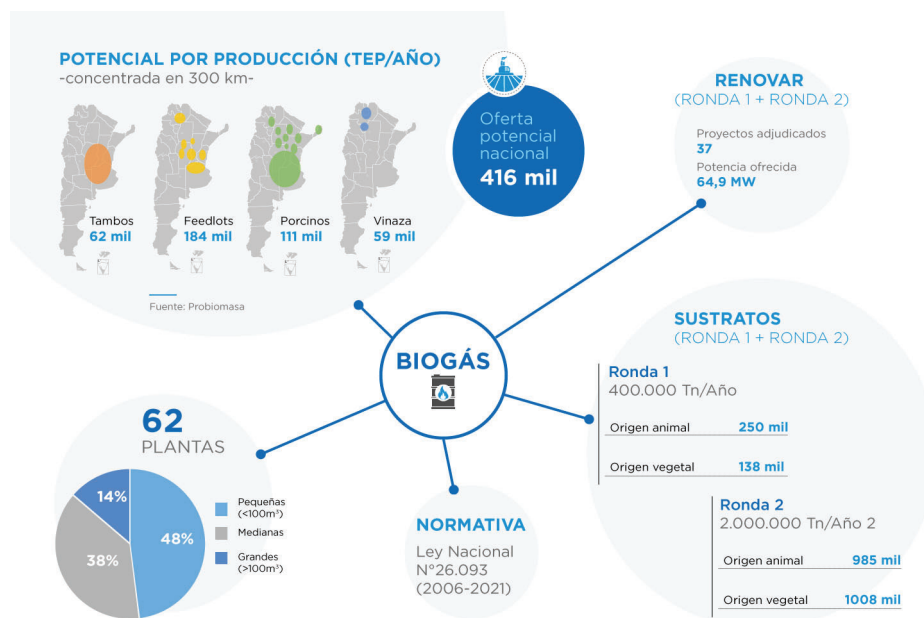


Figura 1.4. producción de biogás en Argentina.

Fuente ¹⁸

Aunque existen varias plantas de Digestión Anaeróbica en el país, la producción de biogás aún no alcanza niveles significativos. Sin embargo, para cambiar esto, el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible está llevando a cabo el proyecto para Modelos de negocios sostenibles para la producción de biogás a partir de residuos sólidos urbanos (RSU) en colaboración con el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible.

Durante el año 2020, se hicieron avances en el marco regulatorio y se promovió la adquisición y compra de Digestores Anaeróbicos, brindando financiamiento para facilitar la incorporación de especialistas y asegurar que los proyectos cumplan con las condiciones necesarias para su correcto funcionamiento. La *figura 1.5* muestra la producción de biogás

¹⁷ INTI

¹⁸ Recuperado de: [Programa Biogás | Argentina.gob.ar](https://programa.biogas.gob.ar)

en el país desde el año 2012 hasta marzo de 2023. En 2022, Argentina generó 418 GWh de biogás, lo que representa un aumento del 11% en comparación con el año 2021.¹⁹



Figura 1.5. Generación de Biogás en Argentina en GWh.

Fuente²⁰

Córdoba

Córdoba es una de las 23 provincias de la República Argentina y se ubica en el centro del país. Limita con las provincias de Santa Fe, Buenos Aires, Santiago del Estero, San Luis, La Rioja y La Pampa. Es una de las provincias más pobladas después de Buenos Aires. Está subdividida en 26 departamentos y se estima que su población alcance los 2,011,595 habitantes para el año 2025, según datos del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC). En la figura 4 se muestra la ubicación geográfica de la provincia de Córdoba.

En la provincia de Córdoba, al igual que en muchas otras partes del mundo, se experimenta un clima con estaciones distintas. La temporada calurosa abarca aproximadamente 4 meses, desde Noviembre hasta Marzo. Durante este periodo, las temperaturas diarias promedio son alrededor de 27°C, con oscilaciones dentro del rango de 19-30°C. Por otro lado, la temporada fresca comienza en Mayo y tiene una duración de casi 3 meses, finalizando en Agosto. Durante este periodo, la temperatura promedio es de 20°C, con variaciones que van desde los 5°C hasta los 18°C.²¹

¹⁹ Recuperado de: [Programa Biogás | Argentina.gob.ar](https://programabiogas.gob.ar/)

²⁰ Recuperado de: [El escenario actual del biogás en Córdoba | BCCBA](https://www.bccba.com.ar/)

²¹ Weather Sparks

En cuanto a su topografía, la provincia de Córdoba se caracteriza por tener dos áreas diferenciadas. Por un lado, se encuentran las llanuras, donde el terreno es relativamente plano. Mientras que por otro lado, están las sierras pampeanas, que corresponden a una cadena montañosa de menor altura en comparación con otras sierras del país. Estas características topográficas contribuyen a la diversidad paisajística de la provincia.²²

Las características climáticas y topográficas mencionadas anteriormente le brindan a Córdoba una gran oportunidad de desarrollo en los sectores de agricultura y ganadería. La provincia es reconocida como un importante productor de bienes primarios, destacándose en la producción de cultivos como soja, maíz, trigo y maní. Además, se llevan a cabo actividades de manufactura agrícola para la producción de derivados de soja, productos lácteos y golosinas. Estos sectores desempeñan un papel fundamental en la economía cordobesa, generando empleo y contribuyendo al crecimiento de la provincia.²¹

En cuanto al bioetanol, Córdoba se destaca como la principal productora en Argentina, siendo responsable del 70% del biocombustible a base de maíz que se consume en el país.²³ La provincia cuenta con las mayores y más importantes plantas productoras de bioetanol, consolidando su posición en el mercado.

La ganadería es otra actividad destacada en Córdoba, especialmente en la región serrana y en la llanura oriental. La cría de ganado vacuno es predominante, seguida en menor medida por la cría de porcinos, ovinos y carpinchos. Córdoba representa aproximadamente el 15% de la producción ganadera vacuna en Argentina, y también lidera en la producción porcina.²⁴

En cuanto a la producción de biogás, Córdoba se posiciona como la segunda provincia con mayor producción en el país. Actualmente, la mayor productora de biogás es Buenos Aires con un 46% de participación nacional en el año 2022. La provincia que más aporta después de Córdoba es Santa Fe. Su aporte es menor pero similar, siendo un 18% en 2022. Según los datos de la Bolsa de Córdoba, se puede observar en la *figura 1.6* el crecimiento constante en la generación de biogás hasta marzo de 2023. En lo que va del año, Córdoba ha alcanzado casi el 25% de la producción nacional de biogás, demostrando su creciente importancia en este sector.

²² Recuperado de: [Economía - Gobierno de Córdoba \(cba.gov.ar\)](http://economia.gob.ar)

²³ Recuperado de: [Web de Noticias - Gobierno de Córdoba \(cba.gov.ar\)](http://webde-noticias.gob.ar)

²⁴ Recuperado de: [Economía en la provincia de Córdoba \(todo-argentina.net\)](http://economia.todo-argentina.net)

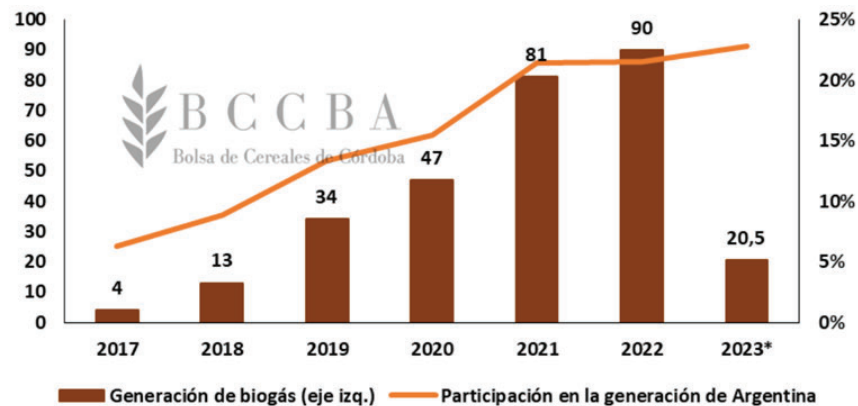


Figura 1.6. Generación de Biogás de la provincia de Córdoba y su participación a nivel nacional en GWh.

Fuente²⁵

Por otra parte, en la provincia de Córdoba se encuentran establecidas 19 empresas dedicadas a la producción de biogás, aunque no todas están operativas en la actualidad. De estas plantas, el 32% se ubican dentro del departamento de Río Cuarto. Los sustratos utilizados en la producción de biogás provienen de una variedad de fuentes, como efluentes porcinos, subproductos industriales y agrícolas, silaje de maíz, estiércol, residuos de frigoríficos, vinaza, entre otros.

Una gran ventaja es que muchas de estas empresas están conectadas al Sistema Argentino de Interconexión (SAI), lo que les brinda la posibilidad de transportar la energía generada a prácticamente todo el país. Esto les permite comercializar la energía producida en el mercado y también utilizar una parte para el autoconsumo.

En la *figura 1.7*, se muestran las principales actividades que tienen las plantas de biogás en Córdoba. Del gráfico se puede decir que más de la mitad de las plantas cordobesas tienen como fin generar energía eléctrica. Son muy bajos los porcentajes que utilizan el biogás para el tratamiento de efluentes o residuos de sus actividades.

²⁵ Recuperado de: [El escenario actual del biogás en Córdoba | BCCBA](#)

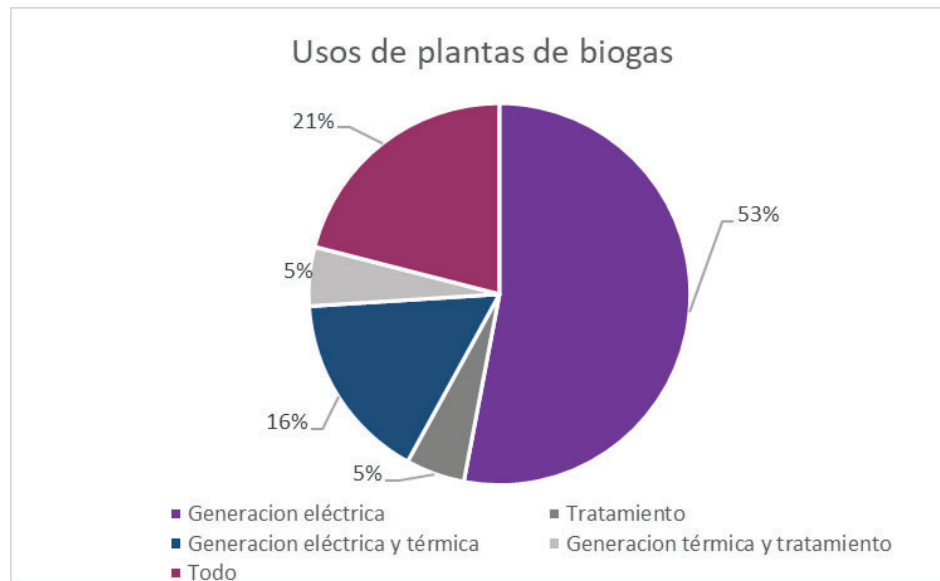


Figura 1.7. Actividad de las plantas de biogás en Córdoba.

Fuente: Elaboración propia basado en²⁴.

Actualmente, con la promoción de los biocombustibles el negocio del bioetanol demuestra ser altamente rentable. Teniendo en cuenta, además, los objetivos de desarrollo sustentable a nivel global (ODS), el biogás demuestra ser un futuro prometedor en Córdoba. Esta observación resulta interesante, ya que ambas industrias están relacionadas. Indicando que el crecimiento de una puede favorecer a la otra.

CAPÍTULO 2: Descripción del Proceso

Proceso productivo

Planta de Bioetanol

El presente proyecto se basa en una planta de bioetanol a base de maíz situada sobre la Autopista N° 9 Rosario-Córdoba, Municipio de Villa María, departamento General San Martín, Córdoba. Posee una superficie total de 30 ha en las cuales el terreno edilicio está cubierto por un total de 1.5 ha. En la *figura 2.1* se observa la ubicación de la planta.

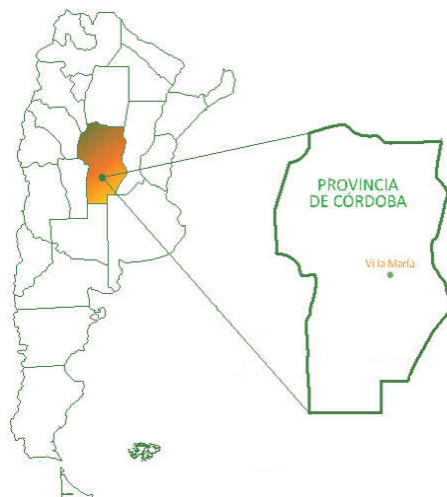


Figura 2.1. Representación de la ubicación de la planta en Villa María, Córdoba, Argentina.

Fuente²⁶

La capacidad máxima de operación demanda 380.000 ton/año de maíz donde se obtiene un caudal de producción diaria de la planta de 450 m³/d de etanol anhidro; con un caudal medio de 145.000 m³/año. Se estima un volumen de 2.030.000 m³/ año de vinaza para la producción de 70.000 toneladas de granos destilados secos y solubles (DDGS), 175.000 toneladas de granos destilados húmedos y solubles (WDGS) y 33.000 toneladas de gas anhidro. En los apartados a continuación, se describen las materias primas y su cantidad empleadas en el proceso, la descripción de cada una de las etapas y los subproductos. La planta opera de forma continua 365 días al año.

Materia Prima

La principal materia prima utilizada en el proceso es el maíz, que se considera como la biomasa energética. Normalmente, el maíz tiene un contenido de humedad del 15%, y el peso seco restante se compone de aproximadamente un 66% de almidón, un 3,9% de aceites y alrededor de un 29% de gluten con diferentes proporciones de proteínas. Sin embargo, la composición del maíz puede variar según la especie. A su vez, la elección del tipo de maíz a utilizar depende del clima y el suelo en el que se cultiva, lo que puede variar de un año a otro. En la *tabla 2.1* se puede observar que, aunque existen diferentes especies de maíz, todas contienen un alto porcentaje de almidón, que es el compuesto necesario para la producción del alcohol.²⁷

²⁶ Modificado de: [Productos | Promaiz](#)

²⁷ Gelsumino, S., López de Armentia, L., & Tous, L. Diseño de una planta de producción de bioetanol a partir de maíz.

Tabla 2.1. Tipos de maíz y porcentaje de almidón presente.²⁶

Especie de maíz	Peso seco	% Almidón
INTA2012	4,98	66
474V13	5,02	72
B67049	5,00	68
SY138	5,05	70
DMI820	5,00	73

El maíz tiene un mejor desarrollo en suelos con textura franca, franco-arcillosa y franco-limosa, con un pH cercano a la neutralidad $\pm 0,5$. En cuanto al proceso fisiológico del maíz, hay rangos de temperatura mínima, óptima y máxima dependiendo de la etapa de desarrollo: germinación, crecimiento y floración. En general, el rango óptimo para estas tres etapas se sitúa entre los 20-30°C, mientras que las temperaturas mínimas soportables son de 10, 15 y 20 °C, y las máximas son de 40, 40 y 30°C, respectivamente.²⁸

En la zona de Villa María, el suelo se clasifica como franco-limoso y contiene una cantidad significativa de material orgánico. Las temperaturas medias anuales en esta área rondan los 16,5 °C, alcanzando los 23,9°C en enero (mes más cálido) y 9,4°C en julio (mes más frío).²⁹ Estas condiciones proporcionan un entorno propicio para el adecuado desarrollo del maíz durante gran parte del año.

Otra de las materias primas utilizadas es la levadura. Son organismos eucariotas que abarcan una amplia variedad de microorganismos unicelulares con diferentes tamaños, formas y colores. Son hongos microscópicos que tienen la capacidad de llevar a cabo la fermentación alcohólica mediante la descomposición de la glucosa. Entre las especies de levaduras, la *Saccharomyces cerevisiae* es una de las más estudiadas e implementadas en estos procesos debido a su capacidad para tolerar amplios rangos de pH, su bajo costo y sus buenos rendimientos.

El crecimiento de la levadura tiene un impacto directo en la producción de etanol. Diversos factores influyen en su crecimiento, como la temperatura, el pH, la concentración de etanol, la presencia de bacterias y el estrés osmótico causado por la cantidad de glucosa

²⁸ "Caracterización agro-morfológica del maíz (zea mays l.) De la localidad san José de Chazo." Edison fernando guacho abarca, tesis, facultad de recursos naturales escuela de ingeniería agronómica riobamba – ecuador 2014

²⁹ Recuperado de: [Carta de Suelos - Hoja 3363-9 VILLA MARÍA \(cba.gov.ar\)](http://cba.gov.ar/hoja/3363-9-VILLA-MARIA)

en la solución. En promedio, la levadura muestra un rango óptimo de temperatura alrededor de los 35°C, ya que temperaturas más altas representan un riesgo para su supervivencia. El rango de pH recomendado se encuentra entre 4 y 5,5, ya que fuera de este rango el crecimiento de la levadura es lento o la producción de etanol disminuye. En cuanto a la concentración de etanol, niveles superiores al 20% inhiben la actividad de la levadura. Se aconseja una concentración de azúcar de aproximadamente 150 g/L, ya que se ha demostrado que es el punto óptimo para la generación de etanol.³⁰

Además de las condiciones necesarias para la supervivencia de la levadura, existen otros factores que influyen en la síntesis del alcohol. En primer lugar, es importante alcanzar una concentración deseada de aproximadamente 1.107 células/ml para lograr un rendimiento óptimo en la producción de bioetanol. Los tiempos de fermentación generalmente oscilan entre 24 y 72 horas. En cuanto a las velocidades de agitación durante el proceso, se recomienda mantenerlas entre 120 y 200 rpm. Por último, es crucial agregar nutrientes, como nitrógeno en forma de amoníaco o urea, ya que son esenciales para el desarrollo adecuado de las levaduras. Estos nutrientes garantizan un entorno propicio para la fermentación y contribuyen a un mejor rendimiento en la producción de alcohol.²⁹

A continuación se presenta en la *tabla 2.2* el listado de las materias primas necesarias y su consumo por litro de bioetanol producido en el proceso de producción:

Tabla 2.2. Consumo por litro de bioetanol producido.²⁹

Materia prima	Consumo
Maíz	2,62 kg
Agua de proceso	2 m ³
Potencia	120 kW
Enzima	3.70 kg
Levadura	3.89 kg
Vapor	155 kg
Agua de enfriamiento	90 m ³

Maíz estimado a partir de los rendimientos de la planta de Acabio.

Enzima y levadura calculados estimados según la bibliografía citada.

³⁰ Gelsumino, S., López de Armentia, L., & Tous, L. Diseño de una planta de producción de bioetanol a partir de maíz.

Estas materias primas desempeñan un papel crucial en el proceso de producción de bioetanol, aportando los elementos necesarios para llevar a cabo la fermentación y obtener el producto final de manera eficiente. Cada una de ellas tiene un consumo específico por litro de bioetanol producido, lo que permite calcular los requerimientos y optimizar el proceso de producción.

Etapas del proceso

El proceso de producción de bioetanol se lleva a cabo a través de varias etapas, que incluyen el acondicionamiento del cultivo, la molienda, la fermentación de los hidratos de carbono y la posterior separación del alcohol y recuperación de los subproductos. En la actualidad, existen dos metodologías principales: la molienda seca y la molienda húmeda, que difieren en la preparación del maíz y la fermentación.

Los pasos generales del proceso son similares en ambas metodologías, las diferencias radican principalmente en los subproductos generados. En el caso de la molienda seca, se obtiene principalmente etanol y DDGS (granos destilados secos). Mientras que en la molienda húmeda se produce no solo etanol, sino también aceite de maíz, gluten feed y gluten meal, entre otros subproductos. Cabe destacar que el proceso de molienda húmeda implica más etapas, ya que se separan los componentes del grano, como almidón, fibra, gluten y germen, al principio del proceso.

Una diferencia importante entre ambos métodos de molienda es que la molienda húmeda tiene un rendimiento menor en comparación con la molienda seca, con una disminución de más del 10%. Sin embargo, cada método tiene sus ventajas y desventajas en términos de subproductos obtenidos y eficiencia del proceso. En este apartado, se describe el proceso de producción de bioetanol utilizando el método de molienda seca. A continuación, se detallarán las etapas involucradas en este proceso, que son: molienda, licuefacción, propagación, sacarificación, fermentación, destilación y deshidratación.

Molienda seca

En la etapa inicial del proceso, conocida como molienda, se lleva a cabo la trituration del maíz. Para ello, se realiza un tratamiento previo de limpieza para eliminar impurezas, tales como piedras y palos. Este proceso de limpieza se realiza utilizando

cribadoras o separadores. Una vez limpios, los granos de maíz se almacenan en silos hasta su utilización.

Durante la molienda, los granos de maíz son triturados hasta obtener una harina con un tamaño de partícula para atravesar mallas entre 5 mm y 8 mm. Generalmente, se prefiere un tamaño de 5 mm debido a su mayor rendimiento. Para lograr esto, se utilizan dos molinos a martillo dimensionados de manera tal que cada uno pueda abastecer el 60% de la demanda total de la planta. De esta manera, se garantiza la continuidad de la producción durante el mantenimiento de los equipos.

En cuanto a los silos de almacenamiento, la planta cuenta con tres silos de gran capacidad, cada uno con una capacidad de 6000 toneladas, y dos silos más pequeños con capacidad de 1000 toneladas cada uno. Los silos más pequeños se utilizan para suministrar de manera continua el maíz a la etapa de molienda, asegurando un flujo constante de materia prima.

La capacidad de almacenamiento de seguridad es para abastecer 20 días de producción. A diferencia de la molienda húmeda que se mencionó anteriormente, este método no separa los componentes del maíz previo a la molienda, es más económico y tiene mayor rendimiento. Para aprovechar al máximo la materia prima y teniendo en cuenta que el molino de martillo tiene una eficiencia del 95%, se utiliza un sistema de recirculado para los granos que no obtuvieron el tamaño de partícula requerida. De esta manera, se repite el proceso hasta obtener la granulometría permitida para pasar a la siguiente etapa.³¹

El objetivo principal de la trituración del maíz es exponer el almidón para facilitar las etapas posteriores del proceso. Al aumentar la superficie de contacto entre el almidón y el agua, así como con las enzimas que se utilizarán en las etapas siguientes, se promueve una mayor eficiencia en la producción de bioetanol. En los siguientes apartados se proporcionarán más detalles sobre el uso del agua y las enzimas.

El tamaño de partícula obtenido durante la trituración es un factor crítico que influye en el rendimiento general de la producción de bioetanol. Se ha observado que una harina de maíz más fina suele generar mejores resultados, ya que existe una diferencia de rendimiento del 5 al 10% en comparación con una harina más gruesa. En la *figura 2.2* se muestra una imagen del molino de martillo utilizado en el proceso de trituración. Este tipo de

³¹ Gelsumino, S., López de Armentia, L., & Tous, L. Diseño de una planta de producción de bioetanol a partir de maíz.

molino es ampliamente utilizado en la industria para lograr la reducción de tamaño requerida en la molienda del maíz.³²

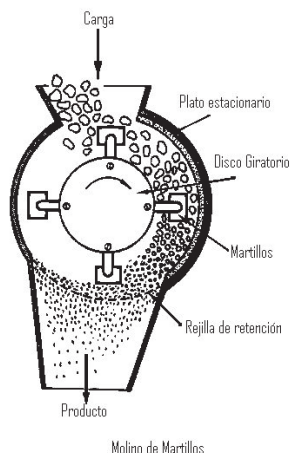


Figura 2.2. Molino de martillo.

Fuente³³

La harina de maíz obtenida en esta etapa es almacenada en tolvas y luego se alimenta al sistema de reactores de la sección de licuefacción.

Licuefacción

En esta etapa, se lleva a cabo la transformación del almidón en oligosacáridos mediante la hidrólisis de los enlaces glucosídicos internos de la molécula, lo que resulta en la formación de maltodextrinas.

El proceso de licuefacción comienza con la mezcla de la harina de maíz, el agua y otras corrientes de productos reciclados de etapas posteriores del proceso en un tanque de homogeneización. Además, se agrega la enzima *alfa-amilasa* y agua amoniacal para ajustar el pH. La mayor parte del agua utilizada en esta etapa proviene del reciclaje y tratamiento posterior de otras etapas del proceso. Estos componentes reciclados se almacenan en tanques a una temperatura que oscila entre 70 y 75 °C.³¹

La enzima *alfa-amilasa* desempeña la función de descomponer las moléculas de almidón en dextrinas. Para lograr la licuefacción adecuada del almidón y permitir que la enzima funcione correctamente, es necesario trabajar a un pH de 7 y en un rango de

³² Gelsumino, S., López de Armentia, L., & Tous, L. Diseño de una planta de producción de bioetanol a partir de maíz.

³³ Recuperado de: [HAMMERMILLS, Molino de martillo, \(tripod.com\)](http://HAMMERMILLS.Molino%20de%20martillo.%20tripod.com)

temperaturas elevadas, generalmente entre 85°C y 87°C. Es importante evitar temperaturas demasiado altas, ya que pueden provocar la gelatinización del almidón (100°C, aproximadamente). Para mantener estas condiciones, se agregan componentes químicos para regular el pH y la mezcla se introduce en cocinas, donde ocurre la licuefacción del almidón.³⁴

Después de esta etapa, la mezcla se enfría hasta alcanzar una temperatura de 30-32 °C. La energía térmica de esta mezcla se utiliza para calentar otras corrientes en el proceso. Se agrega ácido sulfúrico (H₂SO₄) para ajustar el pH y prevenir posibles actividades microbianas. Por esta razón, la corriente que ingresa a las etapas de fermentación y sacarificación tiene un pH cercano a 5.

Los principales objetivos de este proceso incluyen la reducción de la viscosidad de la mezcla que contiene harina, agua y otros componentes, la apertura de la molécula de almidón, la solubilidad de las dextrinas y la preparación del medio para facilitar la fermentación en etapas posteriores.

Propagación

La etapa de propagación es una fase previa a la sacarificación/fermentación. Durante este proceso, una parte de la mezcla anterior se separa en un tanque de mezcla aparte. Dentro de esa unidad, se agregan levadura seca, agua, nutrientes peptídicos y aire filtrado con el objetivo de promover el crecimiento celular de la levadura. Durante esta etapa, se mantiene una temperatura de alrededor de 20°C mediante refrigeración forzada.³³

Este breve proceso es crucial, ya que la levadura necesita ser hidratada para activarse y poder fermentar. En este tanque de mezcla, la levadura se encuentra en su etapa LAG, lo que significa que no hay un crecimiento significativo de la población. Esta etapa dura entre 1 y 2 horas, por lo que es importante mantener la refrigeración y la aireación adecuadas. El objetivo es alcanzar una concentración de levadura de 300-500 millones de células/ml para luego mezclarla nuevamente con la corriente de proceso.

En la *figura 2.3* adjunta se muestra el diagrama de crecimiento típico de la levadura y otros microorganismos. Se puede observar que la primera etapa es el acondicionamiento o LAG, que es previa al crecimiento exponencial en el cual se producirá el etanol. Esta

³⁴ Gelsumino, S., López de Armentia, L., & Tous, L. Diseño de una planta de producción de bioetanol a partir de maíz.

etapa es fundamental para acondicionar a los microorganismos y garantizar la eficiencia de todo el proceso.³⁵

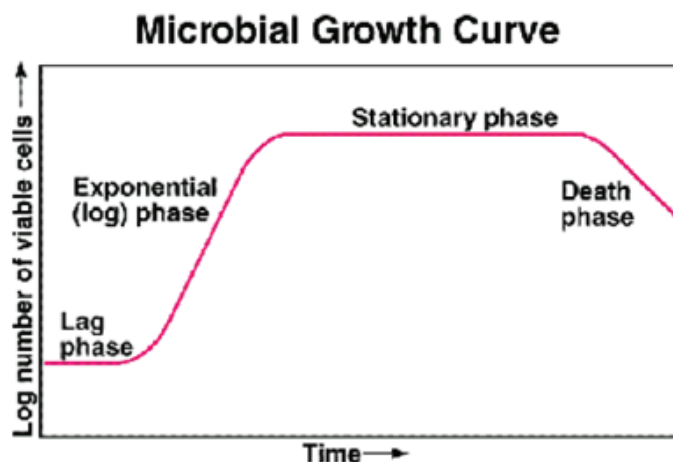


Figura 2.3. Gráfico del crecimiento microbiano en el tiempo destacando sus 4 fases; Lag, exponencial, estacionaria y muerte.

Fuente³⁶

Sacarificación y Fermentación

Al inicio de esta etapa, la fuente de carbono aún no está en condiciones de ser degradada por la levadura. Para completar la conversión del almidón en azúcares simples fermentables, se utiliza la enzima *glucoamilasa*, que ataca los enlaces glucosídicos de los extremos no reductores de los oligosacáridos y genera glucosa. Este proceso se conoce como sacarificación y ocurre inmediatamente después de la licuefacción.

La etapa de fermentación es donde se produce el etanol. Esto ocurre a través del metabolismo de la levadura durante un período de aproximadamente 48-72 horas. Como se muestra en la ecuación 2.1, una mol de glucosa produce dos moles de etanol y dos moles de CO₂ mediante la fermentación.



(Ecuación 2.1)

³⁵ ACABIO.

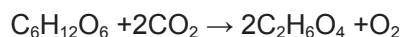
³⁶ Recuperado de: [ConEspuma - Entendamos el estudio y crecimiento microbiano](#)

Además de la reacción principal mostrada en la *ecuación 2.1*, también se producen otras reacciones secundarias en menor medida. Uno de los principales metabolitos secundarios generados durante la fermentación de la levadura es el glicerol. Aunque su presencia representa solo alrededor del 3-5%, esta cantidad puede aumentar si no se cumplen las condiciones adecuadas para la levadura; como una concentración inadecuada de azúcares. En menor medida, también pueden generarse otros metabolitos como ácido láctico, ácido succínico, ácido acético, entre otros.³⁷

Las *ecuaciones 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5* representan la formación de los metabolitos secundarios mencionados anteriormente: glicerol, ácido succínico, ácido acético y ácido láctico, respectivamente. Los porcentajes de glucosa que se convierten en cada uno de estos metabolitos son aproximadamente 3,4%, 1%, 0,2% y 0,24%, respectivamente, mientras que el 92% restante se convierte en etanol.



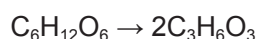
(Ecuación 2.2)



(Ecuación 2.3)



(Ecuación 2.4)



(Ecuación 2.5)

En este caso, tanto la sacarificación como la fermentación ocurren simultáneamente. Los fermentadores son alimentados con el mosto, ácido sulfúrico, la enzima *glucoamilasa* y la levadura proveniente del tanque de propagación. Para garantizar las condiciones adecuadas mencionadas previamente en el apartado de materias primas, se cuenta con la instalación de equipos de monitoreo automático que inyectan los agentes químicos necesarios para mantener el medio.

³⁷ Gelsumino, S., López de Armentia, L., & Tous, L. Diseño de una planta de producción de bioetanol a partir de maíz.

La ventaja de unificar ambos procesos es que permite la degradación de los azúcares a medida que se forman, evitando su acumulación en el medio, lo cual podría ser perjudicial para la supervivencia de la levadura. Además, la presencia de etanol en la solución protege contra la acción de otras bacterias que puedan estar presentes en la mezcla. La reducción de equipos necesarios para operar no solo hace que el proceso sea más eficiente, sino que también resulta menos costoso y permite reducir los tiempos operacionales.³⁸

Durante esta etapa, como se indica en la *ecuación 2.1*, se produce la liberación de CO₂. Este es el primer subproducto obtenido en el proceso de producción. El CO₂ se captura y se somete a un tratamiento para su posterior comercialización. Se proporcionarán más detalles sobre este proceso en el apartado de subproductos dentro de este mismo capítulo. La planta cuenta con 3 fermentadores y 1 tanque agitado con fondo cónico como reservorio final.

Destilación

Según la normativa de la Secretaría de Calidad en Salud y la Secretaría de Alimentos, Bioeconomía y Desarrollo Regional, se ha decretado que el porcentaje de pureza del bioetanol debe ser del 99.5%. Al inicio de esta etapa, se obtiene un producto con aproximadamente un 14-18% de alcohol y el resto de sólidos no fermentables de maíz y levadura. Por lo tanto, para lograr la concentración necesaria para su comercialización, se debe aislar el alcohol mediante. En la industria, se utiliza como primer método separativo a la destilación.

La maquinaria utilizada en esta etapa consta de cuatro columnas para aprovechar mejor la energía, ya que se requiere una menor presión de vapor para calentar. Estas columnas son:

1. Columna de desgasificación.
2. Columna de procesamiento del mosto/columna mostera.
3. Columna de rectificación.
4. Columna de extracción/agotamiento.

³⁸ Gelsumino, S., López de Armentia, L., & Tous, L. Diseño de una planta de producción de bioetanol a partir de maíz.

El proceso comienza cuando la mezcla fermentada en el tanque cónico de la etapa anterior es transferida a la columna de desgasificación para eliminar los gases disueltos. Una vez que la mezcla está desgasificada, ingresa a la siguiente columna, la columna mostera, que tiene una temperatura de aproximadamente 72-74°C en la parte inferior y temperaturas de entre 84-85°C en la parte superior. En esta etapa, se separa el alcohol hidratado en forma de corriente gaseosa en la parte superior de la columna, mientras que el resto de los sólidos se dirigen hacia la sección de decantación; este subproducto se conoce como vinaza. Tanto en la columna de desgasificación como en la mostera, se opera a vacío.³⁹

Como tercera etapa de este proceso, la corriente gaseosa separada ingresa por la parte inferior a la columna de rectificación, donde su concentración aumenta a medida que asciende a través de más de 40 platos de destilado. La pureza obtenida al final de esta columna es de aproximadamente 94-95% v/v. En este caso, y a diferencia de las demás columnas, se trabaja a una presión absoluta de 0.25 bar. El alcohol gaseoso que emerge de la columna de rectificación se condensa y se envía a los tanques de reflujo. Parte del condensado se devuelve a la columna de rectificación para enriquecer al bioetanol, mientras que el resto continúa hacia la siguiente y última etapa.³⁸

Como subproducto de la columna de rectificación, se generan aceites que se envían a un tanque de decantación junto con agua. Esta mezcla se envía finalmente a la última columna, la de extracción, donde se separa todo el alcohol remanente de otros subproductos de destilación al atravesar más de 14 platos teóricos. En este caso, los subproductos de destilación se reciclan hacia la sección de licuefacción.

El etanol que sale por la parte superior de la columna de extracción se envía nuevamente a la columna de rectificación para enriquecerlo en etanol. Al mismo tiempo, la columna de extracción recibe una corriente rica en alcohol que se produce durante la sección de deshidratación final del etanol, que se describe en el siguiente apartado.

El sistema de destilación es complejo y opera de forma continua, por lo que se monitorean automáticamente los caudales y los tiempos de residencia dentro de cada columna. Además, se miden constantemente los valores de temperatura y presión en todo momento del proceso.

³⁹ Gelsumino, S., López de Armentia, L., & Tous, L. Diseño de una planta de producción de bioetanol a partir de maíz.

Para optimizar la eficiencia térmica, se aprovechan las temperaturas de los procesos anteriores. La columna mostera aprovecha el calor que se desprende del enfriamiento de la mezcla de la licuefacción mencionada anteriormente. A su vez, los vapores obtenidos en esta columna se condensan e incorporan dentro de la columna de extracción, y otra parte de los gases se utilizan para calentar la columna de desgasificación. De esta manera, los costos y los consumos energéticos de esta etapa son menores.

Deshidratación

Al finalizar la etapa de destilación, se obtiene un alcohol hidratado con una concentración de 94-95% v/v. Por lo que aún no se alcanza la concentración requerida para su comercialización. En este proceso, se lleva a cabo la deshidratación de la solución mediante tamices hasta conseguir el producto final aprobado por ley.

La corriente condensada obtenida en la columna de rectificación es precalentada por los vapores del etanol ya deshidratado. Además, el líquido es vaporizado mediante un supercalentador que suministra vapor a una mayor presión.

El etanol gaseoso es enviado a tamices moleculares con material absorbente para retener el agua. Esto permite obtener un alcohol con una humedad menor al 0.5% v/v a la salida de estos tamices. Durante la regeneración del tamiz molecular, una corriente de etanol es liberada y arrastra consigo la humedad del material absorbente. Estos vapores salen por el tope del tamiz molecular y son condensados mediante un condensador y un reductor. La corriente gaseosa proporciona la energía térmica que se utiliza en el precalentamiento mencionado anteriormente. Por otra parte, la corriente líquida va directamente hacia la columna de rectificación para recuperar su fracción de etanol.⁴⁰

El alcohol obtenido en esta etapa tiene una pureza de de 99,5-99,9% v/v y se denomina alcohol anhidro. El producto es almacenado para su venta y distribución. Durante el proceso de destilación y deshidratación, se cuenta con una torre de enfriamiento para recuperar gases con etanol e introducirlos nuevamente donde puedan ser aprovechados.

Subproductos

En base a la descripción del proceso productivo desarrollado en el apartado anterior, se generan dos subproductos principales. El primero de ellos es el CO₂ emitido durante la

⁴⁰ Gelsumino, S., López de Armentia, L., & Tous, L. Diseño de una planta de producción de bioetanol a partir de maíz.

etapa de sacarificación y fermentación. El segundo es la vinaza que se separa del etanol en la columna mostera. A partir de este efluente líquido, se obtienen otros dos subproductos de interés. Mediante una serie de procesos básicos y operaciones unitarias, se obtienen los WDGS (granos húmedos destilados con solubles) y los DDGS (granos secos de destilería con solubles), también conocidos como burlanda húmeda y burlanda seca, respectivamente.

Dióxido de Carbono

El CO_2 generado durante el proceso es almacenado después de atravesar la columna de desgasificación. Con un tratamiento posterior, es posible comercializarlo, y sus aplicaciones son diversas. Se utiliza como materia prima para bebidas carbonatadas, refrigerante en centrales frigoríficas, agente extintor de incendios, estimulante vegetal en invernaderos de aire controlado, atmósfera de inertización para soldadura o manipulación de sustancias inflamables, e incluso para el control de pH en el tratamiento de aguas residuales.

En su estado inicial, el dióxido de carbono obtenido está en forma gaseosa y contiene aproximadamente un 1% p/p de etanol. Por lo tanto, la primera etapa del proceso de recuperación de este gas es el lavado. Durante esta operación, la corriente gaseosa se lava a presión atmosférica con agua a temperatura ambiente, lo que produce dos corrientes como resultado. Una de ellas contiene el etanol recuperado y agua, mientras que la otra corriente contiene el gas con un 5% de humedad. La primera corriente se recircula dentro del fermentador, mientras que la segunda se comprime.

La compresión del CO_2 eleva las temperaturas, por lo que se requiere el uso de una torre de enfriamiento para continuar con las siguientes etapas. Para eliminar los malos olores, el dióxido de carbono se hace pasar por un lecho de carbón activado, ya que pueden deberse a la presencia de azufre como impureza.

Las últimas dos etapas del proceso son el secado y el almacenamiento. En la etapa de secado, se busca eliminar el porcentaje remanente de humedad utilizando una columna compuesta por material desecante. Finalmente, el CO_2 se almacena en un depósito criogénico a una presión entre 15 y 24 bar. En el caso presentado, la generación de CO_2 es de 33,000 toneladas anuales.

Vinaza, WDGS y DDGS

Para obtener DDGS (granulado de destilería con solubles), se implementan métodos de separación de sólidos y deshidratación en el proceso. Esto se logra a través de la operación de una centrifugadora, un evaporador y un secador. Al concentrar la fracción de sólidos presentes en la vinaza, no solo se obtiene un producto a gran escala listo para ser comercializado, sino que también se evita el vertido de un efluente altamente contaminante debido a su alta carga orgánica. En otras palabras, se valoriza este subproducto.

El primer paso es someter la vinaza obtenida en la columna mostera a un proceso de centrifugación, donde se separa la parte líquida de los sólidos compuestos por los granos de destilería húmedos (WDG) o *torta húmeda*. Estos sólidos son principalmente almidonantes de maíz y levadura, y no son solubles en agua. El contenido de humedad de este producto es aproximadamente del 65%. Una opción aplicable en este caso es someterlos a un proceso de secado para obtener granos de destilería secos (DDG).

La otra fracción obtenida a partir de la centrifugación es la parte líquida, conocida como vinaza fina, que contiene las proteínas. Principalmente, es agua que comprende entre un 5% y un 10% de sólidos. La vinaza fina puede reutilizarse en el proceso productivo de diferentes maneras. Por un lado, se puede reintegrar al proceso de licuefacción como agua de reposición. Otra opción es enviarla a un evaporador para eliminar la humedad y concentrarla en un jarabe con un contenido de sólidos que oscila entre el 25% y el 50%, comúnmente conocido como destilados solubles concentrados (CDS). El objetivo de sintetizar el jarabe es mezclarlo con los WDG para obtener burlanda húmeda o WDGS con un contenido de humedad del 65%.

El proceso de evaporación es importante, ya que, además de obtener el jarabe, permite recuperar una gran cantidad de agua que puede reutilizarse en el proceso, lo que reduce los costos de producción. El evaporador cuenta con un intercambiador de calor, un separador de vapor y, por último, un condensador para recuperar el agua.

El alto contenido de humedad en los WDGS favorece el crecimiento de microorganismos que pueden disminuir la calidad del producto. La exposición al aire puede provocar su deterioro en un período de entre 3 a 14 días. Por lo tanto, es preferible realizar una operación de secado para reducir el contenido de agua a aproximadamente un 10-12%. El producto final obtenido es la DDGS o burlanda seca. La DDGS puede conservarse en silos durante varios meses sin que sufra una disminución en la calidad.

En la *tabla 2.3* se indica la cantidad generada de cada subproducto mencionado en este apartado por metro cúbico (m³) de etanol producido. Dado que los WDGS y las DDGS provienen de la vinaza, es importante establecer la relación entre ambos. Aproximadamente, se obtienen 0,16 toneladas de WDGS por m³ de vinaza y, a su vez, se obtienen 0,47 toneladas de DDGS por cada tonelada de WDGS.

Tabla 2.3. Generación por m³ de bioetanol producido.

Materia prima	Generación
Vinaza	14 m ³
CO ₂	0,23 ton
WDGS	1,2 ton
DDGS	0,48 ton

Contaminantes

Residuos sólidos

La generación de residuos sólidos en esta industria es mínima. El volumen principal de residuos sólidos proviene del proceso de limpieza y acondicionamiento que ocurre antes de la etapa de molienda, específicamente del silaje del maíz. Además, hay una pequeña cantidad de residuos inorgánicos y orgánicos generados por los operarios que trabajan en la planta.⁴¹

Efluentes líquidos

La entrada de agua al proceso ocurre en los tanques de mezcla después de la molienda. Esta cantidad es suficiente para abastecer todo el proceso, ya que, como se explicó anteriormente, se recircula y se recupera en la medida de lo posible. Sin embargo, se genera un efluente líquido a partir de las columnas de destilación que no se recircula: la vinaza. En este caso particular, como se mencionó en el apartado de subproductos, la vinaza se incorpora en otro proceso, por lo que no puede considerarse un efluente líquido.

⁴¹ ACABIO

De todos modos, se generan efluentes líquidos en otros procesos. Estos incluyen las purgas de las torres de enfriamiento, la caldera de vapor y el rechazo del sistema de ósmosis inversa utilizado en el tratamiento de agua para la caldera. Además, el personal de la planta genera efluentes domiciliarios durante la jornada laboral. La planta cuenta con 90 profesionales técnicos y operarios que trabajan en turnos durante las 24 horas del día.

La caldera es necesaria para obtener el vapor utilizado en el proceso. Sin embargo, es necesario realizar un tratamiento previo al agua para prevenir daños en la infraestructura de la planta, como corrosión, formación de espuma, incrustaciones, etc. Como medida preventiva, se utiliza un sistema de ósmosis inversa para proteger los equipos. Los efluentes líquidos asociados a la caldera y a la torre de enfriamiento no contienen niveles significativos de sustancias contaminantes según las normativas municipales y provinciales de Villa María, Córdoba.

El método utilizado para el tratamiento y disposición de los efluentes es una laguna de estabilización, que permite mejorar las características de los efluentes mencionados mediante un proceso de autodepuración. La laguna abarca a los efluentes tanto de la depuración como los domiciliarios.

Emisiones a la atmósfera

Durante la producción de bioetanol, se generan dióxido de carbono y vapores. Pero los primeros son capturados para su comercialización, mientras que los vapores se aprovechan para el balance térmico del proceso. Por lo tanto, las emisiones gaseosas están principalmente asociadas a la maquinaria utilizada en la producción.

Según un estudio de emisiones gaseosas realizado en 2015, se estimó que las emisiones de gases de efecto invernadero fueron de 64.676 toneladas de CO₂eq. Teniendo en cuenta que la producción de ese año fue de 93.730 toneladas de etanol al 99,5% para la industria estudiada, se puede calcular un factor de emisión por tonelada.⁴²

$$FE: \frac{Emisiones\ CO_2eq}{Producción\ EtOH} = \frac{64.676\ ton\ CO_2eq}{93.730\ ton\ EtOH}$$

⁴² ACABIO

$$FE: 0,69 \text{ CO}_2eq/ton \text{ EtOH}$$

Considerando que el proceso no varió desde la realización del estudio y que la producción media anual es 145.000 m³/año y que la densidad del etanol 99.5% es de 0.789 g/mL, la producción es de 114.525 toneladas/año. Al multiplicar el factor de emisión, se obtienen 79.022.25 emisiones de CO₂es anuales. Dichas emisiones surgieron en un 87% del consumo eléctrico total seguido de la producción de biocombustibles.

Servicios

Los servicios son fundamentales para el funcionamiento de cualquier industria. En este caso, se requiere principalmente agua, energía eléctrica y gas natural. Para un análisis posterior, es importante identificar las etapas y los procesos que consumen más energía. Por lo tanto, en la *figura 2.4* que se muestra a continuación, se incluye un gráfico de Pareto que muestra estos consumos. A partir del gráfico, se puede concluir que el proceso de secado de los WDGS para obtener los DDGS es el que tiene la mayor demanda energética. No se consideran los ventiladores de las torres de enfriamiento y la centrifugadora de la vinaza debido a su bajo consumo.⁴³

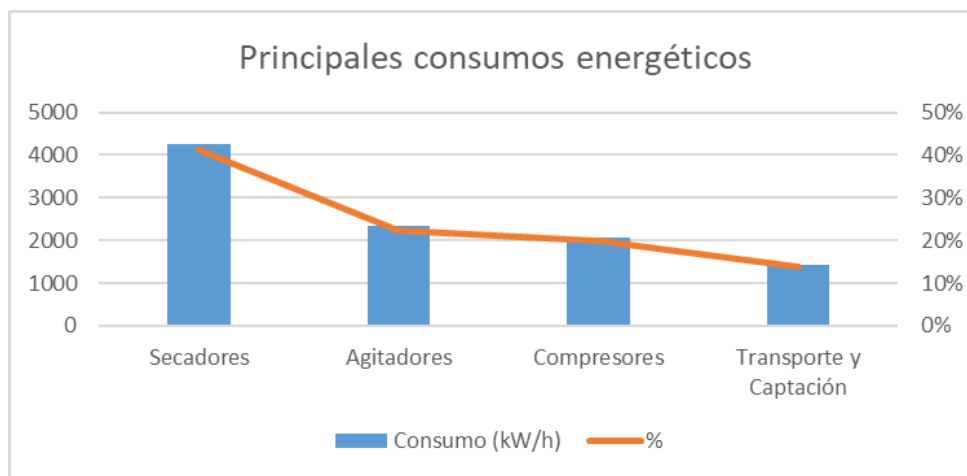


Figura 2.4. Gráfico de los consumos eléctricos de la planta y su porcentaje con respecto al total. Elaboración propia.

El valor total de energía eléctrica que consume la planta es de 6.814,8 kW/h. Es decir, que los secadores, agitadores, compresores y la maquinaria implementada para el transporte y captación de agua representan el 97% del consumo total. Se estima que el

⁴³ Gelsumino, S., López de Armentia, L., & Tous, L. Diseño de una planta de producción de bioetanol a partir de maíz.

consumo anual para la producción media es de 59.697,225 MW/año. Además de la electricidad, la planta consume gas natural. En este caso, el consumo es de la caldera para la obtención de vapor. El resumen de dichos consumos se aprecia en la tabla 2.4.

En este caso, el agua del proceso se obtiene del pozo. Por eso se le realiza un tratamiento previo a ser utilizada, como se mencionó en la sección de efluentes líquidos. En la *tabla 2.4* se resumen los consumos anuales de los servicios para el volumen de producción de 145.000 m³ de etanol, también se incluye el caudal de vapor y agua de enfriamiento.

Tabla 2.4. Consumo de servicios de la biorefinería.

Servicio	Cantidad
Electricidad	59.697,225 MWh/año
Gas natural	103.618.937,3 m ³ /año
Vapor	113.424,075 kg/h
Agua de enfriamiento	2.661.707 kg/h

Elaboración propia a partir de los datos mencionados en la descripción del proceso productivo.

Layout: Proceso, efluentes, residuos y emisiones

Para poder observar gráficamente el detalle de las etapas y las corrientes de flujos, se presenta en la *figura 2.5* un esquema del proceso. No se tienen en cuenta los procesos secundarios para el acondicionamiento de los subproductos. El esquema inicia con la introducción del maíz limpio a los martillos y finaliza con la salida de la unidad deshidratadora. Las flechas de color negro representan el sentido del flujo principal del proceso. Por otro lado, las flechas de color verde indican los residuos o efluentes generados durante la producción que son reutilizados o introducidos nuevamente para etapas posteriores. Finalmente, en azul se indica el ingreso del agua al proceso.

Los procesos secundarios del tratamiento de la vinaza para la producción de WDGS y DDGS y la captura y acondicionamiento del CO₂, se observan en las *figuras 2.6* y *2.7* respectivamente. En la primera, el diagrama inicia con la salida de la columna mostera del proceso de destilación. Todas las flechas para este esquema son de color negro ya que no

hay subproductos ni corrientes de efluentes que se reutilicen dentro de este proceso. En la *figura 2.7* siguiente, se incluye el proceso de tratamiento del CO₂ para su posterior venta.

Además, el siguiente diagrama de flujo en la *figura 2.8* presenta de manera detallada los procesos productivos, así como las entradas y salidas de materiales, emisiones gaseosas, efluentes líquidos y subproductos generados en el contexto de este proyecto. Para facilitar la comprensión, se identifican con diferentes colores para resaltar los aspectos más importantes.

En primer lugar, el proceso principal se muestra en tono azul, corresponde al esquema mostrado en la *figura 2.5* incluyendo las enzimas, agua introducida o recirculada, levadura, etc. que se adiciona en las etapas correspondientes. Este proceso constituye el enfoque central del análisis dentro del presente capítulo y es fundamental para la síntesis de etanol y la obtención de la vinaza.

En tono rosa, se identifican los subproductos generados durante el desarrollo de este proyecto que son de particular interés para el análisis que tiene como objetivo el proyecto. Estos subproductos pueden tener un potencial significativo en términos de valor comercial o aplicaciones adicionales.

Por otro lado, se emplea el color verde para resaltar los materiales generados en cada etapa del proceso que son reintroducidos en otra etapa de la síntesis de etanol o en la producción de WDGS. Este sistema de reutilización interna de materiales contribuye a optimizar los recursos, reducir el desperdicio y ahorrar costos, promoviendo la eficiencia y economía circular en el proceso productivo.

Por último, en contraste, el color rojo se utiliza para indicar los residuos o emisiones identificados como parte intrínseca del proceso. Estos residuos o emisiones requieren una gestión adecuada para minimizar su impacto ambiental y garantizar la sostenibilidad del proyecto. Es importante destacar que, en este análisis, no se tienen en cuenta los residuos sólidos urbanos generados por el personal de la planta ni los efluentes cloacales de los operarios, ya que su gestión se aborda por separado.

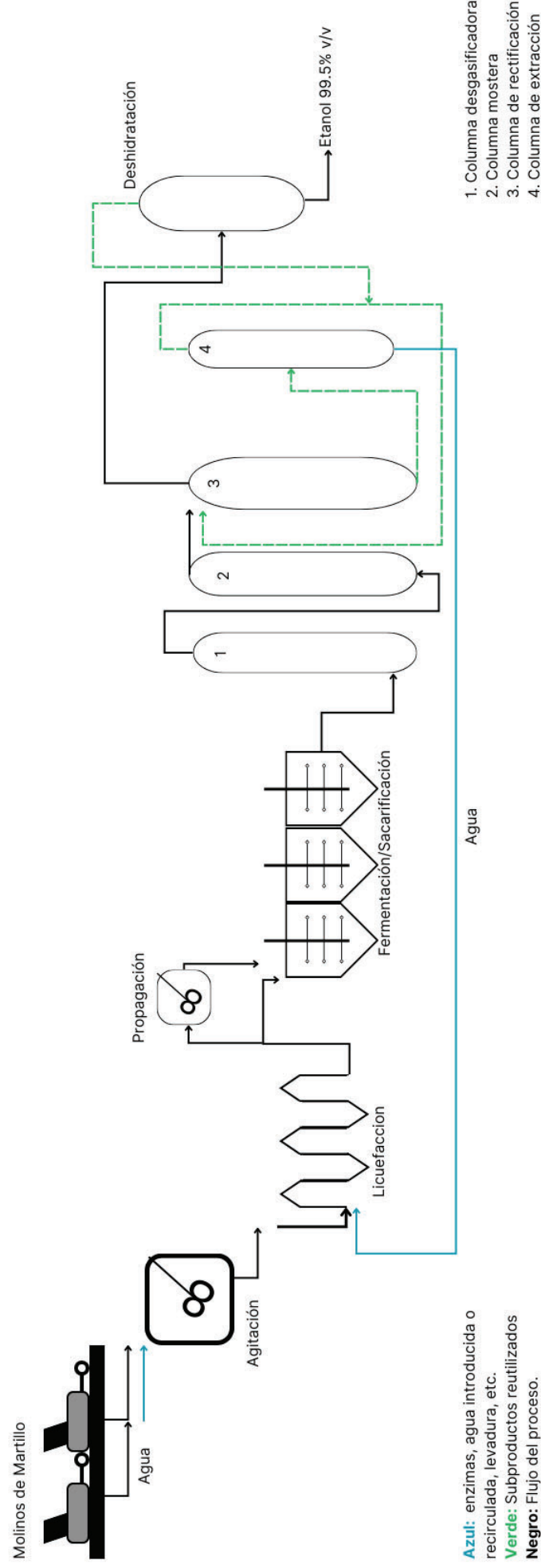


Figura 2.5. Diagrama del proceso del bioetanol.

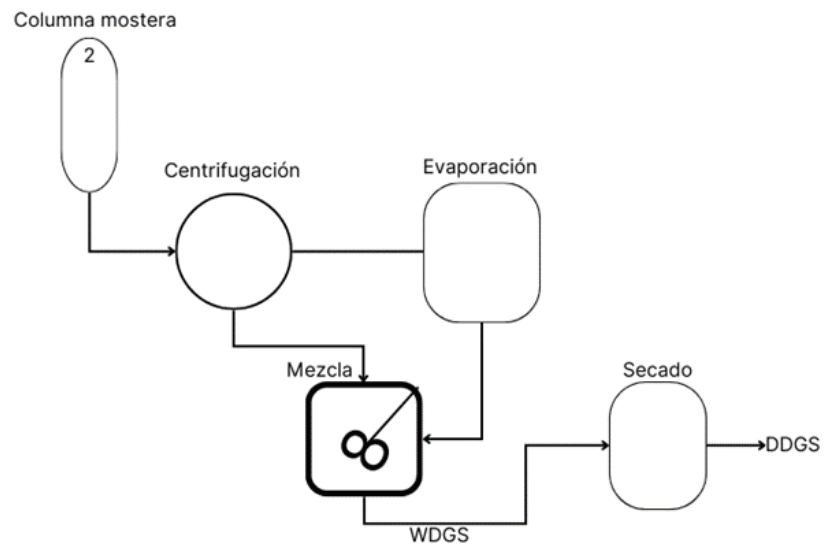


Figura 2.6. Diagrama del proceso de obtención de WDGS y DDGS

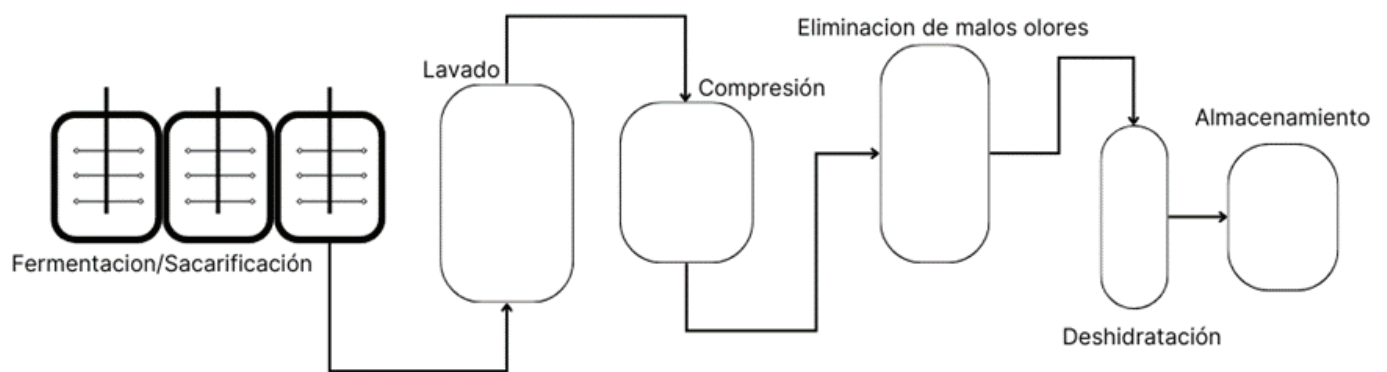


Figura 2.7. Diagrama del proceso de captura del CO₂.

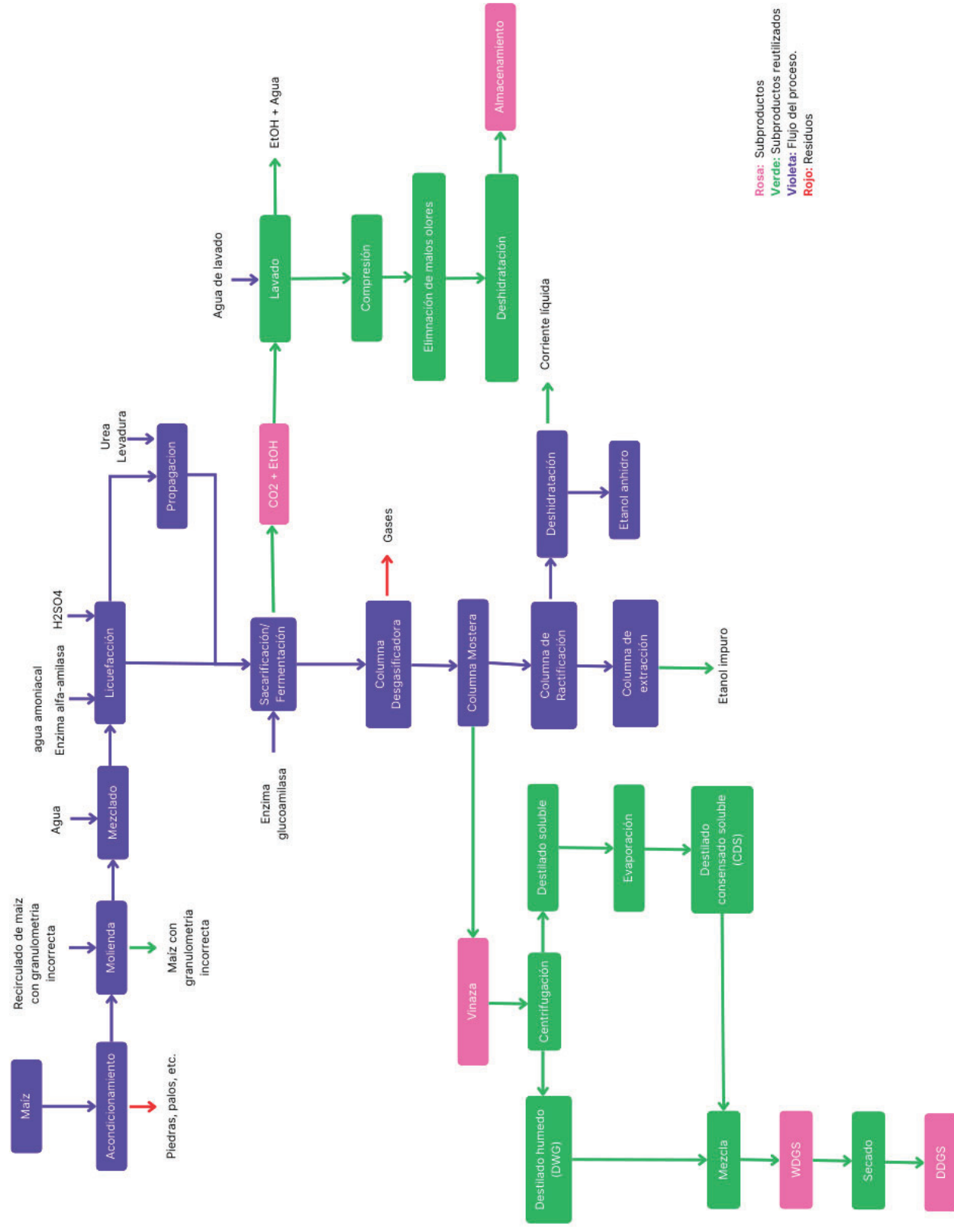


Figura 2.8. Diagrama de flujo de todo el proceso.

Marco Legal

La legislación que regula a la producción de bioetanol es principalmente la ya mencionada Ley 26.093 de biocombustibles. Por su parte, la producción, comercialización y uso de la burlanda de maíz en la alimentación animal están regulados por diferentes normativas relacionadas con la producción agropecuaria y la seguridad alimentaria. Con el pasar de los años, también se emitieron nuevos decretos que afectan al marco legal de este proceso. A continuación se listan toda la legislación pertinente al tema junto con una breve descripción.

Ley 26.093 Biocombustibles (Ley 27.640 vigente hasta el 2030)

Principalmente crea la Comisión Nacional Asesora para la Promoción de la Producción y Uso Sustentables de los Biocombustibles. En el Art. 4 establece las funciones del Órgano de Aplicación. En el art. 5 da la definición de biocombustibles: se entiende por 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. El art. 6 establece los términos de la habilitación de la planta: "La habilitación correspondiente se otorgará, únicamente, a las plantas que cumplan con los requerimientos que establezca la autoridad de aplicación en cuanto a la calidad de biocombustibles y su producción sustentable, para lo cual deberá someter los diferentes proyectos presentados a un procedimiento de Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) que incluya el tratamiento de efluentes y la gestión de residuos." Se establecen multas por incumplimientos a esta ley nacional determinados en litros de nafta super, depende la gravedad del incumplimiento.

Ley Argentina 26.334

Esta ley, promulgada en 2007, establece el Régimen de Regulación y Promoción para la Producción y Uso Sustentables de Biocombustibles. Esta ley tiene como objetivo fomentar la producción y el uso de biocombustibles en Argentina, promoviendo la diversificación de la matriz energética y el desarrollo sostenible del sector.

Ley 27.191 de Apoyo Nacional para el Uso de Fuentes de Energía Renovables

El objetivo de la regulación es la promoción del uso de fuentes de energía renovable en Argentina. Establece incentivos y mecanismos de apoyo para el desarrollo de proyectos de energía renovable, como la generación de electricidad a partir de fuentes como solar, eólica, biomasa, hidroeléctrica y geotérmica. Fomenta la diversificación de la matriz energética del país, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y el impulso de la investigación y desarrollo en el campo de las energías renovables. Finalmente, dicta la obligación de los grandes usuarios de electricidad de obtener una parte de su consumo a partir de fuentes renovables y crea un marco regulatorio para la compra y venta de energía renovable en el mercado eléctrico. El consumo de energías renovables en Argentina debe ser de un 20% para el año 2025.

Ley N° 27.233 Sanidad de los Animales y Vegetales.

Establece la necesidad de adoptar medidas de vigilancia y control para preservar las condiciones sanitarias, prevenir la difusión de plagas y enfermedades, y proteger la sanidad animal, vegetal, la salud humana y la calidad agroalimentaria.

Ley N° 24.051 de Residuos Peligrosos

Indican las disposiciones para el manejo, transporte, tratamiento y disposición final de los residuos peligrosos. La ley establece responsabilidades y obligaciones para los generadores de residuos peligrosos, así como para las empresas y organismos encargados de su manejo. Promueve la reducción en la generación de estos residuos, la implementación de medidas de seguridad en su transporte y almacenamiento, y la adopción de técnicas adecuadas de tratamiento y disposición final. Asimismo, establece sanciones en caso de incumplimiento de las disposiciones de la ley, con el objetivo de garantizar una gestión ambientalmente responsable de los residuos peligrosos en el país.

CAPÍTULO 3: Análisis del subproducto

Vinaza

Se obtienen entre 12 y 15 litros de vinaza por litro de alcohol en la columna mostera durante la etapa de destilación. En un extremo de la columna se obtiene el etanol con un porcentaje considerable de hidratación, mientras que en el otro extremo se obtiene la vinaza, que consiste en los residuos de levadura, maíz y efluentes. Esta sustancia representa un riesgo ambiental debido a su alto contenido orgánico. Sin embargo, esta misma puede ser aprovechada. En el caso analizado, la vinaza pasa por un proceso secundario para sintetizar WDGS y posteriormente DDGS, que se comercializan. Un beneficio adicional de este proceso es que se recupera una cantidad considerable de agua, que se puede reutilizar en el proceso, lo que reduce significativamente los costos de agua. A pesar de esto, existen otras alternativas que pueden ser aplicables e incluso más convenientes.

En el caso de la molienda húmeda, donde se obtiene principalmente la vinaza concentrada, se comercializa el aceite crudo de maíz. Este aceite no es apto para consumo humano y se utiliza en la industria del biodiesel y agroquímicos. Además, es posible obtener gas metano mediante un sistema de biodigestión anaerobia.

La vinaza ha sido objeto de numerosos estudios en cuanto a su composición y parámetros fisicoquímicos. Estas características son determinantes para proponer una alternativa de tratamiento y diseñar el proceso correspondiente. La *tabla 3.1* resume la información, incluyendo las concentraciones de metales pesados.

Tabla 3.1. Parámetros fisicoquímicos y de la composición de la vinaza

Parámetros	Valor promedio	Metales	Concentración (mg/L)
Alcalinidad	1.698 mg/L	Sodio	45,61
pH	4,89	Potasio	67,91
DQO total	78.500 mg/L	Cobalto	0,045
DQO soluble	75.670 mg/L	Cobre	0,567

Sólidos Suspendidos Totales (SST)	5.719 mg/L	Hierro	33,790
Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV)	4.862 mg/L	Manganeso	2,232
Sulfatos	3.915 mg/L	Molibdeno	0,011
Viscosidad	1,08 cP	Niquel	0,208
Nitrógeno total	398 mgN/L	Vanadio	0,028
Fuente ⁴⁴			

En algunos casos, se estudió la implementación de un reactor anaerobio para la degradación de la vinaza, teniendo como resultados diferentes porcentajes de remoción y generación de biogás. En la siguiente tabla, se listan los porcentajes de remoción de DQO total (DQOt) y el rendimiento y calidad de metano obtenido mediante este tratamiento.

Tabla 3.2.

Nomenclatura	Cifra
% de remoción DQO total	77,5%
Rendimiento de metano	0,28 m ³ CH ₄ /kg DQOs
Pureza del metano	0,55%
Fuente ⁴⁵	

La pureza del biogás puede variar según las condiciones. Por parte del metano, sus valores rondan entre el 60-40% de composición con respecto al total. El CO₂ y el H₂S varían entre un 54-34% y un 3,2-1,8% respectivamente.

Burlanda: subproducto

Composición

Tal como se mencionó al inicio de este trabajo, dos de los objetivos específicos son categorizar la burlanda y determinar su potencial de biometano a escala de laboratorio. En esta sección, se describe la composición de este subproducto y sus características fisicoquímicas relevantes para su manejo y conservación. De esta manera, se podrá operar de manera más eficiente el ensayo que se desarrollará en el capítulo 4.

⁴⁴ Ibarra Camacho, R., & León-Duharte, L. (2018). Caracterización Químico-Física de Vinazas de Destilerías. Ciencia en su PC, 1(2), 1-13. Centro de Información y Gestión Tecnológica de Santiago de Cuba.

⁴⁵ Ibarra Camacho, R., & León-Duharte, L. (2018). Caracterización Químico-Física de Vinazas de Destilerías. Ciencia en su PC, 1(2), 1-13. Centro de Información y Gestión Tecnológica de Santiago de Cuba.

La burlanda es un subproducto que se genera durante la destilación del mosto fermentado. Por lo tanto, su composición y los nutrientes que contiene son similares a los del maíz, con la excepción del almidón, el cual se consume durante la conversión en etanol y CO₂. Además, los nutrientes de la burlanda están hasta 3 veces más concentrados que en el maíz, lo que le confiere un valor nutricional importante y justifica algunos de sus principales usos alternativos que se mencionan más adelante.

En el caso de estudio, se obtiene burlanda en dos formas: húmeda (WDGS) y seca (DDGS). Para recapitular, la diferencia entre ambas es que la primera tiene un contenido de humedad del 65%, mientras que la segunda tiene un máximo del 12%. El proceso de secado, que transforma la burlanda húmeda en seca, es la razón por la cual la DDGS contiene menos proteínas y energía que la WDGS. En promedio, la burlanda tiene una composición de aproximadamente 30% de proteínas, 11% de grasas y 9% de fibras, lo que justifica su denominación común como proteína vegetal.⁴⁶

En la siguiente tabla se presentan los porcentajes de la composición de nutrientes, proteínas y fibras de la burlanda húmeda y seca:

Tabla 3.3 Composición de la burlanda húmeda y la burlanda seca.⁴⁷

Composición	Burlanda húmeda (WDGS)	Burlanda Seca (DDGS)
Materia seca %	31.80	88.37
CP	30,60%	29,48%
NDF	32,71%	28,19%
ADF	17,53%	13,81%
Lignina	3,75%	2,67%
Extracto de éter	9,56%	8,60%
Ceniza	3,45%	3,71%
Calcio	0,07%	0,04%
Fósforo	0,59%	0,54%

⁴⁶ Gelsumino, S., López de Armentia, L., & Tous, L. Diseño de una planta de producción de bioetanol a partir de maíz.

⁴⁷ Anderson, J. L., Schingoethe, D. J., Kalscheur, K. F., & Hippen, A. R. (2006). Evaluation of Dried and Wet Distillers Grains Included at Two Concentrations in the Diets of Lactating Dairy Cows. J. Dairy Sci.

Magnesio	0,24%	0,24%
Potasio	0,71%	0,72%
Azufre	0,80%	0,80%

CP: Proteína Cruda.

NDF: Fibra Detergente Neutra.

ADF: Fibra Detergente Ácida.

En base a la tabla, podemos observar una leve diferencia entre la burlanda húmeda y seca. Donde efectivamente, la humedad tiene mayor concentración de proteínas, fibras y grasas. Uno creería entonces, que la burlanda húmeda es mejor para su posterior uso y comercialización. Pero, el beneficio de la burlanda seca se encuentra en la conservación y almacenaje. El alto contenido de humedad de la WDGS favorece el crecimiento de microbios que bajan la calidad del producto. Su exposición al aire puede generar su deterioro en un periodo de entre 3 a 14 días. La DDGS, por otra parte, puede ser conservada en silos por varios meses sin sufrir bajas en la calidad.⁴⁸

No obstante, el valor nutritivo puede variar por otros motivos. La calidad del grano de maíz es una, al igual que las condiciones ambientales y el manejo del cultivo. En cuanto al proceso productivo, el tipo de molienda, las enzimas agregadas y la temperatura en la fermentación y destilación pueden variar la composición de los nutrientes. Una variable importante para el análisis es el pH del subproducto. La burlanda tiene un pH ácido, entre 3 y 4 unidades a la salida de la planta de etanol. El motivo por el cual el pH es tan bajo se debe a la adición de ácido sulfúrico durante la fermentación. De todos modos, esta propiedad es beneficiosa para la conservación de la WDGS previa a la digestión, ya que dicho rango de pH inhibe la actividad microbiana.⁴⁷ Con lo que respecta a la temperatura, la WDGS sale de la planta con 90°C debido al proceso de evaporación que atraviesa para ser generada. La DQO de la burlanda húmeda se puede estimar a partir del de la vinaza. Siendo que la densidad de la vinaza es de 1.015 kg/m³, y el de la WDGS 1.100 kg/m³ y conociendo que se evapora un 35% de agua en la transformación de una a la otra, se estima que la DQO de la WDGS es aproximadamente 130.883 mg/L.⁴⁹

Alternativas de tratamiento

⁴⁸ Bertona, A. Burlanda de Maíz o Sorgo, un subproducto que se incorpora en la dieta de los rumiantes. Cátedra de Agricultura Especial, Facultad de Ciencias Agrarias, UNCUYO

⁴⁹ M.A. Mazutti, A.P.N. de Oliveira, M.V.B. Zanin, J.A. Vilardi, J.C. de Oliveira "Caracterización fisicoquímica y biodegradabilidad de la burlanda húmeda de maíz" Ciencia e Tecnología Alimentaria, 2009, 29(2), 377-382

Actualmente, el principal uso de la DDGS es como alimento para el ganado, aunque se complementa con otros insumos para formular una dieta más completa. Las especies ganaderas más comunes que incluyen la burlanda en su alimentación son vacas, cerdos y aves de corral. Sin embargo, debido a su alto contenido de grasas, el límite máximo en la dieta animal es del 30%.⁵⁰

Existe otra alternativa, aunque poco común, que se lleva a cabo en Estados Unidos, donde la burlanda se utiliza para la fermentación de suelos. En este proceso, los microorganismos y hongos descomponen la materia orgánica de la burlanda para liberar nutrientes y compuestos orgánicos, enriqueciendo así el suelo. Aunque la burlanda tiene un buen contenido de carbono y nitrógeno, el porcentaje de lignina presente dificulta la fermentación eficiente, ya que es difícil de degradar.

La lignina es un polímero presente en la pared celular de las células vegetales que es más resistente a la degradación en comparación con otros componentes. Por lo tanto, se requiere realizar un pretratamiento químico o físico para facilitar su descomposición. Algunos de los tratamientos químicos incluyen el remojo en amoníaco acuoso seguido de una hidrólisis enzimática o ácida diluida, la expansión de fibra con amoníaco (AFEX) o simplemente una dilución ácida. Los tratamientos físicos que se pueden utilizar son la exposición al vapor, el ultrasonido o el agua electrolizada.⁵¹

Análisis de Mercado

El mercado de la DDGS está influenciado por varios factores. Los principales son los precios del cultivo del maíz, la demanda de la industria alimentaria del ganado, la industria de producción de etanol y los factores económicos y comerciales. En esta sección, se analizará el contexto del mercado de la burlanda y se explorarán otras alternativas aplicables.

La burlanda seca tiene como destino principal el sector ganadero, representando aproximadamente el 80% de su mercado. Sin embargo, se está comenzando a utilizar en otros sectores ganaderos, como la industria porcina y avícola. Es importante tener en cuenta que la burlanda no puede ser consumida en altas concentraciones debido a sus efectos nocivos.

⁵⁰ Bertona, A. Burlanda de Maíz o Sorgo, un subproducto que se incorpora en la dieta de los rumiantes. Cátedra de Agricultura Especial, Facultad de Ciencias Agrarias, UNCuyo.

⁵¹ Recuperado de: [Corn distillers dried grains with solubles: Production, properties, and potential uses - Mohammadi Shad - 2021](#)

A nivel mundial, los mayores productores de etanol, como Estados Unidos y Brasil, también son los principales productores de DDGS. En la siguiente *figura 3.1*, se muestra un mapa que indica, a través de una escala de colores, el comercio de este subproducto.

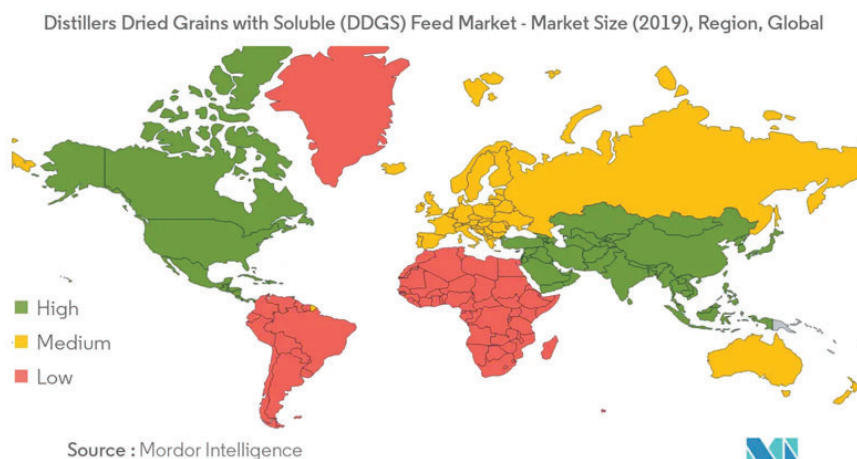


Figura 3.1. Mapa de mercado de la DDGS global.

Fuente⁵²

A partir de la imagen, se puede observar que en Latinoamérica, incluyendo Argentina, el mercado de la DDGS es relativamente pequeño en comparación con América del Norte. Por lo general, un mercado pequeño puede estar relacionado con una demanda acotada debido al tamaño reducido de la población o del público objetivo. Esto implica que el número de consumidores interesados en el producto o servicio puede ser limitado, lo que se traduce en una demanda más baja en comparación con mercados más grandes. En el caso de Argentina, la distribución de DDGS se concentra principalmente en la provincia de Córdoba, en un mercado regional.

En Argentina, las principales empresas productoras de biocombustibles están involucradas en el tratamiento de la vinaza para la producción de DDGS. Sin embargo, el uso de DDGS como alimento proteico es más económico en comparación con el expeller de soja que se utiliza habitualmente. Los precios de los DDGS se mantienen en niveles similares a los del maíz, mientras que el precio de la soja es considerablemente más alto y sigue una tendencia al alza junto con otros granos.

⁵² Recuperado de: ([Informe de mercado de alimentación de granos secos de destilería con solubles \(DDGS\) | Tamaño, participación, crecimiento y tendencias \(2023-28\)](#))

Debido a la participación obligatoria del etanol en las mezclas de nafta en Argentina, se espera un aumento significativo en la producción de etanol, que se mantendrá constante a lo largo del tiempo sin variaciones estacionales. Esto resultará en una mayor disponibilidad de co-productos como los DDGS. En el siguiente gráfico (*figura 3.2*), se muestran las empresas que compiten en la generación de DDGS.⁵³

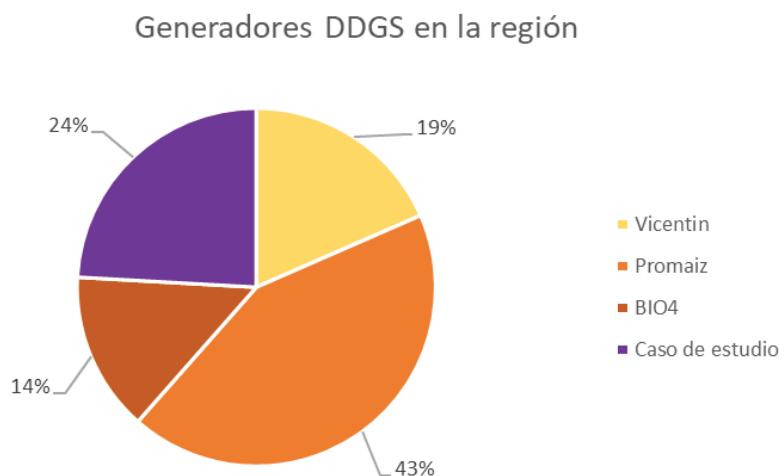


Figura 3.2. Porcentaje de participación de las empresas regionales en la generación y comercialización de DDGS en Argentina.

Fuente: Elaboración propia en base a la información oficial de las empresas.

En el caso de estudio, la producción de DDGS representa aproximadamente el 24% de la producción regional, lo que la posiciona como el segundo mayor productor en la región. Las empresas Promaiz y Vicentin son las más destacadas en la producción de DDGS, mientras que otras empresas se dedican exclusivamente a la exportación de este producto.

Por otro lado, la burlanda seca se enfrenta a la competencia de otros alimentos alternativos como el maíz, el sorgo, la soja y el trigo. En cuanto al precio de la DDGS, por lo general es similar al precio del maíz. La *figura 3.3* muestra un análisis de las fluctuaciones del precio del maíz a nivel internacional y nacional a lo largo de los años. Se puede observar que el costo de la DDGS está influenciado por el mercado internacional del maíz.

⁵³ Comparación de peso vivo con diferentes inclusiones de DDGS en dietas de pollos de engorde Autor: Álvarez, Santiago.



Figura 3.3. Gráfico con las fluctuaciones de los precios del maíz internacional y nacional.

Fuente⁵⁴

CAPÍTULO 4 : Determinación del Potencial Bioquímico Metanogénico (PBM)

El objetivo de este capítulo es definir el procedimiento que se va a realizar en el laboratorio para determinar la capacidad de generación de biometano de la WDGS para posteriormente diseñar un reactor adecuado al volumen producido por la industria para generar electricidad para su propio abastecimiento y comercialización regional; agregando un interés económico. Para ello, en primer lugar se describe brevemente el proceso de producción de biometano. Posteriormente se verá en detalle el procedimiento del ensayo PBM y las consideraciones tanto experimentales como operacionales. Se incluye una descripción de los diferentes ensayos y condiciones evaluadas junto con los resultados y un análisis de los mismos.

Producción de Biogás

El biogás es un producto de la descomposición anaeróbica de un sustrato orgánico. Su generación consta de 4 etapas donde actúan diferentes microorganismos anaeróbicos en un equilibrio simbiótico, donde el metabolito producido por uno sirve como sustrato del siguiente. Cada bacteria tiene su rango óptimo de temperatura y pH que afecta a la calidad

⁵⁴ INFORMES DE CADENAS DE VALOR Cereales: Maíz - Febrero 2019, L. Storti, Secretaría de hacienda, gobierno de la nación

del gas obtenido; que varía entre un 50 y 70% de metano. En el capítulo 5, se retoma con mayor nivel de detalle las características del biogás y todos los parámetros que lo afectan.

Las fases de la digestión anaeróbica son la hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis. Estos procesos están acompañados de sulfato reducción por parte de bacterias sulfato reductoras. Los compuestos orgánicos más complejos son transformados en carbohidratos monoméricos, aminoácidos, poligeles y AGCL que en la acidogénesis se convierten en ácidos orgánicos que en la acetogénesis son utilizados para generar por un lado acetato y por el otro, hidrógeno y dióxido de carbono. Finalmente, en la metanogénesis se utiliza esto para producir metano.

El proceso es muy complejo y a la vez sensible. Por lo tanto, se ha estudiado la existencia de compuestos cuya presencia y concentración tienen efectos inhibidores en la descomposición del sustrato y su posterior síntesis de metano. Uno de los principales ejemplos en este caso es la lignina, la cual influye en la generación de biogás ya que es un componente muy resistente a la descomposición anaeróbica a diferencia de los carbohidratos y grasas. Los ácidos grasos volátiles (AGV's), que se producen en la fermentación de sustratos orgánicos, también actúan como inhibidores de las bacterias metanogénicas ya que alteran el pH del medio; alejándose de la neutralidad. Existen aún más compuestos que pueden tener un impacto negativo dentro de un biodigestor. En la *tabla 4.1*, se detallan inhibidores del proceso y sus efectos, que se deben evitar para obtener óptimos resultados.

Tabla 4.1. Inhibidores de los procesos de descomposición anaeróbica.⁵⁵

Inhibidor	Concentración	Impactos
Oxígeno	> 0,1 mg/L	Inhibición de actividad de microorganismos anaerobios.
Amoniac libre	> 200 mgNH ₃ /L y >1100 mgNH ₃ /L en sistemas aclimatados	El efecto inhibitorio aumenta a medida que se eleva el valor del pH y temperatura. Gran adaptabilidad de las bacterias.
AGV's	>2000 mg HAc/L	El efecto inhibitorio aumenta a medida que cae el valor del pH. Gran adaptabilidad de las bacterias.
Sulfuro de hidrógeno	>50 mg H ₂ S/L	El efecto inhibitorio aumenta a medida que

⁵⁵ Inhibidores en procesos de descomposición anaeróbica y efectos perjudiciales. Fuente: Henza, 1995.

cae el valor del pH.

Metales pesados	Cu> 50 mg/L Zn> 150 mg/L Cr>100 mg/L	Solo los metales disueltos tienen efecto inhibitorio.
Desinfectantes y antibióticos	-	Efecto inhibitorio específico para el producto.

Es importante comprender los inhibidores mencionados en la tabla para estar atentos tanto a la hora de operar como de diseñar. Por eso también es fundamental conocer la composición del subproducto para saber de antemano que posibles problemas podemos atravesar durante la operación y como prevenirlos y contentarlos. Se puede apreciar especialmente la importancia del pH en el medio ya que tanto al elevarse como al caer se produce una inhibición de la actividad bacteriana.

Ensayo Potencial de Biometano (PBM)

Para poder realizar el estudio de prefactibilidad sobre el potencial de generación de biogás a partir de la WDGS, es ideal poder realizar un ensayo de potencial de biometano (PBM por sus siglas en inglés) en laboratorio. Este tipo de pruebas proporciona valiosa información con lo que respecta a la biodegradabilidad de sustratos tanto líquidos como sólidos, así como también su capacidad de generar metano en un biodigestor. El ensayo es llevado a cabo en lotes a escala laboratorio con condiciones controladas. Se introduce al sustrato específico junto con el inóculo dentro de un reactor cerrado y anaeróbico, en condiciones de mezcla y temperatura adecuada.

El ensayo permite evaluar la viabilidad económica de un proyecto de generación de biogás ya que se puede estimar la energía que se puede obtener del sustrato de interés a gran escala. También es útil para evaluar diferentes condiciones operacionales e identificar la configuración con mayor eficiencia.

La elaboración del ensayo requiere de una caracterización y acondicionamiento del sustrato. A su vez, el inóculo debe ser de procedencia conocida y previamente caracterizado. Las condiciones experimentales indican que método se utilizara para la cuantificación del metano, ya sea volumétrico, manométrico, cromatografía o de manera automatizada. Por otra parte, las condiciones operacionales comprenden un conjunto de parámetros físicos y químicos previamente definidos para llevar a cabo el ensayo. Por

ejemplo, temperatura, duración del ensayo, agitación, capacidad del reactor, pH y alcalinidad, nutrientes, etc. En particular, es fundamental evaluar parámetros clave como la relación sustrato e inóculo (S:I), Temperatura, pH y agitación.⁵⁶

Inóculo

El inóculo es determinante para la eficiencia de producción de metano. Es importante definir la procedencia y aclimatación del inóculo, su caracterización fisicoquímica, concentración inicial, cantidad y calidad. Las bacterias sulfato reductoras pueden significar un problema en la composición de biogás por la altas concentraciones de hidrógeno y sulfuro. El inóculo más adecuado debe provenir de reactores anaeróbicos.

La temperatura del ensayo es importante para definir si se utiliza un mesófilo, termófilo o una mezcla. Por otra parte, se debe realizar una caracterización para determinar el contenido de biomasa activa (SV/ST). Este dato es imprescindible para realizar el diseño experimental del ensayo. Adicionalmente, se recomienda realizar un ensayo de Actividad Metanogénica Específica (AME) del inóculo. Es una herramienta se utiliza para evaluar la capacidad de los microorganismos anaeróbicos para degradar el sustrato orgánico para convertir en CO₂ y CH₄ bajo condiciones controladas. En la *tabla 4.2* se listan los valores recomendados que debe poseer el inóculo.

Tabla 4.2. Valores recomendados para los parámetros del inóculo.⁵⁷

Parámetro	Rango recomendado	Unidad
pH	7-8,5	upH
AGV	<1	gCH ₃ COOH/L
N-NH ₄	<2,5	gN-NH ₄ /L
Alcalinidad	>1,5	gCaCO ₃ /L
AME	>0,1	gDQO/gSSV.d
Concentración	15-20	gSV/L

⁵⁶ BIORREACTOR DE DIGESTIÓN ANAEROBIA PARA LA DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL BIOQUÍMICO DE METANO (BMP). NIXON DARÍO ALFONSO PACHÓN Trabajo de grado presentado como requisito para optar el título de MAGISTER EN INGENIERÍA DE BIOPROCESOS

⁵⁷ Patricia Bres, María Eugenia Beily & Diana Crespo (2022) "Ensayo potencial bioquímico metanogénico: Una metodología clave para conocer la energía de las biomasas"

Sustrato

Los sustratos que se implementan para la generación de biogás pueden provenir de diversas fuentes, ya sean efluentes líquidos o residuos sólidos. Entre los más recomendados para el proceso de digestión anaeróbica se encuentran los residuos orgánicos húmedos de origen agrícola, industrial y doméstico. Previo a la realización del ensayo, es esencial caracterizar al sustrato, ya que es posible que su composición pueda influir negativamente en el metabolismo anaeróbico.⁵⁸

Idealmente, en la caracterización del sustrato, se debe realizar una determinación general de la composición, incluyendo sólidos totales (ST), sólidos volátiles (SV), DQO y nitrógeno y fósforo. Estos valores permiten estimar la relación DQO/SV, comúnmente utilizada en la caracterización de sustratos. En este caso, se va a analizar tanto la burlanda húmeda, que al ser un semisólido complica la medición de DQO. El contenido de lignina es otro dato crucial a analizar junto con la hemicelulosa y la celulosa ya que su degradabilidad no contribuye al potencial del biogás. Estos datos son más complejos de determinar en laboratorio, por lo tanto, la información de los mismos se obtiene a partir de los datos bibliográficos. Según la bibliografía, el contenido de lignina es entre un 3 y 4%. Por otro lado, se recomienda en el caso de los sólidos, que el tamaño de partícula se aproxime a 1 cm. Esto es importante para la etapa de la hidrólisis ya que es limitada por la cinética del proceso.⁵⁹

Con los resultados obtenidos de la caracterización, es posible tomar medidas previas al ensayo para mejorar la generación de biogás. Conociendo por bibliografía las características de la WDGS, se espera la presencia de lignina y AGV's. En efecto, algunas sugerencias a tomar para prevenir inconvenientes son diluir el sustrato con agua para reducir la concentración de AGV y equilibrar el contenido de nutrientes. También se podría aplicar un pretratamiento térmico, como pasteurización o termofilización, para degradar los AGV y otros compuestos inhibidores. La adición de sustancias alcalinas, como hidróxido de calcio o ceniza, podría elevar el pH para neutralizar los AGV's. Estas estrategias contribuyen a optimizar el rendimiento del proceso anaeróbico.

⁵⁸ [Determinación del potencial bioquímico de metano \(PBM\) de residuos de frutas y verduras en hogares \(scielo.org.mx\)](https://scielo.org.mx/)

⁵⁹ [Determinación del potencial bioquímico de metano \(PBM\) de residuos de frutas y verduras en hogares \(scielo.org.mx\)](https://scielo.org.mx/)

Condiciones operacionales

Como se mencionó al comienzo de este capítulo, el ensayo se realiza a escala laboratorio en batch con volúmenes desde 100mL hasta 2 L compuesto por la fase sólida/líquida (volumen útil) y el gas (volumen libre). Se recomienda operar de manera tal de que el volumen libre ocupe entre el 20 al 25% del reactor y realizar duplicados.

El blanco en este caso determina la producción de metano del inóculo. En lugar de sustrato, se utiliza agua destilada. La producción del blanco se resta a la de cada reactor para poder aislar la generación de metano producido por el sustrato. Además, se prepara un reactor control, que está constituido por el inóculo y un sustrato con una producción de metano conocida. Usualmente se suele utilizar celulosa o acetato de sodio. La importancia de este reactor radica en obtener una respuesta del inóculo para la degradación de un sustrato estándar y permite asegurar que efectivamente es capaz de metabolizar.

Los tiempos de duración del ensayo rondan los 30 días, ya que a partir de este día puede iniciar la fase de estabilización en la producción de metano, habiendo generado un 90% del total de producción teórica. En cuanto a la temperatura, si bien se puede operar en rangos mesófilos y termófilos; abarcando un rango entre 35 y 55 °C, es más conveniente trabajar en rango mesofílico para disminuir el requerimiento energético para alcanzar la temperatura óptima, menos sensibilidad a las cargas de choque y sintetización de sustancias tóxicas como el amonio y ácidos de cadena larga.

La agitación es fundamental para la promoción de la metanogénesis. Unifica la mezcla del sustrato fresco con los microorganismos, unifica la densidad y previene la formación de espumas. Es importante determinar si la agitación es continua o intermitente ya que el exceso puede dañar el equilibrio simbiótico dentro del reactor. La metodología de agitación determina la concentración de inóculo; la concentración recomendada es de 1.5gSVL sin agitación y de 2 a 5 g con agitación.⁶⁰

Reiterando el impacto del pH en la producción de metano, el rango óptimo para el ensayo debe rondar entre 7 y 7.8 unidades.⁶¹ De esta manera, se puede garantizar la

⁶⁰ Cárdenas-Cleves, L. M., Parra-Orobio, B. A., Torres-Lozada, P., & Vásquez-Franco, C. H. (2016). Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. Revista ION, 29(1), Universidad Industrial de Santander.

⁶¹ Cárdenas-Cleves, L. M., Parra-Orobio, B. A., Torres-Lozada, P., & Vásquez-Franco, C. H. (2016). Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. Revista ION, 29(1), Universidad Industrial de Santander.

actividad metabólica de las arqueas metanogénicas. Valores del pH fuera del intervalo 6-8 hacen el proceso inviable debido a la elevada toxicidad de las formas no ionizadas de los ácidos volátiles y del amoníaco predominantes por debajo y por encima respectivamente de esos valores. Para ajustar el pH se suelen adicionar alcalinizantes como sales de sodio, proporcionando capacidad buffer para neutralizar los ácidos grasos volátiles (AGV's). Para comprender mejor los resultados obtenidos, se recomienda medir simultáneamente el pH, AGV's y alcalinidad total.

Un medio nutritivo es fundamental para el metabolismo de los microorganismos. Existen soluciones compuestas por macro y micronutrientes y otras con vitaminas. Además, se agregan otras sustancias como agentes reductores para prevenir condiciones aeróbicas. La mezcla es gaseada con 80%/70% N₂ - 20 %/30% CO₂. La solución recomendada para el ensayo de PBM es la siguiente; véase *tabla 4.2*.

Tabla 4.2. Solución recomendada de nutrientes para el ensayo PBM.⁶²

Macronutrientes		Micronutrientes		Otros	
Compuest o	Concentraci ón	Compuesto	Concentración	Compuesto	Concentració n
NH ₄ Cl	170 gL ⁻¹	MgSO ₄ .4H ₂ O	9 gL ⁻¹	Agente reductor Na ₂ SO ₃ .7H ₂ O	100 gL ⁻¹
KH ₂ PO ₄	37 gL ⁻¹	CaCl ₂ .2H ₂ O	8 gL ⁻¹		
		NaHCO ₃	1000 mgL ⁻¹	Indicador de potencial redox (resazurina)	0,5 gL ⁻¹
		FeCl ₃ .6H ₂ O	2000 mgL ⁻¹		
		ZnCl ₂	50 mgL ⁻¹	Extracto de levadura	0,2 gL ⁻¹
		CuCl ₂ .2H ₂ O	30 mgL ⁻¹		
		MnCl ₂ .4H ₂ O	500 mgL ⁻¹		
		(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ .4H ₂ O	90 mgL ⁻¹		
		AlCl ₃ .6H ₂ O	50 mgL ⁻¹		
		CoCl ₂ .6H ₂ O	2000 mgL ⁻¹		

⁶² Cárdenas-Cleves, L. M., Parra-Orobio, B. A., Torres-Lozada, P., & Vásquez-Franco, C. H. (2016). Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. Revista ION, 29(1), Universidad Industrial de Santander.

	NiCl ₂ ·H ₂ O	50 mgL ⁻¹
	H ₃ BO ₃	50 mgL ⁻¹
	Na ₂ SeO ₃ ·5H ₂ O	100 mgL ⁻¹
	EDTA	1000 mgL ⁻¹
	HCl 36%	1 mL ⁻¹

La presencia de este último incrementa hasta un 20% la producción de metano. Para evitar que el CO₂ generado en el proceso interfiera con la medición de metano, se adiciona una solución alcalina de NaOH para capturar el gas. Esta técnica se utiliza tanto para el método volumétrico o manómetro pero de distintas maneras. En el segundo caso, se introduce la soda cáustica sólida en lugar de solución.

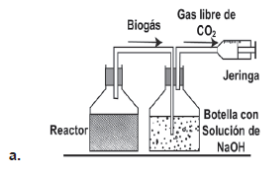
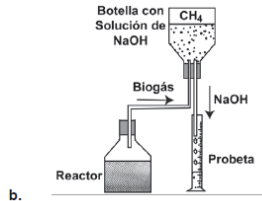
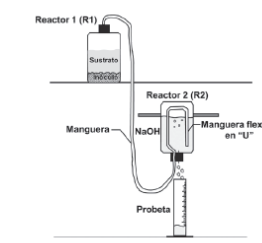
La relación sustrato/inóculo (S/I) tiene su valor óptimo para cada sustrato. No obstante, las configuraciones típicas son las relaciones dentro del rango desde 0.5 y 2 gSV_{sustrato}/gSV_{inóculo}. Algunas consideraciones para definir el valor de la relación S/I tienen que ver con los sólidos totales del reactor y la producción potencial de AGV's y su capacidad de amortiguamiento. Es importante tener en cuenta los sólidos si se quiere diseñar a gran escala por la limitante mecánica de las operaciones unitarias como el bombeo y el sistema de mezclado. Adicionalmente, una elevada proporción de sólidos totales dentro del reactor pueden implicar una limitación para la movilidad de las bacterias metanogénicas; repercutiendo en la generación de biogás. Experimentalmente se estima que para digestores semicontinuos, el porcentaje de sólidos totales no debe superar el 12%, mientras que los discontinuos rondan entre el 40 y el 60%.⁶³

Condiciones Experimentales

Como se mencionó anteriormente, existen diferentes métodos de medición para el metano; volumétricamente, manométricamente, por cromatografía o implementando métodos automatizados. En el primer caso, la cuantificación se da mediante el desplazamiento. Si bien es una técnica que representa un bajo costo operativo, hay mayores riesgos de fuga, de obtención de resultados no representativos y errores humanos. Este último riesgo disminuye cuando se aplica el método manométrico. Algunos beneficios

⁶³ Prof. María Teresa Varnero Moreno Manual de biogás, Santiago de Chile (2011)

que presenta además, son los registros continuos de datos y su automatización. No obstante, no deja de ser una medición indirecta y precisa de cálculos para definir el volumen generado. Adicionalmente, en este caso hay mayores costos tanto de adquisición como de mantenimiento y tiene una limitante por la presión límite de funcionamiento. A continuación, se muestra un esquema de los métodos volumétrico, manométrico y cromatográfico; *figura 4.1.*

MÉTODO	CONFIGURACIÓN BÁSICA	VENTAJAS	LIMITACIONES
VOLUMÉTRICO	a. 	✓ Simplicidad y bajos costos. ✓ Medición directa del contenido de CH_4 en el biogás empleando una solución alcalina que captura el CO_2.	✗ Microfugas en los equipos pueden incrementar la producción real de CH_4.
	b. 	✓ Configuraciones experimentales de bajo costo que pueden ser implementadas en cualquier laboratorio ✓ Capacidad de trabajar por largos periodos sin necesidad de mantenimiento.	✗ 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.
	c. 	✓ 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.	✗ Verificación continúa de la cantidad y el pH de la solución alcalina desplazante.

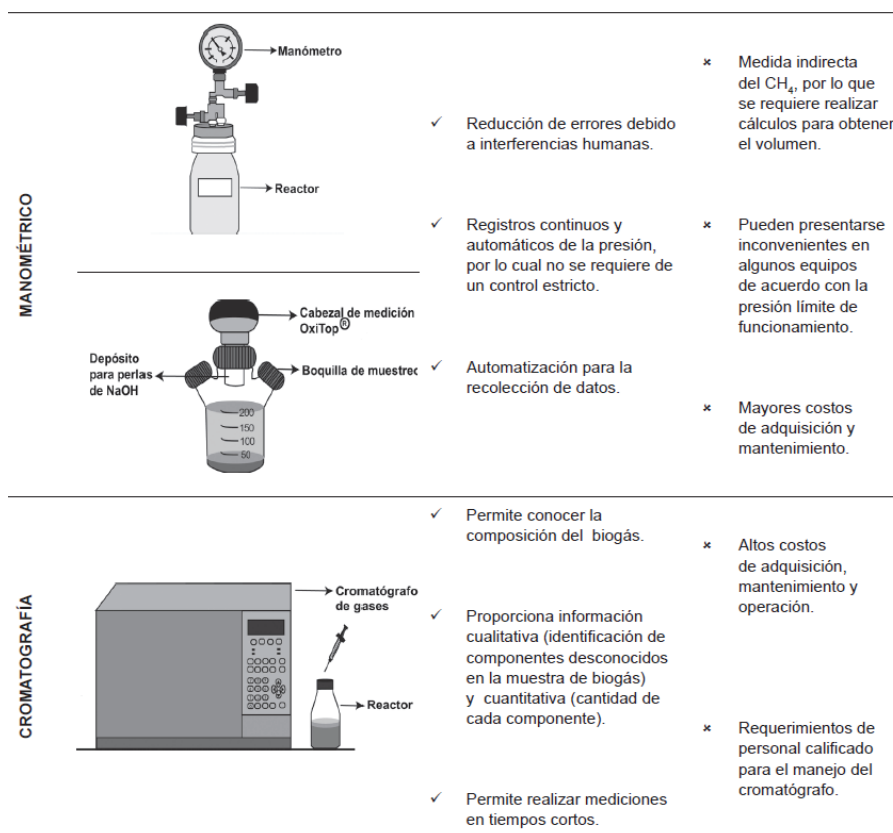


Figura 4.1. Metodologías de determinación de PBM.

Fuente⁶⁴

El método cromatográfico sirve para identificar qué fracción del gas generado en la digestión es metano, aunque puede ser reemplazado por una captura de dióxido de carbono para aislar al metano. Para poder realizar este método se necesita exclusivamente un personal calificado. Por último, se tiene al método volumétrico automatizado. Está compuesto por tres unidades funcionales que cumplen diferentes roles. En la *figura 4.2* que se muestra a continuación se pueden identificar cada una.⁶⁵

⁶⁴ Cárdenas-Cleves, L. M., Parra-Orobio, B. A., Torres-Lozada, P., & Vásquez-Franco, C. H. (2016). Perspectivas del ensayo de Potencial Bioquímico de Metano - PBM para el control del proceso de digestión anaerobia de residuos. Revista ION, 29(1), Universidad Industrial de Santander.

⁶⁵ Vicerrectoría de Investigación y Extensión Dirección de Proyectos Escuela de Química Informe final proyecto Cuantificador automático de metano para la estimación del potencial energético de un sustrato celulósico M.Sc. Teresa Salazar Rojas, coordinadora. Ing. Nicolás Vaquerano Pineda. Ing. María Porras Acosta. Junio 2016



Figura 4.2. Equipo de medición volumétrica automatizada.

Fuente⁶⁶.

En la primera unidad, se introducen los reactores que contienen al sustrato junto con el inóculo con su respectiva relación S/I. Todos los reactores mantienen una misma temperatura y agitación constante gracias a que se encuentran dentro de un baño termostático compartido y por la configuración electrónica de los dispositivos. Desde cada reactor se genera el biogás, el cual fluye hacia la segunda unidad; la absorción de dióxido de carbono. El propósito de este equipo es purificar el metano presente en el gas para finalmente ser contabilizado en el equipo de medidor de volumen que corresponde a la última unidad que compone al sistema.

Aunque esta técnica no proporciona información de la composición precisa del biogás y cuenta con un mantenimiento propio de las metodologías automatizadas, presenta numerosas ventajas frente a los métodos convencionales. En primer lugar, reduce notablemente los errores al evitar la manipulación manual en cada etapa. Su sencillez y simplicidad se deben a la recolección automatizada de datos con una alta calidad. Además, resulta ser un método ideal para comparar diferentes relaciones S/I o pretratamientos ya que se replican las condiciones de manera idéntica en cada reactor al mismo tiempo. Gracias a sus características y beneficios, se ha seleccionado este método para llevar a cabo el ensayo PBM.

Determinación del PBM

⁶⁶ Bioprocess Control Manual AMPTS II & AMPTS II Light Automatic Methane Potential Test System.

Con las mediciones obtenidas experimentalmente, se procederá a calcular la generación de potencial biometano. Para obtener dicho resultado, primero se deberá calcular la concentración de sólidos volátiles dentro de cada reactor ($mSV_{Reactor}$) según se indica en la siguiente *ecuación 4.1*. Este parámetro es esencial para cuantificar la cantidad de materia orgánica presente, específicamente la fracción volátil en cada reactor.

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

(Ecuación 4.1)

Donde,

$mSV_{Reactor}$: masa de sólidos volátiles en la mezcla del reactor (g)

$SV_{Sustrato}$: concentración de sólidos volátiles del sustrato (% m/m)

m_s : masa de sustrato agregada en el reactor (g)

$SV_{Inóculo}$: concentración de sólidos volátiles del inóculo (% m/m)

m_i : masa de inóculo agregada en el reactor (g)

Con la obtención del dato, se procede a estimar el PBM para cada reactor mediante las indicaciones de la siguiente *ecuación 4.2*. Este paso es crucial para determinar la generación de biometano en cada reactor. Con los datos que se obtengan a partir de este cálculo, se puede evaluar cuantitativamente el rendimiento de cada relación S/I definida.

$$PBM = \frac{V_S - V_B \cdot \frac{m_i}{m_{ib}}}{mSV_{Reactor}}$$

(Ecuación 4.2)

Donde,

PBM : volumen normalizado de metano por gramo de sólidos volátiles agregados (NI/gVS).

V_S : volumen acumulado de metano proveniente del reactor con muestra (ml).

V_B : volumen acumulado de metano proveniente de los blancos (ml).

m_{ib} : es el valor medio de la masa de inóculo colocada en los blancos (g).

$mSV_{Reactor}$: masa de sólidos volátiles en la mezcla del reactor (g).

Por otra parte, se aplica la *ecuación 4.3.* para calcular el volumen de metano productivo. De esta manera se obtiene información detallada sobre la producción real de metano en el proceso de digestión anaeróbica.

Materiales y métodos

Sustrato

Las muestras fueron provistas por una productora de bioetanol situada en San Pedro, Provincia de Buenos Aires. La WDGS fue generada el día 4 de Octubre de 2023 y se mantuvo conservada a 4°C hasta la realización de los ensayos. Además, para preparar los reactores según la relación S/I establecida con mayor precisión, se llevó a cabo una caracterización de los diferentes tipos de sólidos en el sustrato.

Determinación del pH

Para la determinación del pH de las muestras se pesaron en 2 vasos de precipitados 10 gramos de WDGS. Posteriormente, se le agregaron 50 ml de agua destilada a cada vaso. Las muestras se midieron con un pHímetro Extech modelo pH220 previamente calibrado con soluciones buffer de pH 7.00 y 4.00. Al finalizar, se realiza un promedio de los valores obtenidos para tener un resultado representativo.

Determinación de sólidos totales (ST) y volátiles (SV)

En una primera instancia, se rotularon y se pesaron 2 crisoles en una balanza de precisión para obtener la tara de los mismos. Posteriormente, se colocaron 2 g de WDGS cruda en cada uno de los crisoles.

Los primeros datos en obtenerse son el % de humedad y la concentración de sólidos totales (ST). Para ello se introdujeron ambos crisoles dentro de una estufa a 105°C hasta alcanzar un peso constante. Se pesaron en intervalos de 2 horas de estufa mas 15 minutos en campana de desecación. Habiendo pesado previamente cada crisol, se estima la concentración de ST (g/g) y el % de humedad como se indica en las siguientes *ecuaciones 4.4 y 4.5.*

$$ST(g/g) = \frac{P_{estufa} - P_{crisol}}{P_{WDGS}}$$

(Ecuación 4.4)

$$\%H = \frac{P_{WDGS} - P_{estufa} - P_{crisol}}{P_{WDGS}} \times 100\%$$

(Ecuación 4.5)

Donde,

P_{estufa} : Peso constante obtenido luego del secado en la estufa (g).

P_{crisol} : Peso de la tara del crisol (g).

P_{WDGS} : Peso de la WDGS inicial (g).

ST: Concentración de sólidos totales (g/g).

%H: porcentaje de humedad.

El siguiente paso de la caracterización es la calcinación. De esta manera se obtienen los datos de la concentración de los sólidos volátiles (SV) y los sólidos fijos (SF). Para ello, se colocan los crisoles con la muestra seca y son introducidos dentro de una mufla a 550°C durante una hora. Transcurrido el tiempo más 15 minutos extra para el enfriamiento, se obtiene el peso de la muestra calcinada. Con este dato, se calculan los sólidos mencionados según se indica a continuación.

$$SF (g/g) = \frac{P_{mufla} - P_{crisol}}{P_{WDGS}}$$

(Ecuación 4.6)

$$SV(g/g) = \frac{P_{estufa} - P_{mufla}}{P_{WDGS}}$$

(Ecuación 4.7)

Donde,

P_{estufa} : Peso constante obtenido luego del secado en la estufa (g).

P_{crisol} : Peso de la tara del crisol (g).

P_{mufla} : Peso del crisol con la muestra luego de la calcinación (g).

ST: Concentración de sólidos totales (g/g).

SF: Concentración de sólidos fijos (g/g).

SV: Concentración de sólidos volátiles (g/g).

La caracterización se realizó por duplicado para asegurar que los datos obtenidos sean más representativos. Para la interpretación de los resultados, se realiza un promedio de ambos.

Inóculo

El inóculo fue provisto por el INTI. Corresponde a una muestra extraída del digestor anaeróbico de barros primarios y secundarios de una de las plantas depuradoras de efluentes cloacales de AySA.

Ensayo PBM

Pretratamiento de las muestras

Con el fin de identificar las mejores condiciones del digestor anaeróbico para una máxima obtención de metano, se evaluaron diferentes condiciones en los reactores aplicando diferentes pretratamientos. En una primera instancia se prepararon 9 reactores con un volumen final de inóculo + sustrato de 320 ml. En esta evaluación se analizó el comportamiento de la generación del biogás de la WDGS cruda para diferentes relaciones S/I por duplicado. Se llevó cada reactor a pH cercano a la neutralidad, con una temperatura constante de 35°C y agitación discontinua de 80 segundos cada 30 minutos a 160 rpm. En la *tabla 4.3* a se presentan qué relación S/I y la descripción que contiene cada uno de los reactores.

Tabla 4.3. Descripción de contenido de cada reactor del ensayo.

Reactor	Relación S/I	Descripción	Reactor	Relación S/I	Descripción
1	-	Blanco	4-5	0,5	WDGS crudo
2	-	Blanco	6-7	1	WDGS crudo
3	2	Control	8-9	2	WDGS crudo

Los reactores 1 y 2 corresponden a los blancos, mientras que el reactor 3 es el control. Para este último, se utilizó una solución de celulosa con una relación S/I de 2.

Inicio del ensayo

Se utilizó el equipo AMPTS II de bioprocess control para el desarrollo del ensayo. Se utilizaron reactores con una capacidad de volumen igual a 500 ml.

Se rotula cada reactor y sus respectivas tapas. Posteriormente, se introducen los gramos de inóculo y sustrato definidos para cada caso y se llevan a pH 7. Se cierran los reactores con un tapón plástico. Se fija la barra del agitador y se introducen a todos los reactores en el baño de agua. Luego se conectan cada uno a las botellas de absorción de dióxido de carbono y a las celdas de flujo. Se debe conectar los contactos para la agitación a los motores individuales y después al dispositivo de medición del volumen de gas. Se debe conectar el cable Ethernet a la red o computadora y al dispositivo de medición de gas. Finalmente, se conecta la fuente de alimentación a la pared y al dispositivo de medición del volumen.

Todos los reactores reciben un barrido del oxígeno presente con nitrógeno gaseoso durante 1 minuto mediante las entradas adicionales de las tapas. Esta acción implica un impacto en la cuantificación final del equipo, ya que puede ocurrir una sobreestimación de la producción de gas; se pueden detectar tanto el biogás como el nitrógeno junto a medida que se va generando. Adicionalmente, en la segunda unidad funcional, no es posible absorber el nitrógeno. Por ende, se aplica la siguiente fórmula para corregir el volumen sobreestimado, teniendo en cuenta que el barrido se realizó previo a la largada del ensayo.

$$V_{OE,i} = \Delta X_{N_2} \cdot V_{HS} \cdot \Delta X_{CO_2}$$

(Ecuación 4.8)

Donde,

$V_{OE,i}$: Volumen sobreestimado en el punto

$V_{\Delta X CO_2}$: Fracción de CO_2

$V_{\Delta X N_2}$: Fracción de N_2

V_{HS} : Volumen del head space; diferencia de volumen entre el reactor y la mezcla de inóculo y sustrato

Una vez reemplazado el aire dentro de los reactores, se conectan los tubos a las unidades correspondientes y se enchufan los sistemas de agitación automática. Finalmente,

se configura desde la computadora la largada del ensayo donde se comienzan a registrar los primeros datos.

Resultados

Caracterización inicial

Se obtuvo un pH de 3,90 por un lado y 3.96 para el duplicado. En promedio, se obtiene un valor de pH igual a 3.93.

Los resultados obtenidos para la caracterización de la burlanda se listan en la *tabla 4.4*, donde se incluye el promedio de ambos crisoles. Estos valores son los que se utilizarán más adelante para estimar las proporciones de sustrato e inóculo en los reactores del ensayo PBM. En la tabla se indica el peso de la WDGS pesado en gramos por crisol, el % de humedad y las concentraciones de los ST, SV y SF en g/g.

Tabla 4.4. Caracterización de la WDGS en laboratorio.

	WDGS (g)	Humedad (%)	ST (g/g)	SV (g/g)	SF(g/g)
Crisol 1	2,1461	65,46	0,35	0,33	0,01
Crisol 2	2,1446	65,53	0,34	0,33	0,01
Promedi o	2,1454	65,50	0,35	0,33	0,02

Se pueden clasificar a los sustratos en cuatro clases según el porcentaje de sólidos totales presentes. Es fundamental identificar la clase ya que nos permite seleccionar el tipo de digestor más adecuado para su degradación. Cuando un sustrato tiene cuantitativamente más de un 20% de ST, son de clase 1. Otros compuestos pertenecientes a esta categoría son el estiércol sólido, los residuos domésticos y restos de cosecha. Este tipo de sustrato puede ser eficientemente degradado en biodigestores tipo batch o por lote, donde el % ST suele rondar entre un 40 y un 60% como se mencionó previamente.⁶⁷

⁶⁷ Prof. María Teresa Varnero Moreno "Manual de biogás", Santiago de Chile (2011)

Por otra parte, en la *tabla 4.5* se indican las concentraciones de ST, SV y SF del inóculo. En este caso, al tratarse de un líquido, la concentración de sólidos totales presentes es considerablemente menor a la WDGS. El porcentaje de ST en el inóculo es del 3%, mientras que los volátiles y fijos componen a este en un 2% y un 1% respectivamente.

Tabla 4.5. Caracterización del inóculo de AySA.

	Inóculo (g)	ST (g/g)	SV (g/g)	SF (g/g)
Muestra 1	1	0,03	0,02	0,01
Muestra 2	1	0,03	0,02	0,01
Promedio	1	0,03	0,02	0,01

Los resultados obtenidos mostraron una notable uniformidad entre los duplicados tanto para el inóculo, como para los sustratos. Esta semejanza aumenta la representación y la confianza de los datos recopilados. Con la información de las *tablas 4.4* y *4.5*, se procederá a diseñar la composición teórica de los reactores para la preparación y ejecución del ensayo PBM.

Ensayo PBM

Preliminares

En primer lugar, mediante la implementación de los datos obtenidos experimentalmente del apartado anterior, se procede a establecer las proporciones de sustrato e inóculo dentro de los reactores del equipo. Para ello, se tuvieron en cuenta los porcentajes de sólidos volátiles en cada componente y la relación S/I establecida en cada caso. Para facilitar la comprensión, se expresan las ideas en las siguientes *ecuaciones 4.9* y *4.10*.

$$SV_s * S = r * SV_i * I$$

(Ecuación 4.9)

$$S + I = 320 \text{ g}$$

(Ecuación 4.10)

Donde:

SV_s : Sólidos volátiles del sustrato (gs/gm).

r : relación S/I

SV_i : Sólidos volátiles del inóculo (gs/gi).

S: WDGS (g).

I: Inóculo (g).

Habiendo realizado los cálculos de las ecuaciones previas, el contenido de los 9 reactores queda definido según se indica en la *tabla 4.6*. Además, se indica en la tabla los gramos de sólidos volátiles del sustrato y del inóculo, como también el % de sólidos totales correspondiente a cada reactor y la relación entre S/I seleccionada. Como se indicó en la *tabla 4.3*, los 9 reactores están compuestos por 2 blancos, un control y 6 reactores con diferentes relaciones S/I por duplicado.

Tabla 4.6. Composición teórica de los reactores para el ensayo PBM.

Reactor	Masa (g)			S/I (gSV_s/gSV_i)	Sólidos Volátiles (g)		% ST
	Sustrato	Inóculo	Mezcla		Sustrato	Inóculo	
1-2	0	320	320	-	-	-	3,00
3	34,25	285,75	320	2	11,43	5,71	6.25
4-5	9,31	310,69	320	0,5	3,11	6,21	3,88
6-7	18,09	301,91	320	1	6,04	6,04	4.73
8-9	34,25	285,75	320	2	11,43	5,71	6.25

El ensayo inició a las 9 a.m. del Lunes 23 de Octubre y fue realizado en el INTI. El pH y los pesos de sustrato e inóculo de cada reactor se muestran en la *tabla 4.7*. Dado que el armado de los reactores es un proceso experimental y está sujeto a error por mano humana, se incluyen las relaciones S/I de las mediciones en laboratorio para un análisis más detallado. Adicionalmente, en el caso de los reactores 8 y 9, al tener mayor concentración de sustrato, presentaron un menor pH, que fue corregido introduciendo alícuotas de base fuerte; en este caso NaOH.

Por otra parte, conociendo los volúmenes finales de la mezcla dentro de cada reactor, se estimó el volumen del headspace (V_{HS}). El headspace o cámara de gas es el volumen libre de líquido dentro del reactor. Los rangos recomendados del headspace son entre 20-60 % del volumen total. Además, es un dato indispensable para calcular la corrección por el flushing de N_2 . El cálculo se llevó adelante mediante la diferencia del volumen del reactor (500 ml) y el volumen final de la mezcla en cada caso. Para calcularlo, se adoptó una densidad de 1 mg/l, para pasar los gramos de mezcla a unidades de volumen. En el presente caso, el porcentaje de V_{HS} es alrededor del 35% del reactor.

Tabla 4.7. Composición experimental de los reactores para el ensayo PBM.

Reactor	Masa (g)			S/l (gSV _s /gSV _i)	Sólidos Volátiles (g)		pH	V_{HS} (ml)
	Sustrato	Inóculo	Mezcla		Sustrato	Inóculo		
4	9,3	313,3	322,6	0,5	3,10	6,27	7,28	177.4
5	9,3	311,5	320,8	0,5	3,10	6,23	7,30	179.2
6	18,1	301,9	320	1	6,04	6,04	7,13	180
7	18,1	301,9	320	1	6,04	6,04	7,14	180
8	34,3	285,8	320.1	2	11,45	5,72	7,14*	179.9
9	34,3	285,8	320.1	2	11,45	5,72	7,18*	179.9

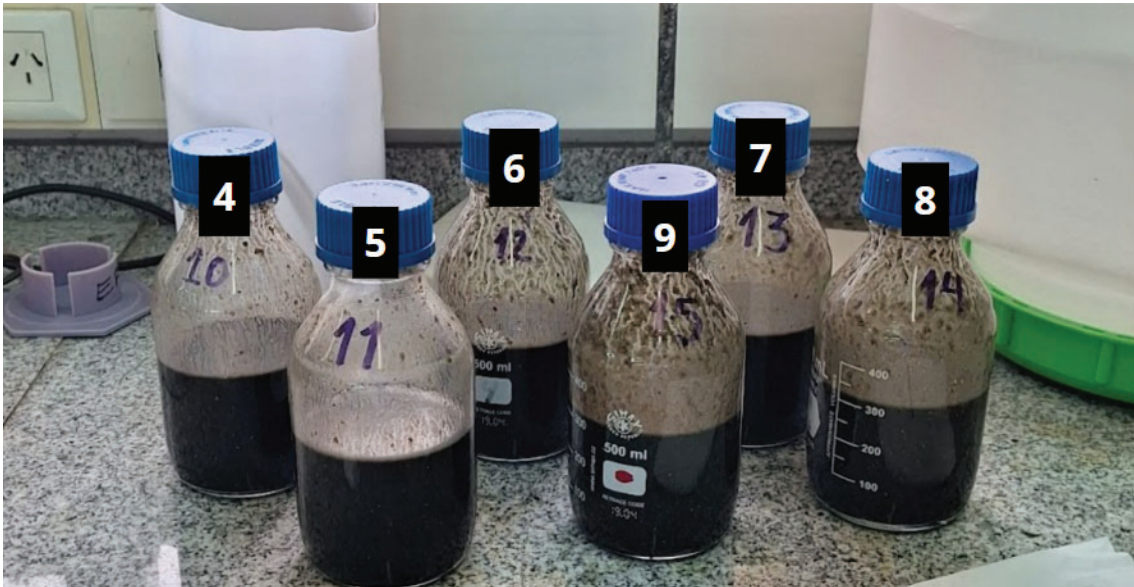
*Ambos reactores tuvieron un pH inicial de 6,92.

V_{HS} : Volúmen de Head Space

A continuación se muestra una imagen de los 6 reactores rotulados del 4 al 9. Se observa que tienen una tapa de color azul que mas adelante fue remplazada por una tapa adherida a un agitado con 2 aberturas. Una de ellas se utilizó para burbujear el gas N_2 y asegurar las condiciones anaerobias. Por otro lado, el siguiente orificio estaría conectado a la trampa de CO_2 , compuesta por una solución de NaOH 3M. A su vez, dicha unidad se conecta al medidor automatizado de volumen.

En la segunda *figura 4.2 A y B* se muestra el equipo armado de derecha a izquierda. Se muestra la cámara con agua caliente donde se colocan los reactores con sus equipos de agitación. Junto a ellas, se observa el equipo de absorción de CO_2 y finalmente el detector de volumen. También, se puede apreciar el un monitor, que es donde se van registrando los

datos del medidor y se van generando las curvas de generación de metano según el tiempo transcurrido.



Figuras 4.2.A y B. La primera muestra los seis reactores compuestos por el inóculo y sustrato a diferentes relaciones S/I. La segunda es el equipo armado.

Después de 34 días, con un total de 831 horas, concluyó el ensayo. La *figura 4.3* muestra un gráfico que ilustra la evolución de la generación dentro de cada reactor a lo largo del tiempo, relevando diferentes volúmenes acumulados para cada caso. Asimismo, se destaca en particular la similitud en el comportamiento de las curvas que pertenecen a las mismas relaciones S/I. Esta observación es un buen indicio de la representatividad de

los resultados. Por otra parte, en la misma figura se agrega el volumen acumulado del blanco.

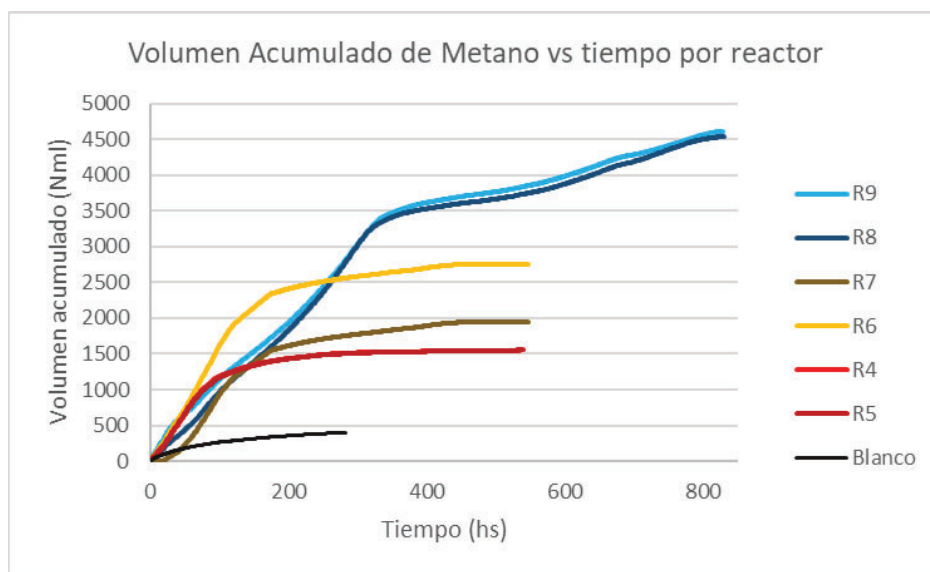


Figura 4.3. Gráfico con los volúmenes acumulados de metano con el pasar del tiempo en horas.

Fuente: Elaboración propia.

La imagen muestra cuatro grupos principales de curvas: la R9 y R8 con tonos azules que corresponde a las relaciones S/I iguales a 2, las R7 y R6 con tonos amarillentos que representan el volumen generado en base a una relación S/I igual a 1, las líneas rojizas R15 y R4 de la relación S/I 0,5 y finalmente el blanco. A simple vista se puede apreciar que las curvas azuladas son las que generaron un mayor volumen acumulado y, a su vez, mantuvieron actividad microbiológica durante más tiempo. Incluso, por el carácter de las curvas, continuarán generando pasado los 34 días de ensayo.

Para las relaciones S/I iguales a 1 lo que llama la atención en un principio es la disparidad entre los duplicados. En la línea amarilla exhibe una pendiente de crecimiento mucho mayor, mientras que en el caso de la curva del reactor 7 ocurre lo contrario. Esta diferencia puede ser atribuida a errores prácticos en el armado o la elaboración del ensayo. Por último, los resultados que demuestran un comportamiento más similar, son para las curvas de tono rojo correspondientes a la relación 0,5. Ambas demuestran una buena pendiente de crecimiento inicial, pero ambas se aplanan en un periodo menor en comparación a las demás. En términos de la duración del ensayo, se destaca que las curvas que corresponden a las relaciones S/I iguales a 0,5 y 1 concluyen con la generación de gas casi a la mitad del tiempo en comparación con las curvas de S/I igual a 2. Ambas alcanzan su máximo en aproximadamente 22 días. Teniendo en mente estas diferencias

cualitativas, se procede al análisis cuantitativo de los valores de PBM para determinar cuál de las relaciones es la más eficiente para diseñar la digestión de la WDGS.

Considerando que se utilizaron 400 g de inóculo para la medición de los blancos con un V_{HS} de 100 mL, se calcula la corrección según la *ecuación 4.8*. Con los blancos corregidos, se calcula y se muestra el PBM obtenido para cada reactor en el gráfico de la *figura 4.4*. A simple vista se puede apreciar resultados positivos y similares para las diferentes relaciones S/I a excepción del reactor 7 (S/I: 1) con un PBM de 260,1 Nml/g SV_s a diferencia del reactor 6 con igual relación, que obtuvo un valor de 393,9 Nml/g SV_s ; aproximadamente un 50% más que el reactor 7 y el valor máximo en total. Los reactores 5 y 4, ambos con S/I de 0,5, le siguen con cifras de 380,0 y 377,4 Nml/g SV_s respectivamente, con un promedio de **378,7 Nml/g SV_s** . Finalmente, en cuanto a la relación 2, los reactores 9 y 8 lograron un PBM de 370,5 y 363,5 Nml/g SV_s , dando en promedio **367,0 Nml/g SV_s** . Si bien la relación 1 obtuvo muy buen resultado en el reactor 7, el bajo rendimiento del reactor 6 hace que el promedio en este caso sea de **327 Nml/g SV_s** .

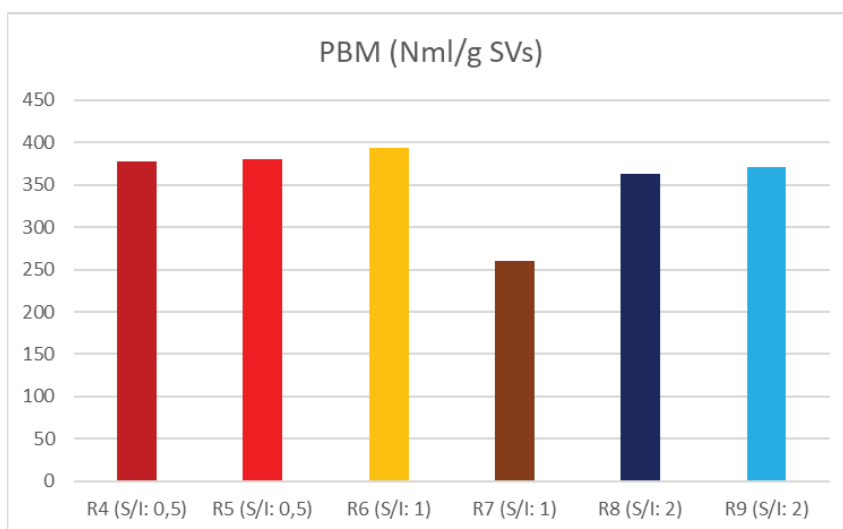


Figura 4.4. Resultado de PBM por reactor.

Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones del ensayo

El gráfico de la *figura 4.3* muestra una similitud en la mayoría de los reactores. No obstante, es la relación S/I de 0,5 la que demostró un rendimiento ejemplar, ya que obtuvo los resultados más elevados de PBM. Asimismo, se obtuvieron muy buenos resultados para la relación S/I igual a 2; presentando resultados de la producción real de metano apenas un

4% por debajo de la relación 0,5. Por otra parte, los reactores 8 y 9 fueron los únicos que continuaron generando pasados los 22 días.

Según la teoría, la relación S/I óptima depende también de la producción de AGVs y la capacidad de amortiguamiento de los mismos. Asimismo, la concentración de sustrato es importante para asegurar una buena transferencia de masa. Bajas concentraciones implican baja actividad metabólica, mientras que las concentraciones elevadas pueden representar un problema por la sobrecarga de inhibidores, como los AGVs. En este caso, la relación S/I tiene un % de sólidos totales de 3,88% a diferencia de las S/I 1 y 2 tienen porcentajes de 4,73 y 6,25 % respectivamente. Esta diferencia podría indicar inhibición o sobrecarga de AGVs. Además, una relación S/I más baja, puede brindar una distribución más equilibrada de los nutrientes de la mezcla.

Si bien una generación prolongada implica una mayor obtención de gas metano, también impacta en el diseño. Un mayor tiempo de retención dentro del reactor significa que se deberá construir un reactor con más volumen y por lo tanto menos económico. Particularmente, la relación S/I 2 es también la que presenta un mayor porcentaje de sólidos totales (6,25%). Este parámetro debe ser tomado en cuenta para el diseño, principalmente por el sistema de bombas, cañerías y mezclado. Un elevado porcentaje de sólidos y un reactor con gran volumen también representan mayores costos por mantenimiento.⁶⁸

Para determinar la relación sustrato/inóculo óptima para el diseño del biodigestor se deben tener en cuenta tanto la producción del biogás como también los costos asociados a la construcción y el mantenimiento del sistema. Aunque la relación S/I de 2 mostró un rendimiento interesante y prolongado, si los costos son significativamente mayores, podrá influir negativamente a la viabilidad del proyecto. En síntesis, la relación S/I de 0,5 se mantiene como la elección más adecuada por generar mayor volumen real de metano durante el ensayo. Mientras que al tener un menor porcentaje de sólidos y llegar a su máxima producción de biogás en menor tiempo representaría menores costos de inversión y mantenimiento del reactor.

⁶⁸ Patricia Bres, María Eugenia Beily & Diana Crespo (2022) "Ensayo potencial bioquímico metanogénico: Una metodología clave para conocer la energía de las biomasas"

Capítulo 5: Digestión Anaeróbica

La digestión anaeróbica o biodigestor es una tecnología avanzada que desempeña un rol importante en la conversión de la materia orgánica en biogás. Este capítulo aborda los aspectos ingenieriles de la gestión de los residuos y la generación de energía renovable tras la aplicación de un digestor anaeróbico para el tratamiento de la WDGS en la industria de la producción de etanol. Se abordan los aspectos que se mencionan a continuación.

El funcionamiento de dicha tecnología aplicada al subproducto de interés brindando la descripción desde la introducción de este sustrato hasta la producción de biogás, haciendo hincapié en parámetros determinantes y críticos como la temperatura, acidez, relación C/N, entre otros. Además, se examinan las condiciones ambientales y de diseño que impactan en el rendimiento de estos sistemas, como la agitación y el tiempo de retención hidráulica.

Finalmente, se presentan también diversos modelos de biodigestores diseñados para abordar los desafíos particulares de la gestión de WDGS, en particular la carga de sólidos. Se llevará a cabo un análisis para respaldar la selección del modelo más adecuado en función de las condiciones específicas de la digestión del subproducto.

Digestion Anaeróbica

La biomasa es una sustancia tanto de origen vegetal como animal que almacena energía. Los residuos de la actividad agrícola como lo es la WDGS se denomina biomasa residual húmeda. Tienen la característica de aún poder ser utilizados. En la naturaleza existen infinidad de bacterias que los consumen, descomponiendo la biomasa. Cuando las condiciones carecen de oxígeno, es decir, anaeróbicas, se produce gas y lodos ricos en nutrientes. El subproducto gaseoso se compone de una mezcla de CO_2 entre 30% a 45% y CH_4 entre 55% a 70%, con presencia de otros compuestos en menor medida. Por lo tanto el biogás contiene principalmente CH_4 , un gas combustible al que se le asocian usos energéticos. Mientras que los lodos, debido a la presencia de nutrientes, son frecuentemente utilizados como fertilizantes.⁶⁹

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,

⁶⁹ Ivan Corona Zúñiga, "Biodigestores" (2007) Universidad Autónoma del estado de Hidalgo

comparado a un proceso aeróbico que consume un 50% de la energía en generar biomasa, provocando un gran volumen de lodos. Esta diferencia se puede apreciar en la *figura 5.1*, donde se observa claramente cómo esta última transforma la mayor parte de la energía en gas.

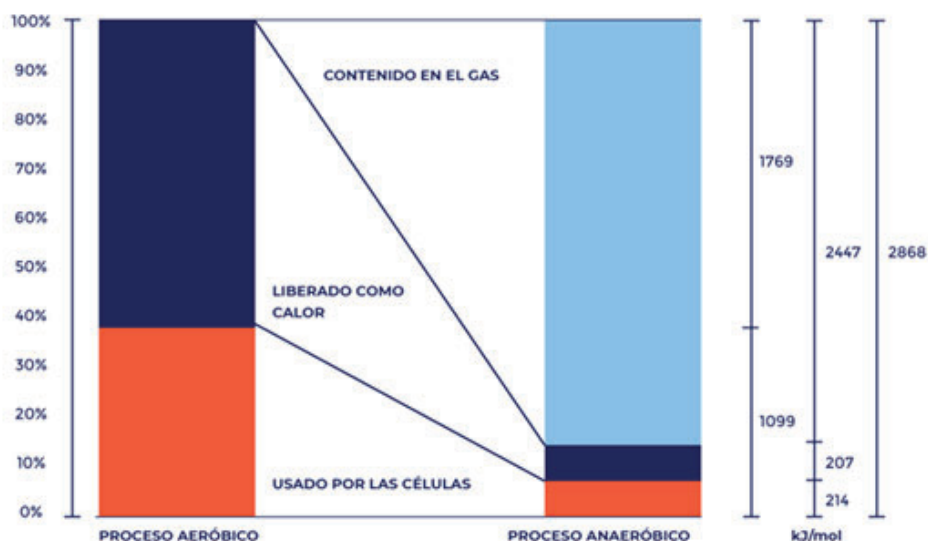


Figura 5.1. Balance energético de la digestión aeróbica y anaeróbica de la glucosa (1)

Fuente ⁷⁰

En anaerobiosis pueden ocurrir dos vías metabólicas, la fermentación o la respiración anaeróbica. La fermentación, por ejemplo, es el proceso que ocurre para la obtención del etanol a partir del maíz, donde el sustrato se oxida parcialmente. Los aceptores de electrones en la respiración anaeróbica son CO_2 , SO_4^{2-} o NO_3^- . Además, se libera mayor cantidad de energía cuando se genera el metano a diferencia de la otra ruta metabólica. Cuando la carga orgánica es elevada, también se generan lodos. Tanto el biogás como el lodo son fuertemente dependientes del sustrato, la tecnología y el diseño del digestor.

Los biodigestores son sistemas diseñados para optimizar la producción de biogás a partir de una biomasa específica. Hasta llegar a la síntesis del biogás, la digestión anaerobia atraviesa diferentes etapas que dependen de condiciones específicas. En cada una de ellas participan microorganismos que trabajan en consorcio, ya que los componentes que sintetiza uno, sirve como el alimento del siguiente. Principalmente, podemos encontrar bacterias exclusivamente aerobias facultativas y anaerobias obligadas,

⁷⁰ Curso de Operación y Mantenimiento de Sistemas de Biodigestión de Pequeña y Mediana Escala.

aunque también haya participación de algunos hongos.² Las etapas son cuatro y corresponden a las listadas a continuación:

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

Hidrólisis

La primera etapa en la digestión anaerobia es la hidrólisis, donde se degradan los sustratos orgánicos más complejos, como los polisacáridos, proteínas y lípidos. Esta primera metabolización permite obtener compuestos solubles, ya que los biopolímeros generalmente no pueden ser utilizados directamente por los microorganismos a menos que se hidrolicen en compuestos solubles, que puedan atravesar la pared celular.

La degradación en este caso es llevada a cabo por las enzimas celulolíticas, proteolíticas y lipolíticas de las bacterias aerobias facultativas. Pueden ser de actuación extracelular. Los elementos sintetizados son principalmente azúcares, proteínas y derivados de lípidos, como monoglicéridos, glicerol y ácidos grasos volátiles. Las proteínas cumplen un rol importante dentro del biodigestor ya que aportan los nutrientes para mantener un buen número de biomasa.⁷¹ En la digestión anaeróbica, la lignina es inerte a la degradación. La figura 1 muestra la degradación correspondiente.

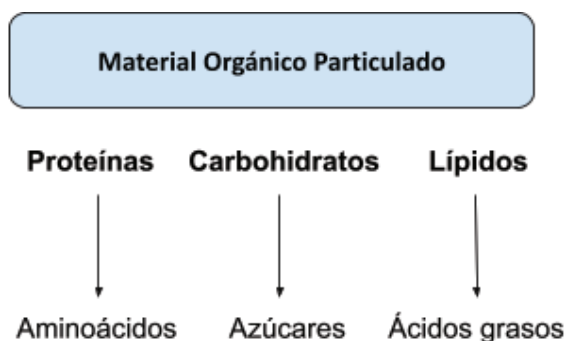


Figura 5.2. Esquema de la degradación del material orgánico particulado en compuestos más simples por la hidrólisis.

Fuente: Elaboración propia.

⁷¹ Curso de Operación y Mantenimiento de Sistemas de Biodigestión de Pequeña y Mediana Escala.

Acidogénesis

Con las sustancias orgánicas hidrolizadas presentes en el biodigestor, se puede iniciar la etapa de fermentación o acidogénesis. Como su nombre lo dice, se fermentan las moléculas solubles, sintetizando a su vez compuestos aptos para la digestión de las bacterias metanogénicas en la última fase. Durante este proceso, se sintetiza hidrógeno por la deshidrogenación del piruvato. Los principales productos generados son el ácido acético y fórmico, como también compuestos orgánicos aún más reducidos, tales como el propiónico, butírico, valérico, láctico y etanol. Los mismos compuestos son oxidados en la siguiente etapa. Los microorganismos presentes en esta etapa consisten principalmente de bacterias facultativas y anaerobias obligadas.^{3,72}

Acetogénesis

En este proceso ocurre la oxidación anaeróbica. Esto se logra mediante la participación de dos microorganismos; las bacterias acetogénicas y las homoacetogénicas. Las primeras transforman a los ácidos grasos volátiles en acetato, dióxido de carbono e hidrógeno. Mientras que las acetogénicas consumen el dióxido de carbono e hidrógeno para sintetizar más acetato. El producto obtenido finalmente será consumido por los metanógenos. La figura 2 resume el metabolismo de cada bacteria mencionada y sus productos.

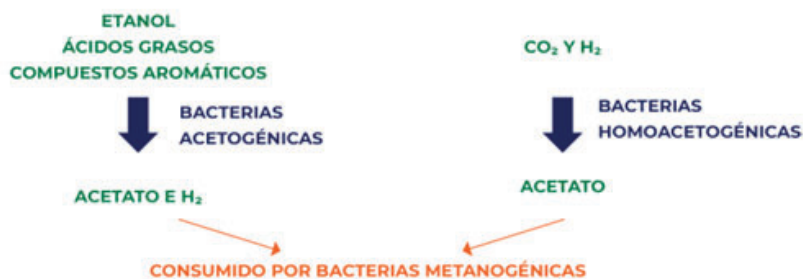


Figura 5.3. Esquema de la degradación que sucede en la acetogénesis.

Fuente ⁷³

⁷² Lorenzo Acosta, Yaniris; Obaya Abreu, Ma Cristina La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, vol. XXXIX, núm. 1, 2005, pp. 35-48 Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar Ciudad de La Habana, Cuba

⁷³ Curso de Operación y Mantenimiento de Sistemas de Biodigestión de Pequeña y Mediana Escala.

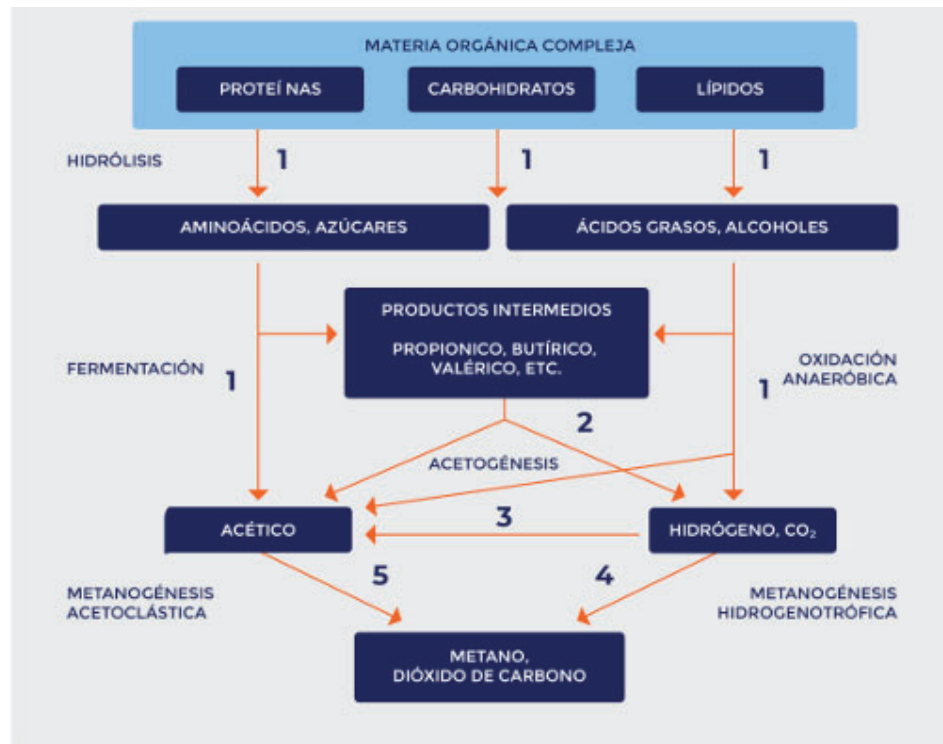
Metanogénesis

A lo largo de estas etapas se puede observar como los compuestos excretados por los primeros microorganismos actúan como sustrato de los siguientes. En este caso, se finaliza la digestión anaeróbica con la metabolización de los últimos productos mencionados en el apartado anterior; acetato, dióxido de carbono e hidrógeno. Esto sucede mediante dos grandes grupos de microorganismos metanógenos.

Metabolizando al dióxido de carbono e hidrógeno, se encuentran las bacterias hidrogenotróficas. Este grupo de microorganismos aporta aproximadamente en un 30% al metano total generado en el biorreactor. Por otro lado, participan las bacterias acetoclásticas, que además de metano, producen ácido fórmico, metanol y algunas amigas. Este último grupo genera la mayor parte de metano, alrededor del 70%.

La metanogénesis es la etapa más sensible de la digestión anaeróbica por la delicadeza de los microorganismos. Los parámetros que más influyen son la temperatura y pH. Además, es una de las etapas más lentas de todo el proceso.

Mantener el equilibrio dinámico entre las etapas es fundamental para que la metanogénesis continúe en una velocidad óptima. Las cuatro etapas metabólicas que ocurren en los procesos de digestión anaerobia pueden ser representadas según el diagrama presentado a continuación como *figura 5.4*:



(PAVLOSTATHIS Y GIRALDO-GÓMEZ, 1991)

Los números indican la población bacteriana responsable del proceso:

- 1: bacterias fermentativas;
- 2: bacterias acetogénicas que producen hidrógeno;
- 3: bacterias homoacetogénicas;
- 4: bacterias metanogénicas hidrogenotróficas;
- 5: bacterias metanogénicas acetoclásticas.

Figura 5.4. Esquema de la degradación anaeróbica.

Fuente ⁷⁴

Microorganismos

Como se mencionó previamente, existe una simbiosis dentro del digestor donde participan microorganismos de diferentes tipos. Los mismos se resumen a continuación en la *tabla 5.1* Se dividen principalmente en dos etapas. La primera, que incluye a la hidrólisis y acidogénesis y la segunda donde ya participan las metanogénicas.

Tabla 5.1. Listado de bacterias aisladas en un digestor anaeróbico.

Fase no Metanogénica	Fase Metanogénica
----------------------	-------------------

⁷⁴ Curso de Operación y Mantenimiento de Sistemas de Biodigestión de Pequeña y Mediana Escala.

Anaeróbicos Facultativos	Anaeróbicos estrictos	Anaeróbicos extremos
<i>Lactobacillus</i>	<i>Bacteroides</i>	<i>Methanobacterium</i>
<i>Spirillum</i>	<i>Clostridium</i>	<i>Methanococcus</i>
<i>Klebsiella</i>	<i>Bifidobacterium</i>	<i>Methanospirillum</i>
<i>Actinomyces</i>	<i>Sphaerophorus</i>	<i>Methanobrevibacter</i>
<i>Vibrio</i>	<i>Fusobacterium</i>	<i>Methanomicrobium</i>
<i>Corynebacterium</i>	<i>Veillonella</i>	
<i>Bacillus</i>	<i>Peptococcus</i>	
<i>Micrococcus</i>	<i>Desulfovibrio</i>	
<i>Pseudomonas</i>		
<i>Alcaligenes</i>		
<i>Sarcina</i>		
<i>Aerobacter</i>		

Fuente: Lorenzo Acosta, Yaniris; Obaya Abreu, Ma Cristina La digestión anaerobia. Aspectos teóricos. Parte I ICIDCA. Sobre los Derivados de la Caña de Azúcar, Instituto Cubano de Investigaciones de los Derivados de la Caña de Azúcar Ciudad de La Habana, Cuba.

Si bien el listado incluye varias bacterias aisladas dentro de un reactor, pueden haber otras que no estén enunciadas en la tabla.

Síntesis de Biogás

Los productos de la digestión anaeróbica son los biofertilizantes y el biogás; ambos de un gran valor económico. Si bien todo el proceso es determinante para su síntesis, es la última etapa es la que efectivamente produce el metano que compone mayormente el biogás. Es por ello que resulta fundamental examinar los factores que gobiernan al proceso. Algunas de las condiciones ambientales que afectan a la generación de biogás son la temperatura, el tipo de materia prima, el pH, presencia de inhibidores, toxicidad, condiciones redox, los nutrientes y la concentración de minerales. En la *tabla 5.2* se tiene con mayor detalle, no solo la composición, sino que también el contenido energético, su equivalente de combustible y otros datos relevantes para su aplicación.

Tabla 5.2. Características principales del biogás.

Composición	55 - 70% CH ₄ 30 - 45% CO ₂ Trazas de otros gases
Contenido energético	6,0 - 6,5 kWh/m ³
Equivalente de combustible	0,60 - 6,5 kWh/m ³
Límite de explosion	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 (sin desulfurar), inoloro (desulfurado)
Masa Molar	16,043 kg/kmol

Fuente: Prof. María Teresa Varnero Moreno *Manual de biogás, Santiago de Chile (2011)*

Materia Orgánica

La WDGS está compuesta principalmente de lípidos, ya que el almidón es degradado y transformado en etanol. Es importante destacar la materia orgánica principal ya que dependiendo el tipo puede variar la generación de biogás. Un sustrato con mayor proporción de carbohidratos no tendrá el mismo potencial de generación que uno que contenga mayor cantidad de lípidos o proteínas. Para comprender las diferencias, a continuación se muestra en la *tabla 5.3* la producción teórica de biogás y metano para cada compuesto orgánico.

Tabla 5.3. Generación teórica de biogás y metano por grupo de materia orgánica compleja.

Materia Orgánica Compleja	Fórmula Química	Biogás (m ³ /Kg SV)	CH ₄ (m ³ /Kg ST)
Carbohidratos	C ₆ H ₁₀ O ₅	0,75	0,37
Lípidos	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	1,44	1,44
Proteínas	C ₁₆ H ₂₄ O ₅ N ₄	0,98	0,49

Fuente: *Prof. María Teresa Varnero Moreno Manual de biogás, Santiago de Chile (2011)*

La información que proporciona la tabla implica que los lípidos son los compuestos con mayor generación de biogás y de metano, seguido por las proteínas y por último los carbohidratos. Presentando una diferencia aproximada de 150% entre el primero y el segundo. Si bien la WDGS tiene un amplio contenido de lípidos y se espera que la producción sea alta, se debe tener en cuenta que los Ácidos grasos volátiles (AGV's) provienen de este grupo de materia orgánica, pudiendo acidificar el medio y presentar un riesgo para las bacterias metanogénicas.

Temperatura

Uno de los parámetros más importantes para la generación de un biogás de calidad para fines energéticos es la temperatura. La gran mayoría de los procesos biológicos y fisicoquímicos dependen de este parámetro. Un ejemplo fundamental de esto son las curvas de crecimiento de los microorganismos, donde a medida que aumenta la temperatura, incrementa la velocidad de crecimiento; hasta cierto punto. Cada microorganismo posee su rango óptimo y gracias al análisis experimental histórico, se pueden identificar principalmente tres rangos de crecimiento para los organismos anaeróbicos; la fermentación psicrófila, mesófila y termófila. El gráfico de la *figura 5.5* muestra el crecimiento de las bacterias metanogénicas en cada rango.

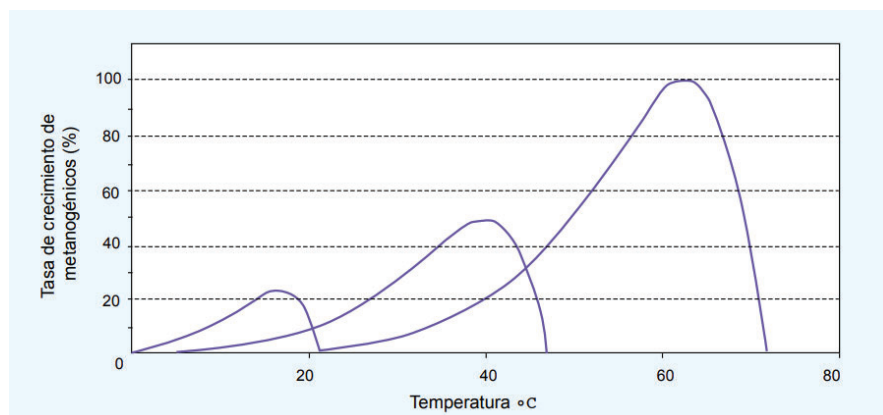


Figura 5.5. Crecimiento de los microorganismos metanogénicos según rango de temperatura psicrófilo (4-25 °C), mesófilo 125 - 45°C) y termófilo (25 °C - 65°C).

Fuente⁷⁵

Un dato a tener en cuenta, es que cada rango tiene su temperatura óptima. Por otro lado, se aprecia claramente como el rango termófilo representa el mayor crecimiento de los microorganismos, con una temperatura óptima entre 50 - 60°C. A fines prácticos, se suele apuntar a los mesófilos, con temperatura ideales entre 25 - 35°C, ya que implica un gasto energético muy elevado mantener la temperatura de los rangos termófilos. Además, cada tipo de fermentación tiene asociado un tiempo. En el caso de las mesofílicas, este suele ser entre 30 hasta 60 días, mientras que el termófilo se reduce a entre 10 y 15 días. La figura 5.6 muestra la generación de biogás en función de la temperatura en la fermentación mesófila.

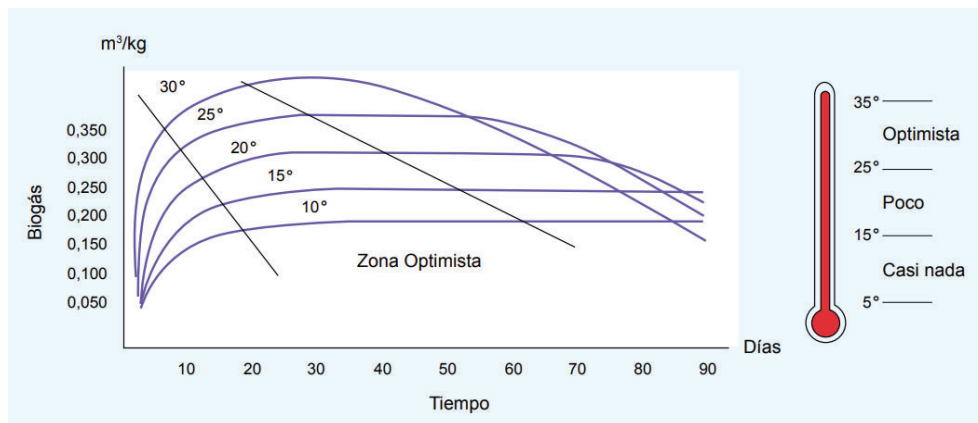


Figura 5.6. Producción de biogás en función de la temperatura.

Fuente⁷

⁷⁵ Prof. María Teresa Varnero Moreno Manual de biogás, Santiago de Chile (2011)

La variación brusca de temperatura puede desestabilizar a todo el reactor. Es fundamental mantener una temperatura homogénea en todos los puntos. Es por esto que el tipo de fermentación termófila presenta otra desventaja, ya que es más susceptible que el a las variaciones. Idealmente, se diseña con el objetivo de que la variación no supere los 0,6 - 1,2 °C/día. Las altas temperaturas también favorecen la presencia de ácidos grasos de cadena larga y de nitrógeno amoniacal que pueden resultar tóxicos para el medio.⁷⁶

En cuanto a la fisicoquímica, la temperatura disminuye la viscosidad que repercute en menos necesidad de agitación. Por otra parte, afecta la solubilidad tanto de gases como sales. Es sabido que a medida que aumenta la temperatura, desciende la solubilidad de los gases, mientras que en la mayoría de las sales aumenta. Esto puede presentar ventajas y desventajas en el medio.

En cuanto a los gases, la disminución de la solubilidad del NH_3 , H_2 y H_2S presenta un beneficio debido a su toxicidad hacia los microorganismos. De todas maneras, la ausencia de CO_2 soluble podría implicar un aumento en el pH, que es otro de los parámetros que más afectan a los microorganismos metanogénicos. Además, puede provocar una mayor concentración de amoníaco en el lodo, que también actúa como inhibidor.

Por parte de las sales, el aumento de temperatura es beneficioso para que los microorganismos tengan una buena disponibilidad de los minerales que necesitan para su crecimiento. Esto aumenta también la velocidad del crecimiento. No obstante, la temperatura facilita la solubilidad de compuestos tóxicos como los ácidos grasos de cadena larga y favorecen la formación de compuestos no ionizados que también tienen un impacto negativo en el medio. Incluso, tienen mayor efecto que sus versiones ionizadas.

Tiempo de retención hidráulico y velocidad de carga orgánica

El tiempo de retención hidráulico (TRH) es un parámetro que indica el tiempo que permanece una partícula de agua dentro de una unidad de tratamiento específica; en este caso el digestor anaeróbico.⁸ Este parámetro se considera crítico en el diseño ya que afecta directamente en la eficiencia del tratamiento. Mientras mayor sea el tiempo de retención, mayor es la probabilidad de digestión de los contaminantes orgánicos, pero esto implica al mismo tiempo un mayor volumen del digestor. Lo que implica mayores costos

⁷⁶ Prof. María Teresa Varnero Moreno Manual de biogás, Santiago de Chile (2011)

constructivos y de mantenimiento. Caso contrario, al reducir el TRH, se disminuye el tamaño y los costos. La generación de biogás también depende de la cantidad de sustrato cargado diariamente. Uno de los valores típicos para los biodigestores es adoptar un tiempo entre 20 a 55 días con cargas diarias de 1 a 5 kg de sustrato/m³ del reactor.

La carga orgánica se refiere al caudal másico de materia orgánica por unidad de volumen. Por otro lado, la velocidad de carga orgánica (COV) se refiere a la cantidad de materia orgánica introducida diariamente en el reactor por unidad de volumen. Esta variable depende del tiempo de retención y la concentración del sustrato. Se puede obtener una alta generación de biogás cuando la carga orgánica es elevada, siempre y cuando no hayan inhibidores en el medio y se controle minuciosamente para evitar acidificación en el medio.⁸

pH

El valor de pH del medio es determinante para la microbiota. Los microorganismos metanogénicos, sobre todo, tienen mayor susceptibilidad a las variaciones de este parámetro. Tanto es así que no pueden desarrollarse satisfactoriamente para valores inferiores a 6,0 ni superiores a 8,5, teniendo un óptimo entre 7,8 y 8,2. Por otro lado, los microorganismos que participan en la etapa de acidogénesis tienen sus valores primos entre 5,5 y 6,5. Esto implica que para un cultivo mixto, el pH ideal es el neutro, con variaciones entre 6,8 y 7,4.

Este parámetro no solo afecta que tan óptima va a ser la actividad de los microorganismos sino que también a la composición del biogás. La imagen de la *figura 5.7* muestra cómo al disminuir los niveles de pH, el porcentaje de metano presente en la mezcla de gases disminuye notablemente luego de la unidad 6.1. Esta baja de porcentaje se refleja en la obtención de un gas con bajas cualidades energéticas. Comprendiendo la susceptibilidad del pH, el objetivo siempre es trabajar con valores cercanos a la neutralidad.

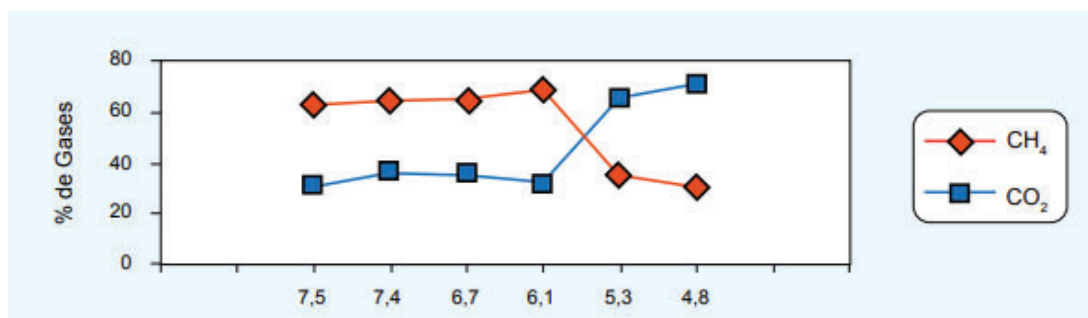


Figura 5.7. Composición del biogás en función del pH.

Fuente⁷⁷

Adicionalmente, la disminución de los microorganismos metanogénicos generan una acumulación de ácido acético e H_2 ya que no hay quien los digiera. En efecto, hay un aumento de la presión parcial del H_2 que provoca una inhibición de las bacterias que se ocupan de degradar el ácido propiónico, acumulando AGV's en exceso. Consecuentemente, disminuye la producción de ácido acético y disminuye el pH. Esta situación refleja nuevamente la simbiosis que existe en el medio y la importancia de cada proceso. Ya que si hay alguna falla en cualquiera de las etapas, puede provocar que todo el proceso falle.

Otra implicancia importante que tiene el pH es en los desplazamientos de los diferentes equilibrios químicos. En el medio, además de sustrato e inóculo, hay sales y minerales presentes. Cuando el pH sube, el equilibrio químico favorece la formación de amoníaco que a su vez inhibe el crecimiento de los microorganismos. Caso contrario, cuando baja el pH, aumenta la generación de la forma no ionizada del ácido acético, evitando que ocurra la degradación del ácido propionato. Es decir, que el pH puede actuar como un desencadenante de algunos inhibidores.

Como se mencionó en el apartado anterior, una alta carga orgánica puede provocar una caída en el pH. Esto sucede por la acumulación de los AGV o CO_2 . En este caso, se puede regular el ingreso del residuo para normalizar la concentración de los AGV en el medio. Esto permite que el pH solo regrese a sus valores normales. La carga orgánica puede ir aumentando lentamente mientras que se regula el proceso y retorna a la capacidad de carga inicial. Otras opciones para regular el pH son la colocación de un buffer y en casos más extremos, añadir algún químico, como por ejemplo bicarbonato de sodio, carbonato de sodio, hidróxido de amonio, gas amoníaco, cal, hidróxido de sodio y potasio. La ventaja de utilizar bicarbonato de sodio es su alta solubilidad y su baja toxicidad para que no impacte mucho en el medio.

Si bien el reactor cuenta con una alcalinidad natural, son los residuos con mayor proporción de proteínas los que la logran adecuadamente. Esto ocurre por los contenidos de nitrógeno que aporta este tipo de compuesto orgánico. Los carbohidratos, por otro lado,

⁷⁷ Prof. María Teresa Varnero Moreno Manual de biogás, Santiago de Chile (2011)

no contribuyen a la alcalinidad. En este sentido la WDGS presenta una ventaja, ya que el almidón es eliminado para ser transformado en etanol.

Una de las formas más eficientes de controlar los niveles de pH es ajustando los niveles de los materiales previos al ingreso del reactor. Aunque también se debería controlar dentro del reactor en sí. Actualmente existen técnicas de monitoreo automatizadas que introducen sustancias químicas para regular el pH cuando se detecta alguna variación por fuera del rango. Si bien es tecnología simple y eficiente, también implica mayores costos.

Inhibidores

Existen otros inhibidores que pueden afectar a la síntesis del biogás. El oxígeno es uno de los inhibidores más obvios ya que se trata de un proceso estrictamente anaeróbico. La presencia de 1 µg/l de oxígeno produce efectos negativos en la digestión. Los desinfectantes y antibióticos también son otros de los inhibidores más deducibles, ya que están diseñados para atacar a las bacterias que en este caso son las operarias del proceso. En este apartado se describe con mayor detalle el impacto que tienen los AGVs, Nitrógeno, H₂, sulfatos, sulfuros, cationes, metales pesados, entre otros. Es importante poder identificarlo y conocer sus efectos ya que al caracterizar la WDGS se sabe que se puede esperar y cómo actuar frente a una complicación.

AGV

Previamente se mencionaron algunos de los impactos que pueden tener los ácidos grasos volátiles en gran cantidad dentro del digestor. Son generados en la primera fase no metanogénica del proceso. Este grupo está compuesto principalmente por ácidos acético, butírico y propiónico principalmente; puede haber otros. Este compuesto, además, es muy práctico para estudiar la evolución del proceso por su fácil respuesta ante variaciones en el sistema y su simple recuperación. Idealmente, la concentración de este tipo de compuestos debe rondar entre los 50 - 250 mg HAc/l.

Ocurre una sobreacumulación de los AGV cuando hay una inhibición en la metanogénesis que rompe con la relación simbiótica con la acidogénesis. Al igual que otros compuestos que se verán más adelante, la forma no ionizada de los AGV ocasiona una inhibición en la metanogénesis cuando se presentan en concentraciones entre 30-60 mg/L.

Nitrógeno

El amoníaco (NH_3) puede ingresar directamente al reactor o ser sintetizado a partir de la digestión de las proteínas o aminoácidos presentes en el sustrato. Una concentración excesiva actúa como inhibidora en el crecimiento de los microorganismos.

El nitrógeno amoniacal son las especies del nitrógeno en forma de ion amonio (NH_4^+) y del amoníaco (NH_3). Ambas se encuentran en equilibrio químico y su concentración con respecto a la otra es dependiente del pH. En el medio aparecen diferentes formas de nitrógeno a partir de la hidrólisis del nitrógeno orgánico. El amoníaco libre es el que se ha demostrado experimentalmente que ocasiona un efecto inhibitorio ya que aumenta el pH. En la *tabla 5.4* se muestran diferentes concentraciones del compuesto y sus efectos.⁷⁸

Tabla 5.4. Concentración de amoníaco y su impacto en el digestor.

Amoníaco (mg/L)	Efectos
50-100	Beneficios
200-1000	Sin efectos
1500-3000	Inhibición a niveles de pH elevados
>3000	Tóxico

La concentración de amoníaco libre en el medio también depende de la concentración del sustrato, la relación C/N, la capacidad tamponadora del medio y la temperatura de digestión, no únicamente del pH. Los compuestos con altas proporciones de proteínas o nitrógeno corren el riesgo de presentar inhibiciones de este tipo.

H_2

El hidrógeno es también un compuesto intermedio importante del proceso anaeróbico. Su acumulación en el medio provoca la inhibición de la acetogénesis y, consecuentemente, la acumulación de ácidos grasos volátiles de cadena larga.¹⁰ Por otra parte, cuando se disminuye el pH por debajo de 6, se obtiene un biogás de baja calidad y un aumento en la concentración del hidrógeno por la inhibición de la metanogénesis.

⁷⁸ Prof. María Teresa Varnero Moreno Manual de biogás, Santiago de Chile (2011)

Azufre

En algunas circunstancias, las bacterias metanogénesis pueden competir con las sulfato-reductoras. Cuando hay presencia de sulfatos en el medio, aumenta la probabilidad de encontrar este tipo de bacterias cuya cinética y termodinámica es superior a las generadoras de metano. Como es de esperarse, esta competencia influye en la composición del biogás; disminuyendo el metano, aumentando la proporción de ácido sulfhídrico y por ende, bajando la calidad energética del producto.

Dentro de un digestor, puede surgir sulfuro a partir de la degradación de proteínas o cualquier otro tipo de materia orgánica que contenga azufre. La presencia de este compuesto, además de favorecer la supervivencia de las sulfato-reductoras, resulta tóxica para varios de los grupos bacterianos que participan en la digestión. El principal grupo afectado son las metanogénicas; concentraciones mayores a 50 mg/l resultan letales en estos casos. Existen otros tipos de inhibición por parte del sulfato.

El sulfuro puede encontrarse en varias formas. El ácido sulfhídrico (H_2S) es la forma no ionizada y es la más tóxica de todas. Mientras que la forma ionizada (HS^-) tiene menor impacto. La inhibición de este tipo aumenta cuando el pH y las temperaturas son bajas.

Cationes y metales pesados

Los primeros dos grupos de la tabla periódica corresponden a los metales alcalinos y alcalinotérreos. Algunos ejemplos de los mismos son el sodio (Na), potasio (K), magnesio (Mg) y calcio (Ca). Este tipo de elementos son indispensables para el crecimiento de cualquier ser vivo y las bacterias no son la excepción. No obstante, a partir de ciertos valores, la concentración de estos cationes tienen un efecto inhibitorio en la cinética de crecimiento micobacteriano.

Se observa que a medida que aumenta el peso molecular, mayor es el impacto que genera el catión. Por lo tanto, los metales pesados son los que representan mayor peligrosidad. El orden de toxicidad de los metales pesados es $Ni > Cu > Cr(IV) \sim Cr(III) > Pb > Zn$ ⁷⁹. Se amortigua el efecto de los cationes cuando se introducen gradualmente y permiten que los microorganismos se adapten a su presencia. Otra forma de lograrlo es cuando hay presencia de sulfuros en el medio y permite que precipitan los metales, a

⁷⁹Prof. María Teresa Varnero Moreno Manual de biogás, Santiago de Chile (2011)

excepción del cromo. También puede suceder que la combinación de metales aumente la toxicidad o la reduzca. En la tabla que se muestra a continuación, se listan los principales cationes de este tipo y las concentraciones que no deben superar para tener un efecto inhibidor en el medio.

Tabla 5.5. Concentración inhibidora de cationes y metales pesados.

Compuestos	Concentración Inhibidora
SO ₄ ⁻	5000 ppm
NaCl	40000 ppm
NO ₃ ⁻	0,05 mg/l
Cu	100 mg/l
Cr	200 mg/l
Ni	200 - 500 mg/l
CN	25 mg/l
Na	3500 - 5500 mg/l
K	2500 - 4500 mg/l
Ca	2500 - 4500 mg/l
Mg	1000 -1500 mg/l

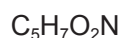
Fuente: Prof. María Teresa Varnero Moreno Manual de biogás, Santiago de Chile (2011)

Potencial Redox

Una de las muchas condiciones que necesitan las bacterias metanogénicas para generar metano adecuadamente es poseer un medio reductor. Idealmente, las condiciones dentro del reactor deben oscilar entre -220 mV y -350 mV. Para asegurar que se cumplan, existe la opción de incorporar agentes reductores dentro del digestor. Algunos ejemplos incluyen al sulfuro, cisteína o titanio III.

Nutrientes

Uno de los grandes beneficios de la digestión anaeróbica frente a la aeróbica es la poca cantidad de lodos generados. Esto no solo implica que hay menos lodo para disponer, como sucede en lodos activos, sino que también significa que hay una menor demanda de nutrientes por los bajos índices de producción de biomasa. Como cualquier ser vivo, el medio va a requerir la presencia de macronutrientes y micronutrientes, como el nitrógeno, el fósforo y minerales. Para estimar la proporción que se requiere se utiliza la fórmula empírica de una célula bacteriana anaeróbica:



El nitrógeno se compone en un 12% de la masa celular total. Por otra parte, se requiere de fósforo en una proporción entre 1/7 y 1/5 con respecto al nitrógeno. Además, se utiliza como regla general que el 10% del DQO removido se transforma en biomasa. Conociendo estas relaciones, se pueden calcular los requerimientos de los macronutrientes.

En cuanto al resto de los nutrientes, se ha observado experimentalmente que los siguientes son esenciales para la obtención de un biogás de calidad: hierro, cobalto, molibdeno, selenio, calcio, magnesio, zinc, cobre, manganeso, tungsteno y boro a niveles de mg /L y la vitamina B12 en niveles de µg/L.

Agitación y Mezclado

Uno de los parámetros más importantes para conseguir una digestión tanto anaeróbica como aeróbica es la agitación. Además de homogeneizar el medio, es fundamental mantener una mezcla por varios motivos. Por un lado, facilita el contacto entre las bacterias metanogénicas con el sustrato fresco mientras que remueve los metabolitos producidos por su digestión. Esto se replica para cualquier etapa del proceso. Además, previene la formación de una costra en la superficie del caldo; llamando caldo a la combinación del sustrato e inóculo. En efecto, permite uniformar la densidad de la microbiota y evita la formación de zonas sin actividad biológica. Lo cual previene la formación de espumas y sedimentación mientras que reduce el volumen efectivo del reactor.

Por lo tanto, la agitación es un parámetro operativo que aumenta la producción y calidad del gas mientras que disminuye el THR. Actualmente se distinguen 3 metodologías para el mezclado, las cuales son agitación tipo mecánica, por inyección de fango y con gas.

El tipo mecánico puede darse a través de agitadores manuales o con motores eléctricos. Además, se subdivide en una amplia variedad de agitadores. El típico modo de operación es con el agitador ubicado en el interior del digestor, pero últimamente se comenzó a emplear un tubo de succión. Se distinguen principalmente tres tipos de agitadores, los tipo hélice sin tubo de succión, con tubo de succión y agitadores tipo tornillo en el interior de un tubo de succión. El tubo funciona como un succionador de fango con el objetivo de descargarlo en otro punto del reactor.

Otro de los métodos empleados actualmente es la inyección de fango mediante boquillas. Al igual que los tubos de succión, las boquillas absorben fango y lo descargan en distintos puntos del digestor. Pero, en este caso, la cantidad de boquillas es mucho mayor y se ubican en la parte inferior del reactor. Además, poseen menor diámetro y se busca conseguir un flujo circular dentro del reactor.

La agitación por gas utiliza el biogás generado por la digestión anaeróbica, lo comprime y lo recircula. Esto lo logra mediante varios tubos en la solera del reactor o mediante lanzas suspendidas desde la cubierta y sumergidas hasta el fondo. La mezcla se da gracias a que el gas reintroducido moviliza el fango al ser arrastrado hacia arriba. Este método presenta complicaciones de atasco o rotura de los elementos. Hay otro tipo de agitación con gas denominado HEAT & MIX, donde el gas se introduce en tuberías externas. Esta acción permite la circulación del fango desde la solera hasta la superficie, donde es reintroducido cerca del centro. Este movimiento crea un flujo circular de mezclado tanto vertical como horizontal. Las ventajas son que no se tienen elementos dentro del digestor y no es necesario realizar un vaciado para mantenimiento y limpieza. Además, en el torno de las tuberías circula agua caliente, actuando como un intercambiador de calor.

En el método hidráulico, se utilizan bombas de flujo lento para el recirculado de biomasa. La disposición más común para este tipo de agitación es colocando en la parte inferior del reactor la aspiración del fango y en la parte superior la descarga, pueden hacer casos donde el sistema esté invertido. La ventaja de este método es que tiene un fácil mantenimiento ya que los equipos son robustos y los elementos no suelen deteriorarse.

Para seleccionar la metodología de agitación se deben tener en cuenta aspectos económicos y de diseño. La geometría del reactor también influye en la mezcla. Una mala agitación representa problemas operativos además de la disminución en la producción de biogás. Atascos y daños en las bombas, mayores gastos por mantenimiento de equipos y vaciado y limpieza de los digestores son algunos de las dificultades que pueden surgir de una agitación no adecuada.⁸⁰

Aplicaciones del biogás

El biogás tiene múltiples aplicaciones. Comúnmente se aplica como fuente de energía, calórica o eléctrica. Para comprender los posibles usos que se le puede dar al producto de la digestión anaeróbica, en la *tabla 5.6* se listan los valores del biogás con respecto al gas natural, propano, metano y al hidrógeno.

Tabla 5.6. Parámetros de diferentes tipos de gases.

Parámetros	Biogás*	Gas Natural	Gas Propano	Gas Metano	Hidrógeno
Valor Calorífico (Kwh/m ³)	7	10	26	10	3
Densidad (t/m ³)	1.08	0.70	2.01	0.72	0.09
Densidad con respecto al aire	0.81	0.54	1.51	0.55	0.07
Límite de exposición (% de gas en el aire)	6-12	5-15	2-10	5-15	4-80
Temperatura de encendido	687	650	470	650	585
Máxima velocidad de encendido en el aire (m/s)	0.31	0.39	0.42	0.47	0.43
Requerimiento teórico de aire (m ³ /m ³)	6.6	9.5	23.9	9.5	2.4

*Composición promedio CH₄ 65% y CO₂ 35%.

Según los datos de la tabla, el biogás comparte características muy similares al resto de los gases cuyo uso se aplica en la vida diaria de las personas. Uno de los usos más comunes es la energía térmica, como para calentar agua o cocinar. La iluminación es otra de las aplicaciones que se le puede dar al biogás mediante una mínima adaptación a los quemadores de gas convencionales. Se pueden diseñar sistemas combinados más

⁸⁰ Optimización de la agitación de un biodigestor anaerobio mediante mecánica de fluidos computacional. J. Sanches Rubal. Universidad politécnica de Madrid (2016), Madrid, España.

complejos para aprovecharlo en su totalidad. Existen sistemas de calor y electricidad, donde se aprovecha el calor residual al generar energía. Dicha energía térmica se puede aplicar para calentar el agua del proceso. También puede aplicarse el caso contrario, donde se aplica el biogás principalmente para el calor y la generación de electricidad es secundaria.

Tanto para la generación de electricidad como para el calor, se suelen aplicar turbinas de gas. Sin embargo, existen otras tecnologías que pueden servir para los mismos fines. Por ejemplo, los motores de combustión interna tipo otto o diesel son bastante usados también. La elección de la tecnología dependerá de la cantidad de biogás disponible, la escala de la instalación y los recursos disponibles.

Una turbina a gas transforma energía química contenida en un combustible en energía mecánica. Esta energía mecánica a su vez se puede conectar con un generador eléctrico para producir electricidad. Se dice turbina a gas por el tipo de combustible que utiliza, en el presente caso, el biogás. El equipo está compuesto por el filtro de aire de admisión, el compresor que aumenta la presión del fluido de trabajo, tiene un sistema de aporte de calor, elemento expensor o turbina, el escape, el rotor, la carcasa y sistemas auxiliares, véase *figura 5.8* En el compresor se produce la elevación de la presión del gas. También, se eleva a temperaturas alcanzando valores mayores a 1000°C . Es gracias a estos cambios que el fluido acumula mucha energía potencial que se puede transformar en energía cinética que en el rotor se convierte en energía rotativa; el objetivo de la turbina.

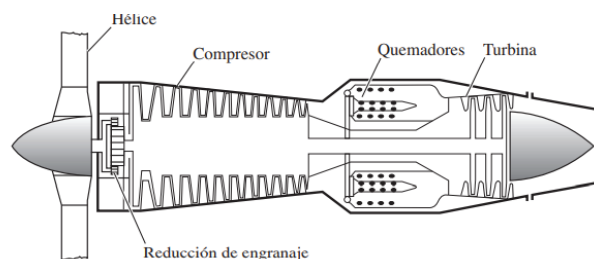


Figura 5.8. Turbina a gas.

Fuente:⁸¹

Tiene pequeño peso y volumen con respecto a su potencia. Presenta ventaja por ausencia de movimientos y rozamientos en superficies lisas. También implica menos consumo de aceite y lubricante a diferencia de los motores de combustión interna y se puede obtener la energía en cortos periodos de tiempo. A diferencia de las turbinas de vapor, tiene un mantenimiento más sencillo, mayor fiabilidad y menor probabilidad de fallo.

⁸¹ [CICLOS DE POTENCIA DE GAS | Mind Map \(goconqr.com\)](#)

No obstante, presenta dos inconvenientes; la alta velocidad de rotación y el bajo rendimiento. A diferencia de los diésel que llegan al 50%, la turbina ronda alrededor del 40%.

Con el tiempo y las demandas del mercado energético, se fueron diseñando nuevas turbinas. Los modelos más grandes son mayores a 100 kW, mientras que también existen las microturbinas que rondan desde los 25 hasta los 100 kW. Las microturbinas se suelen implementar cuando la recuperación del biogás es menor a 8 m³/min con contenidos de metano hasta 35 %. Son más costosas que las turbinas pero tienen la ventaja de que se pueden añadir o quitar cuando se lo requiera en base al flujo de gas disponible. Adicionalmente, se requiere un tratamiento para la remoción de siloxanos, humedad y material particulado. La eficiencia de estos equipos aumenta con el tamaño y para optimizar se suele incorporar un recuperador que precaliente al aire de combustión.

Los motores de combustión interna también son aplicables. A diferencia de las turbinas, esta tecnología tiene mayor mantenimiento y requiere de lubricación por los rozamientos de sus piezas. Para poder utilizar los motores para la generación de energía y calor, se debe realizar un pretratamiento para la remoción del H₂S por debajo de los 100 ppm y el vapor de agua.

Dejando de lado el calor y la energía, existe otra aplicación del biogás. Es posible implementarlo para uso vehicular, de manera similar a como funciona el gas natural como combustible actualmente. Para poder aplicar su uso, se debe asegurar que la composición del biogás sea muy similar a la del gas natural. Adicionalmente, varios vehículos cuentan con un tanque y sistema de suministro de gas aparte del sistema de gasolina.

No obstante, su uso presenta varias desventajas que limitan su funcionamiento. El almacenamiento del gas ocurre dentro de cilindros a alta presión. Para que esto sea posible, deben ser purificados antes de su compresión. Asimismo, los cilindros implican una disminución en la capacidad de carga en los vehículos y es a su vez, costoso. Finalmente, no se cuenta con una red de abastecimiento para este tipo de aplicaciones. Por lo tanto, si bien es posible y existen registros de que se haya llevado a cabo, no es uno de sus usos más aplicados.

Purificación o acondicionamiento del biogás

Como se destacó en el apartado anterior, es fundamental realizar una purificación o acondicionamiento del biogás para su posterior uso. A la salida del digestor, no se obtiene un producto compuesto 100% por CH_4 y CO_2 . La purificación aumenta el poder calorífico del biogás y permite alcanzar los requerimientos del producto de acuerdo a su fin.

La *figura 5.9* resume los diferentes tratamientos para las futuras aplicaciones del biogás. Se puede remover únicamente la porción gaseosa de azufre para utilizarse tanto en una caldera para generar calor o en un sistema de cogeneración de calor y electricidad. Por otro lado, se debe aplicar un tratamiento completo para ir hacia las celdas de combustible para producir calor y electricidad o para ser comprimido y utilizarse como combustible. El tratamiento completo elimina gran parte del CO_2 , el vapor de agua y otros gases.

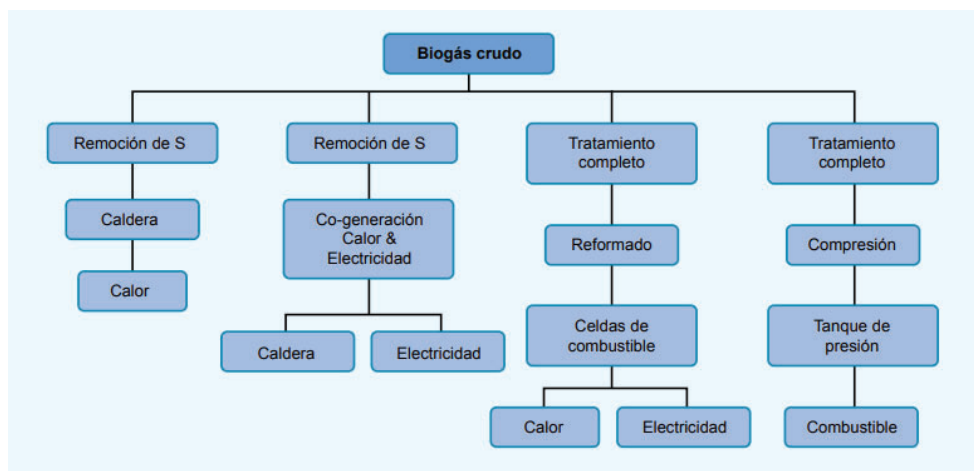


Figura 5.9. Tratamiento del biogás crudo. Fuente⁸²

Teniendo en cuenta que el principal objetivo del presente trabajo es generar energía eléctrica y térmica, se debe eliminar el azufre y vapor de agua. El azufre puede encontrarse en varias especies. Por lo general se encuentra en forma de sulfuro de hidrógeno (H_2S), pero cuando hay presencia de vapor de agua dentro del biogás, se puede combinar y sintetizar ácido sulfúrico (H_2SO_4); un agente muy corrosivo y riesgoso para las instalaciones.

Biofertilizante

Otro subproducto valioso que se sintetiza en la digestión anaerobia es el biofertilizante. Se puede obtener tanto de forma líquida como sólida, y se refiere a la materia orgánica estabilizada rica en elementos minerales. Cuando proviene de un digestor tipo

⁸² Prof. María Teresa Varnero Moreno Manual de biogás, Santiago de Chile (2011)

continuo con una alta tasa de carga y un porcentaje de sólidos totales menor al 12% se obtiene biofertilizante de forma líquida. Por otra parte, cuando el digestor es tipo barco semicontinuo, se obtiene un biofertilizante sólido. La ventaja del segundo es que su comercialización es más sencilla por su estado físico, por lo que el subproducto líquido suele ser menos comercializado.

En las zonas rurales, este subproducto es muy apreciado por los beneficios que aportan al ambiente. Por un lado, contienen elementos indispensables para el crecimiento de la vegetación. Además, mejora la estructura del suelo por el aporte de materia orgánica estabilizada. Reducen en particular la compactación, la erosión, la capacidad de retención del agua e intercambio gaseoso. Se puede comparar este producto con el compost, que también es muy utilizado en suelos. En la tabla .. se muestra una comparación del compost con un fertilizante proveniente de una degradación anaeróbica. No obstante, es importante destacar que los niveles de nutrientes del fertilizante dependen fuertemente del sustrato inicial.

Tabla 5.7. Comparación de los parámetros del compost y el biofertilizante.

Parámetros	Compost	Biofertilizante
pH (H ₂ O 1:5)	7,2	7,9
MO(W-B) 1:5	20	45
MO (Calcinado) %	39	58
N total %	1,0	1,8
P total %	4,1	8,4
K total %	0,4	0,7
Relación C/N	19,0	25,0
Conductividad eléctrica dS/m	10,1	14,4

Fuente: Prof. María Teresa Varnero Moreno Manual de biogás, Santiago de Chile (2011)

Por otra parte, se sabe que del reactor biológico se obtienen lodos y efluentes. Los lodos son un material sólido pastoso con un porcentaje de humedad elevado; el típico biofertilizante. Por otro lado, los efluentes suelen poseer alrededor de un 2% de sólidos totales, nutrientes y fuentes carbonadas disueltas. Este tiene sus aplicaciones también ya que puede utilizarse como un tipo de riego que aporta nutrientes.

Componentes de la digestión anaeróbica

Existen varios tipos de biodigestores, cada uno adaptado a diferentes necesidades y condiciones. Los biodigestores de carga continua y los biodigestores tipo batch son dos de los modelos más comunes que existen. Pero actualmente existen otros con sus propias características y adaptaciones específicas. Para comprender las diferentes variaciones que existen, es importante conocer previamente la composición típica de un biodigestor genérico.

Los principales componentes de un digestor anaeróbico lo constituyen un reactor o contenedor de las materias primas a digerir; un contenedor de gas, con los accesorios para salida de biogás, entrada o carga de materias orgánicas primas y salida o descarga de materias orgánicas estabilizadas.

Reactor

El reactor es la unidad principal de la digestión anaeróbica. Es donde se lleva a cabo todo el proceso bioquímico donde se degrada el sustrato orgánico y se sintetizan los subproductos. Existen diferentes formas geométricas para los reactores. Si bien pueden ser de forma cilíndrica, cúbica, ovoide o rectangulares, la gran mayoría son de forma cilíndrica y con una inclinación en el suelo para la extracción del material sedimentable inorgánico. Actualmente, suelen contar con cubiertas tanto fijas como flotantes para asegurar una buena conservación de temperatura, atmósfera anóxica e impedir el escape de los olores. Los materiales que se suelen implementar en su construcción incluyen piscinas cubiertas de HDPE, concreto y acero inoxidable.⁸³

Entrada y salida del efluente

Normalmente, el afluente ingresa al reactor por la parte superior, mientras que el sobrenadante se extrae del lado contrario. Para la remoción del efluente, se suelen colocar entre tres a cinco tubos en diferentes niveles o un único tubo con varias válvulas a diferentes niveles. Estas piezas están colocadas de manera tal de asegurarse que el

⁸³ Curso: Operación y Mantenimiento de Sistemas de Biodigestión de Pequeña y Mediana Escala Unidad III: Biodigestores y Operación de Plantas de Biogás. Academia de las renovables, Santa Fe.

efluente de salida posea la mejor calidad posible, es decir, con el menor contenido de sólidos.⁸⁴

Extracción de lodos

La extracción de lodos sucede desde la parte inferior del digestor anaeróbico. Comúnmente, se colocan tuberías de extracción con 15 cm de diámetro sobre bloques a lo largo del suelo inclinado. La remoción del lodo sucede desde el centro del digestor.⁸⁵

Sistema de gas

El sistema de gas comprende todos los pasos desde la captación del gas generado en el digestor anaeróbico hasta el almacenamiento y quemador de gases sobrantes. Está compuesto de las siguientes partes: cúpula de gas, válvulas de seguridad y rompedora de vacío, apagallamas, válvulas térmicas, separadores de sedimentos, purgadores de condensado, medidores de gas, manómetros, reguladores de presión, almacenamiento del gas, quemador de los gases sobrantes

Muestreador

El muestreador permite tomar muestras del lodo dentro del digestor sin riesgos de pérdida de gas o de crear condiciones peligrosas para la mezcla. Esto se logra ya que consiste en una tubería con diámetros que rondan entre 8 y 10 cm que poseen una tapa de cierre con bisagras sumergido 30 cm en el lodo del digestor.

Sistema de calentamiento del digestor

Como se mencionó previamente, la digestión del sustrato y la calidad del biogás dependen fuertemente de la temperatura de operación. Los rangos deseables más comunes para un digestor anaeróbico moderno suelen estar entre los 35 y 37°C. Para calentar el digestor, se suele recircular el lodo empleando un intercambiador de calor,

⁸⁴ Spahr, D.A., Carrizo, J.F., Patiño, M.B., Manera, M.E., & Rubiolo, G.S. (2019). Relevamiento, evaluación y optimización de biodigestores. En I Congreso Internacional de Ingeniería Aplicada a la Innovación y Educación y Asamblea General de ISTECSecretaría de Ciencia, Tecnología y Posgrado.

⁸⁵ Martínez Moreno, J.A., Anaya Vargas, C.M., Ávila Castro, D.A., & Perez Penagos, O.A. (2020). Diseño de un biorreactor casero para la producción de biogás. Microbiología Industrial. Licenciatura QFBT. UVM Lomas Verdes.

mismo utilizando el gas generado como combustible de caldera o un sistema de intercambiador de calor.

Tipos de digestión anaeróbica

Conociendo la composición básica de equipamientos de un digestor anaeróbico, se pueden categorizar diferentes configuraciones en base a las características de los sustratos a digerir. En principio, se pueden subdividir según el tipo de alimentación que manejan; continuos, semicontinuos y en batch. Cada sistema tiene sus beneficios y funciona mejor acorde al sustrato de interés.

Los digestores que poseen un tipo de alimentación ininterrumpida son los del tipo continuos. Dentro de este grupo las características que más se destacan son el mantenimiento de la uniformidad. El efluente del reactor es equivalente al afluente y la producción del biogás se mantiene en el tiempo. Son eficientes para digerir grandes cantidades y a su vez producir buena cantidad de biogás.

Otra opción que se puede aplicar, es la alimentación en batch o en lotes. En este caso, se introduce un afluente, se lo deja un determinado tiempo para que ocurra la digestión y se remueve. Este tipo de reactores tiene el peor rendimiento en la generación de biogás y es el menos eficiente para digerir grandes cantidades, como es en el caso de subproductos industriales. La alimentación semi continua combina los ejemplos mencionados anteriormente. Consta, en un ingreso continuo de afluentes y una descarga en lotes. Los caudales de salida son de cierta cantidad con el objetivo de mantener un volumen efectivo constante dentro del reactor.

A su vez, se puede clasificar a los digestores, independientemente de su alimentación, en dos grandes grupos; de alta o baja velocidad. Solo uno de estos tipos es apto para la producción de energía a partir de biogás y son los de alta velocidad. En estos casos, se controlan los parámetros fundamentales de la digestión, como la temperatura, el TRS, mezclado, etc. El tiempo de retención puede variar entre 15 a 30 días para la digestión mesofílica y entre 5 a 15 días para la digestión termofílica. Por otra parte, la tasa de carga de sólidos volátiles típica para una digestión mesofílica es de 1,6 – 4,8 kg/m³.d. Para un digestor termofílico, la tasa de carga de SV puede ser el doble de uno mesofílico. La *figura 5.10* resume la clasificación de los digestores anaerobios según el tipo de velocidad que tengan.

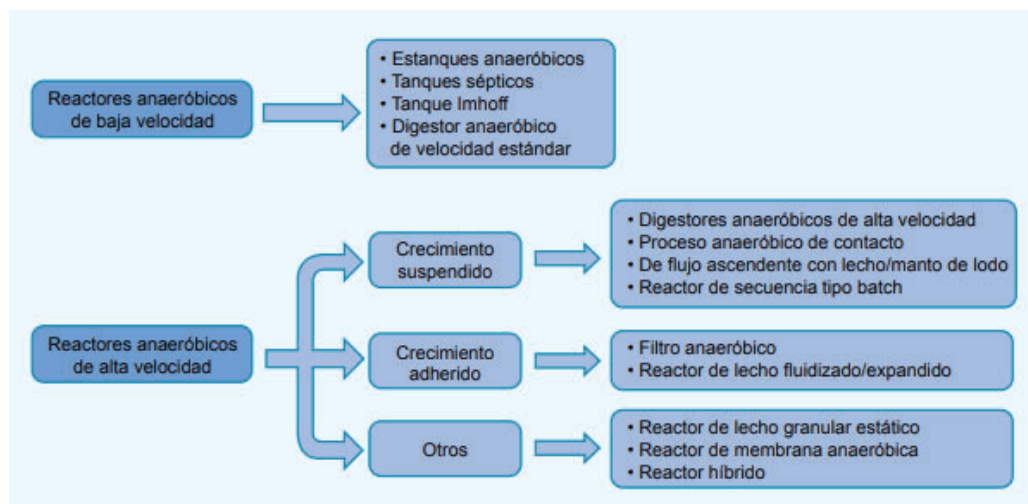


Figura 5.10. Clasificación de los reactores anaeróbicos.

Fuente⁸⁶

Teniendo en cuenta que uno de los objetivos del presente trabajo es analizar la factibilidad de implementar un digestor anaeróbico para la generación de energía, se analizan los reactores de alta velocidad. Dentro de este grupo, las tecnologías más comunes son los reactores de secuencia tipo batch, los agitados continuos (CSTR) y los de proceso anaeróbico de contacto (PAC). Como bien se observa en la *figura 5.10*, existen otras tecnologías aplicables. No obstante, se excluyen en el presente proyecto por su baja practicidad en base a las características del sustrato que se desea digerir.

Reactor Anaerobio en Secuencia tipo Batch

Este sistema funciona en cuatro etapas bien diferenciadas. En primera instancia se tiene la alimentación del reactor, donde el afluente ingresa al sistema. Continúa con un período de reacción, donde se define un tiempo de operación para permitir la degradación del sustrato. Transcurrido el tiempo, se procede con la tercera etapa, la sedimentación. En este caso, se detiene la agitación para permitir que decante la biomasa y así poder separarla del clarificado. La cuarta y última etapa es la descarga y se refiere a la salida del efluente depurado. En la *figura 5.11* se muestra un esquema del sistema.

Si bien tiene menor rendimiento para la generación de biogás, presenta algunas características particulares que lo pueden hacer ver como una alternativa viable.⁸⁷ Por un lado, presenta una gran flexibilidad de operación. Permite un mejor control del proceso y

⁸⁶ Prof. María Teresa Varnero Moreno Manual de biogás, Santiago de Chile (2011)

⁸⁷ Prof. María Teresa Varnero Moreno Manual de biogás, Santiago de Chile (2011)

una mejor calidad del efluente, ya que la descarga puede ser llevada a cabo cuando el efluente presenta los estándares requeridos. Finalmente, debido a que la sedimentación ocurre dentro del mismo reactor, no es necesario incluir una unidad aparte, disminuyendo los costos constructivos y de mantenimiento.

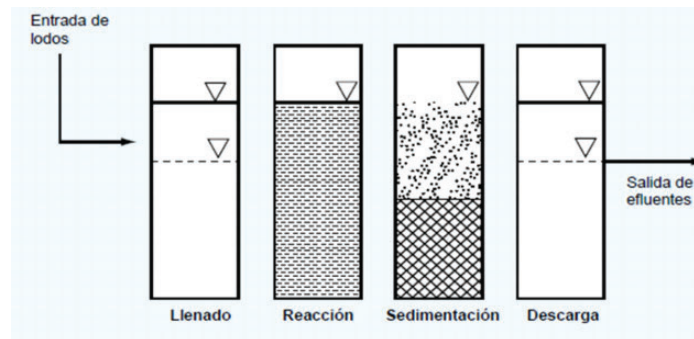


Figura 5.11. Reactor anaeróbico Batch.¹⁹

Digestor de Mezcla Completa (CSTR)

Los digestores anaeróbicos de mezcla completa (CSTR), a diferencia del caso anterior, son continuos. En su interior, se mantiene una distribución uniforme de las concentraciones de sustrato e inóculo gracias a la presencia de un sistema de agitación a baja velocidad. El esquema básico de este tipo de reactores se observa a continuación en la *figura 5.12*. Este tipo de sistema es sencillo de diseñar y es uno de los más utilizados para los residuos. No obstante, a diferencia de otros tipos de digestores, presenta un tiempo de retención bastante elevado, lo cual requiere un mayor volumen de reactor y por lo tanto, mayores costos.

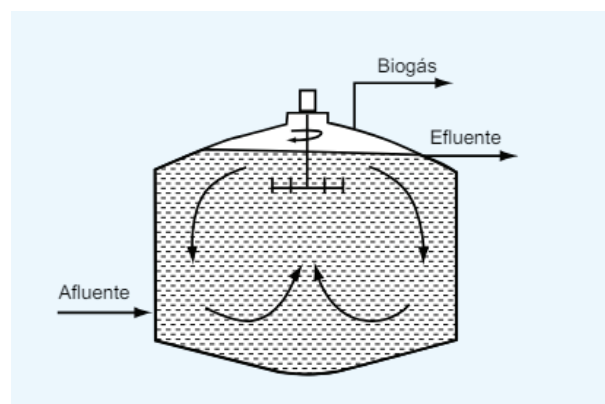


Figura 5.12. Reactor anaeróbico CSTR.¹⁹

Proceso anaeróbico de contacto (PAC)

El diseño del proceso anaeróbico de contacto (PAC) se compone de un reactor anaeróbico de tipo convencional con agitación como se vio previamente. Como se puede observar en la *figura 5.13* Luego del reactor convencional el afluente atraviesa un desgasificador que permite recuperar el biogás remanente adherido a las partículas del lodo. Otra ventaja que presenta el desgasificador es que permite mejorar la sedimentación del lodo en el tanque de decantación para poder ser recirculado. Esto permite reducir el tiempo de retención; de 1 a 5 días.⁸⁸

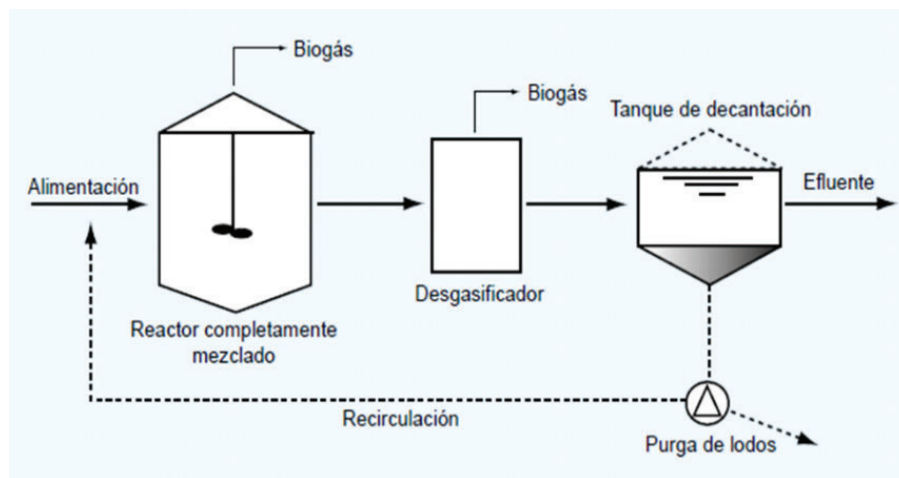


Figura 5.13. Reactor anaeróbico PAC.¹⁹

Los sistemas PAC son particularmente útiles para corrientes con alta carga de sólidos suspendidos. La concentración de biomasa típica de un reactor es de 4 – 6 g/L, con concentraciones máximas alcanzando 25 – 30 g/L, dependiendo de la habilidad para decantar del lodo. La tasa de carga varía entre 0,5 a 10 kg DQO/m³ .día.

Después de analizar los parámetros y condiciones a tener en cuenta para obtener un buen rendimiento en la biodigestión anaeróbica, se procede a definir la propuesta más adecuada en base a la caracterización de la WDGS. En el siguiente apartado se presenta la configuración seleccionada para la digestión anaeróbica. Donde se mencionan las propuestas del pretratamiento, tratamiento de digestión anaeróbica y tratamiento de biogás.

⁸⁸ Metcalf & Eddy

CAPÍTULO 6: Memoria Descriptiva

Se eligió un sistema compuesto por tres unidades principales; un tanque de pre-fermentación, un digestor anaeróbico y un sedimentador secundario. Esta selección se basa en la capacidad de cada componente para realizar su función específica dentro del proceso. El tanque de pre-fermentación prepara la materia orgánica antes de ingresar al digestor anaeróbico, donde se produce la descomposición bioquímica. Luego, el sedimentador secundario separa los sólidos del líquido residual, completando un sistema que maximiza la producción de biogás y optimiza el consumo de agua y temperatura.

El objetivo del pretratamiento es acondicionar, homogeneizar y ecualizar al sustrato previo al ingreso del digestor anaeróbico. Como se indicó en el Capítulo 3, se sabe que la WDGS cruda posee un pH ácido y una temperatura que ronda los 90°C. Es indispensable corregir estos valores antes de ingresar al digestor ya que implican un gran riesgo para el inóculo. Además, se debe corregir la carga de sólidos totales previo al ingreso de la siguiente unidad, el digestor anaeróbico.

El tanque diseñado tiene un volumen de 84,82 m³ con una altura de 3 m y un diámetro de 6 m. Cuenta con 2 ingresos, por un lado, la WDGS cruda generada por la evaporación de la vinaza y, por el otro, agua recirculada para la dilución. Con la mezcla se obtiene un porcentaje de sólidos totales del 10,55%. El tiempo de retención de la mezcla es de 24 hs y alcanza una temperatura de 40°C. Para llegar a pH neutro previo al ingreso del digestor anaeróbico, se agrega 1 m³/d de una solución básica NaOH 10 M. La presente unidad está cerrada en la parte superior para evitar malos olores y recuperar biogás en caso de ser generado.

La carga de esta unidad está dada por dos líneas. La línea semisólida, que transporta la WDGS, baja por gravedad mediante un transporte helicoidal de tornillo. Se realiza la carga lo antes posible para no generar pérdidas en la temperatura. El efluente líquido es bombeado e ingresa utilizando una bomba centrífuga por la parte superior del tanque, es decir, a 3 m de altura.

En cuanto al mantenimiento y operación, para garantizar una dilución en la concentración de sólidos totales de la mezcla, se reemplazará el recirculado de agua de dilución por una fuente de agua limpia cada 2 meses. Además, para asegurar un correcto

acondicionamiento de la mezcla, se cuenta con una Sonda multiparamétrica para el control de pH, temperatura, OD y conductividad eléctrica para controlar en nivel de la salinización por la recirculación.

En cuanto al digestor anaerobico, se optó por una tecnología con buenos rendimientos en la generación de biogás de calidad y que tenga en cuenta la naturaleza del sustrato, en particular, el contenido de sólidos totales y la DQO. Si bien los reactores tipo batch presentan sus beneficios para sustratos con un porcentaje de sólidos elevados, no es el más eficiente para la generación de energía, por lo que se opta por un sistema continuo.

Asimismo, dado que la WDGS tiene un alto contenido de sólidos, se seleccionó una tecnología PAC para disminuir los TRH, y por lo tanto, el volumen. En cuanto a la geometría, se propone una forma del tipo cilíndrica para evitar que los microorganismos se posicionen en las esquinas y consecuentemente retrasen el proceso de digestión. Además, es útil para evitar accidentes ya que la presión es baja porque no hay concentradores de esfuerzos dentro del reactor.

Los sistemas PAC están compuestos por un reactor anaeróbico CSTR y un sedimentador secundario. En este caso, el volumen total del reactor es de 810,7 m³ con un diámetro de 12,7 m, una altura de 6,4 m y un espesor de 50 cm. El tiempo de retención hidráulico es de 11,5 días y el tiempo de retención celular 22 días.

El porcentaje de sólidos totales dentro del reactor es del 15%. Para no superar el límite permisible de sólidos totales, se optó por una relación sustrato inóculo igual a 1 (S/I = 1). Que si bien no es la que tiene un mayor rendimiento en generación de biogás, aún así la cantidad de metano obtenida continúa siendo alta. En base a esta elección, se determina que la remoción de sustrato del reactor es de un 51%, generando un caudal de biogás a 35°C de 3.432,18 m³/d.

Para contener el biogás en el reactor anaeróbico, se utiliza un gasómetro de doble membrana. La unidad está situada sobre el digestor y se compone por una membrana exterior que le proporciona una geometría semicircular y una segunda membrana interior para cerrarla herméticamente. Por otra parte, se cuenta con un soplador para transportar de forma continua el biogás generado y para mantener la presión constante.

El biogás generado atraviesa un sistema de tratamiento para purificarlo y convertirlo en energía. La primera unidad del tratamiento es una trampa de humedad. En el presente

proyecto, se debe remover un caudal másico de agua de 117 kg H₂O/día. Tanto la entrada como la salida de la corriente gaseosa se sitúan en la parte superior del tanque, mientras que la corriente líquida se descarga automáticamente a través de un sifón cuando el nivel de condensado del tanque supera el nivel de salida de la tubería del sifón. El material que lo compone es acero inoxidable.

En segundo lugar, se diseñó una torre de adsorción para la desulfuración del gas. Esta etapa es importante ya que las concentraciones deben ser menores a 100 ppm para entrar al cogenerador. La desulfuración se efectúa por el paso de la corriente gaseosa a través de una columna previamente cargada con reactivos de compuestos férricos en estado sólido y con forma granulada sobre una superficie específica. La instalación consiste en un recipiente cilíndrico y hermético de acero inoxidable, provisto de una tapa para el reemplazo del material adsorbente y una válvula de drenado en el fondo, para eliminar condensados que pudieran generarse. El gas ingresa por la parte superior, desplazándose hacia la parte inferior a medida que el reactivo se va agotando, y sale del reactor por la parte inferior. El caudal de sulfhídrico a tratar es 3,64 kg H₂S/d; lo que requiere 8,5 kg Fe₂O₃/d.

El biogás es aprovechado para la generación de energía térmica y eléctrica mediante una unidad de cogeneración CHP. El biogás se quema en un motor de combustión interna acoplado a un generador. Además de estos elementos un módulo CHP consiste en sistemas de intercambio de calor para la recuperación de energía térmica de los gases de escape, circuitos de aceite de lubricación, sistemas hidráulicos para la distribución del calor y conmutación eléctrica, así como un equipo de control para la distribución de la potencia y el control de la unidad CHP. La generación de energía eléctrica y térmica es de 8546,1 kWh/d y 9431,63 kWh/d, respectivamente.

Se busca prevenir fugas de calor mediante la aplicación de material aislante en el diseño del reactor. En este caso, se utiliza espuma de poliuretano de 10 cm de espesor cubierto por una chapa de revestimiento galvanizado. No obstante, cuando las condiciones ambientales son más extremas, se necesita de un sistema de calentamiento extra.

Se optó por un sistema de intercambio de calor externo donde el fluido caliente producido en el equipo de cogeneración transfiere calor a la mezcla de sustrato y agua dentro del digestor anaeróbico. La energía térmica proviene del circuito de refrigeración interna de los motores del Equipo de Cogeneración M08 CHP B333, a una temperatura promedio de 85°C.

Al tratarse de un sistema de calefacción externo, se facilita su limpieza y mantenimiento. El intercambiador de calor es de doble tubo a contracorriente. El flujo frío circula por el tubo interior, mientras que el agua caliente circula por el espacio anular de los dos tubos. El objetivo del intercambiador es proveer a la mezcla con una temperatura final de 35°C. Los cálculos se realizaron para el invierno, donde las temperaturas exteriores están por debajo de los 10°C. En lo que resta del año, no es necesario calentar la mezcla, ya que el sustrato ingresa al tanque de pre fermentación con 90°C, por lo que se supone que las temperaturas exteriores no van a afectar a la mezcla de manera tal que requiera calor externo. El área de intercambio de calor es de 2,22 m². Esto se logra mediante tubos de 18 m de largo por 6 horquillas interconectadas.

Para comunicar el tanque de pre-fermentación con el reactor CSTR, se utiliza una cañería de PVC de 40 mm conectada a una bomba con potencia mínima de 51,5 W lo suficiente como para elevar desde los 1 m de salida del la mezcla del tanque de pretratamiento hasta 5,5 m (altura máxima del líquido dentro del biodigestor).

Por otra parte, el digestor anaeróbico está conectado por otra cañería de PVC con un diámetro de 25 mm para el recirculado. Se puede utilizar la misma bomba para este caso. La salida en el biodigestor se encuentra a los 5 m de altura con un ángulo de inclinación de 20° para evitar el ingreso de burbujas. La conexión cuenta con válvulas de cierre. Además, en caso que se requiera vaciar completamente el digestor anaeróbico por mantenimiento o reparación, se cuenta con una válvula de cierre de 110 mm colocada en la parte inferior.

Para la salida del biogás se cuenta con un sistema de cañerías de PVC de 85 mm por su resistencia a la corrosión asociada a la presencia del ácido sulfhídrico. Se incluye también una válvula de seguridad para aliviar la presión en el interior del biodigestor en caso que se requiera. El límite de la válvula de seguridad establecido para aliviar la sobrepresión es de 25 bar.

Para realizar un control detallado de las condiciones de acidez, temperatura y presión dentro del digestor anaeróbico, se instala una sonda multiparamétrica y un manómetro. Además, se realizan tomas de muestras periódicas para controlar los parámetros biológicos dentro del reactor, y la presencia de inhibidores.

La última unidad del sistema de digestión anaeróbica es el sedimentador secundario. Su uso permite recircular biomasa dentro del reactor y a su vez, recircular agua para la dilución de la WDGS en el tanque de pre-fermentación. De esta manera, se permite una disminución en el volumen del digestor anaeróbico y ahorro del consumo de agua. Además, al igual que el ecualizador, el sedimentador secundario es cerrado para captar biogás en caso de ser generado.

En este tipo de sistemas, el tiempo de retención es superior a diferencia de los sistemas aeróbicos. En este caso, se optó por un tiempo de retención de 24 horas. Además, se debe tener en cuenta que el caudal de entrada es el caudal de la mezcla WDGS + agua y el caudal recirculado. El volumen de la presente unidad es de 150,51 m³, con una altura de 4,77 m y un diámetro mayor de 7,9 m. El sedimentador está compuesto por una zona de sedimentación y un volumen de tolva. La *figura 6.1* muestra un esquema de la planta de digestión anaeróbica junto con los volúmenes de cada unidad.

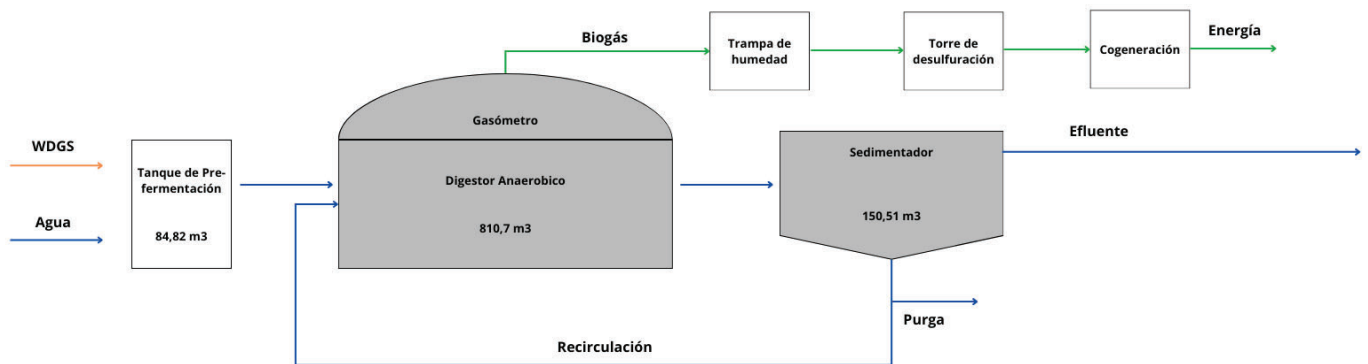


Figura 6.1. Esquema de la planta PAC.

Fuente: Elaboración propia.

Los efluentes líquidos tienen como destino la laguna donde actualmente se depuran los efluentes cloacales de la empresa. En cuanto a la disposición de lodos, su destino es implementarse como fertilizante tanto para la propia industria de bioetanol como para su posterior comercialización. De todos modos, tanto los efluentes líquidos como los lodos generados no se tienen en cuenta dentro del alcance del proyecto, por lo cuál solo se describen algunas recomendaciones al respecto en las conclusiones.

CAPÍTULO 7: Memoria de cálculo

Datos

Parámetros de diseño

En la *tabla 7.1* a continuación, se presentan los datos de la WDGS cruda, recién producida y del biogás. Esta información va a ser utilizada para realizar todos los cálculos de dimensionamiento para el sistema de tratamiento de digestión anaeróbica. En esta sección se presentan las ecuaciones, adopciones y cálculos realizados durante el dimensionamiento de la planta de biogás planteada.

Tabla 7.1. Datos del sustrato y biogás

Parámetros de diseño	WDGS	Unidades	Parámetros de diseño	Biogás
pH	3,95	upH	Composición	60% CH ₄ y 40% CO ₂
Temperatura	90	°C	Contenido energético	6,0 kWh/m ³
ST	0,35	g/g	Equivalente de combustible	0,60 kWh/m ³
SV	0,33	g/g	Límite de explosion	6 - 12% de biogás en aire
SF	0,01	g/g	Temperatura de ignición	650 - 750°C
Humedad	65,50	%	Presión crítica	74 - 88 atm
Densidad	1.100	kg/m ³	Temperatura crítica	-82,5°C
DQO	100	kg/m ³	Densidad normal	1,2 kg/m ³
PBM	378,7	Nml/g SV _s	Masa Molar	16,043 kg/kmol

El valor del porcentaje de humedad, el PBM, pH y las concentraciones de sólidos totales, volátiles y fijos fueron determinadas en laboratorio como se indicó previamente en el Capítulo 4. Por otra parte, en cuanto a los valores de, temperatura de salida y densidad, fueron provistos por la empresa generadora de bioetanol.

En reiteración con lo mencionado al comienzo del Capítulo 1, la empresa genera un caudal máximo anual de 145.000 m³. En efecto, se obtienen un total de 175.000 toneladas de WDGS al año. Conociendo que la planta opera los 365 días, las 24 horas del día, se estima una producción mensual 14.000 toneladas de WDGS, que equivalen a un volumen de 12.727 m³. A modo de resumen, la *tabla 7.2* indica los valores de caudal tanto másico como volumétrico diario, semanal, mensual y anual.

Tabla 7.2. Valores de caudal de diseño de la línea sólida utilizada en el digestor anaeróbico.

Caudal	Caudal másico (t)	Volumétrico (m ³)
Diario	19,9	18
Semanal	139,3	127
Mensual	14.000	12.727
Anual	175.000	159.091

Fuente: Elaboración propia

Pre-Fermentador

La primera unidad del sistema de digestión anaeróbica es el pre-fermentador. Está compuesto por un tanque que tiene como objetivo preparar a la WDGS para posteriormente ingresar al digestor. En esta etapa también ocurre el primer paso de la digestión anaeróbica, la hidrólisis.

El pre fermentador busca alcanzar una mezcla con las condiciones que requiere un CSTR. Por lo tanto, con el objetivo de no superar un máximo de 15% ST dentro del reactor, se diluye la WDGS (35 %ST) con un caudal de agua limpia que posteriormente será recirculado con el fin de ahorrar agua. La temperatura del agua se define en base a la temperatura que se desea que tenga la solución al ingresar al digestor. Asimismo, se introducen los nutrientes y la base requerida para neutralizar el pH. Por último, se realiza un mezclado eficiente para asegurar que las condiciones son homogéneas para toda la mezcla. En los siguientes apartados se muestran los cálculos que fueron realizados para dimensionar la presente unidad.

Dilución

Caudales

Considerando que dentro del digestor anaeróbico habrá sólidos totales por parte de la biomasa, se define como objetivo alcanzar aproximadamente un 9% de sólidos totales en el tanque pre- fermentador. Para calcular el volumen de agua requerida para la dilución se utiliza la *ecuación 7.1*, asumiendo una densidad final de la mezcla igual a 1000 kg/m³.

$$C_{inicial} \cdot V_{inicial} = C_{final} \cdot V_{final}$$

(Ecuación 7.1)

Donde:

C_{final} : concentración deseada de sólidos presentes en la mezcla, expresados en % kg/m³.

$C_{inicial}$: concentración de sólidos presentes en la WDGS, expresados en % kg/m³.

V_{final} : Volumen final de la mezcla.

$V_{inicial}$: volumen inicial.

Sabiendo que el caudal diario corresponde a 18 m³, se requieren de **50,4 m³** por día para diluir al sustrato. El volumen final de la mezcla es de **69,3 m³**.

Concentración de Sólidos Totales

Como se quiere recircular el sobrenadante luego del sedimentador secundario para ahorrar el consumo del agua, se debe considerar un porcentaje de sólidos totales que esta trae. Por lo tanto, se asume que el agua recirculada va a contener un 2% de ST. El cálculo de sólidos totales dentro de la unidad de pre-fermentación se muestra en la *ecuación 7.2* donde se obtiene un **%ST final del 10,55%**.

$$ST_{mezcla} = \frac{Q_s \cdot ST_s + Q_{Agua} \cdot ST_{Agua}}{Q_{total}}$$

(Ecuación 7.2)

Donde:

ST_{mezcla} : es la concentración de sólidos totales, expresados en % m/m

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

ST_{Agua} : es la concentración porcentual de sólidos presentes en el efluente líquido recirculado, expresados en % m/m.

Q_s es el caudal diario de la WDGS, expresados en $m^3/día$.

Q_{Agua} es el caudal volumétrico diario de la fracción líquida, expresados en $m^3 /día$.

Q_{total} es el caudal diario total, expresado en $m^3/día$.

Teniendo en cuenta que el porcentaje de sólidos totales dentro del digestor anaeróbico debe ser menor al 15%, se calcula el %ST contemplando una relación S/l igual a 1. Con la densidad de mezcla adoptada y considerando que el inóculo tiene un 3% de sólidos totales y 2% de sólidos volátiles, se estima que la mezcla dentro del digestor anaeróbico contiene un % ST de **4,43%**.

Temperatura

Para determinar a qué temperatura se necesita que ingrese el agua recirculada al pre-fermentador, se adoptó una temperatura final de 40 °C. Por lo tanto, se igualó la fórmula fundamental de la calorimetría de la WDGS cruda y del agua recirculada. De esta manera, se puede despejar la temperatura del agua. La fórmula fundamental y despejada se muestran en la *ecuación 7.3*.

$$Q = m \cdot C \cdot (T_f - T_i)$$

$$T_{Agua} = \frac{m_{Agua} \cdot C_{Agua} \cdot T_f + m_{WDGS} \cdot C_{WDGS} \cdot (T_f - T_{WDGS})}{m_{Agua} \cdot C_{Agua}}$$

(Ecuación 7.3)

Donde:

m_{Agua} : masa del agua, kg

T_{Agua} : Temperatura del agua al ingresar al tanque, °C

C_{Agua} : Calor específico del agua, KJ/Kg.°C

m_{WDGS} : masa de la WDGS, kg

T_{WDGS} : Temperatura de la WDGS, °C

C_{WDGS} : Calor específico de la WDGS, KJ/Kg.°C

T_f : Temperatura final de la mezcla, °C

Por otra parte, para estimar el calor específico de la WDGS, se utiliza el calor específico del maíz y el porcentaje de humedad, como se indica en la *ecuación 7.4*. Los

valores de los datos utilizados para los cálculos de este apartado se muestran en la tabla y los resultados obtenidos se muestran en la *tabla 7.3*.

$$C_{WDGS} = \frac{C_{Maíz} \cdot \%ST + C_{Agua} \cdot \%Humedad}{100}$$

(Ecuación 7.4)

Donde:

$C_{maíz}$: Calor específico del maíz, , Kj/Kg. °C

%ST: porcentaje de solidos totales en la WDGS, 35%.

% Humedad: 65%.

C_{Agua} : Calor específico del agua, , Kj/Kg. °C

Tabla 6.3. Datos y determinación del calor específico de la WDGS y temperatura del agua.

m_{Agua}	m_{WDGS}	C_{Agua}	$C_{Maíz}^{89}$	T_f	T_{WDGS}
50.400 kg	19.800 kg	4,184 Kj/Kg.°C	3,120 Kj/Kg.°C	40°C	90°C
C_{WDGS}	3,811 Kj/Kg.°C				
T_{Agua}	22,1 °C				

Fuente: Elaboración propia.

pH

Según los valores experimentales obtenidos, la WDGS tiene un pH igual a 3,93. Para estimar el pH de la mezcla, se asume que el caudal de agua tiene un pH neutro. El cálculo se realiza como se indica en la *ecuación 7.5*. El pH de la mezcla obtenido es de 4,51.

$$pH_{mezcla} = - \log \left[\frac{V_{Agua} \cdot 10^{-pH_{Agua}} + V_{WDGS} \cdot 10^{-pH_{WDGS}}}{V_{Mezcla}} \right]$$

⁸⁹ COMPOSICIÓN, PROPIEDADES TERMOFÍSICAS Y DIFUSIVIDAD TÉRMICA DE BOLLO COCIDO. Revista Politécnica, vol. 12, núm. 22, pp. 79-86, 2016 Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid

(Ecuación 7.5)

Dimensiones

El tanque de pretratamiento se ubicará sobre la superficie y tendrá un volumen de acuerdo a la producción diaria de subproductos. También, se opta por una geometría cilíndrica para optimizar la homogeneización. Los cálculos realizados para el dimensionamiento son los siguientes:

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

(Ecuación 7.6)

$$V_{\text{útil}} = \frac{\pi \phi^2}{4} h_{\text{útil}}$$

(Ecuación 7.7)

Donde

Q : Caudal de diseño $69,3 \text{ m}^3/\text{d}$

$V_{\text{útil}}$: Volumen útil del reactor (m^3)

θ_{alim} : Tiempo de retención dentro del tanque de pretratamiento (d)

ϕ : Diámetro (m)

$h_{\text{útil}}$: Altura útil (m)

Con las fórmulas mencionadas, se procede a adoptar un tiempo de retención de 1 día y una relación diámetro:altura (D:H) igual a 2. En primera instancia, se calculó un volumen útil a partir de la ecuación 7.6 obteniendo como resultado un total de 69.3 m^3 . Con la relación D:H adoptada, se despeja de la ecuación 7.7. el diámetro y posteriormente la altura útil. Los valores obtenidos son 5,6 m y 2.8 m respectivamente. Sin embargo, por motivos de seguridad, se le suman 0,2 m a la altura útil, dando un valor de 3 m. Los parámetros de dimensionamiento reales para la construcción del tanque se obtienen mediante el redondeo de las variables calculadas. Los mismos se listan en la *tabla 7.1.* presentada a continuación.

Tabla 7.4. Datos de las dimensiones del tanque de ecualización cilíndrico

Base (m^2)	Diámetro (m)	Altura (m)	Volumen real (m^3)	Espesor (m)
28,27	6	3	84,82	0,3

*En el volumen total se incluye la revancha de seguridad de 0,5 m
Para las paredes se selecciona un espesor de 0,3 m.*

El tanque dispondrá de una entrada de sustratos por gravedad y el ingreso del caudal de agua por la parte superior del tanque. La salida de la mezcla se da a través de una bomba que será impulsada hasta el digestor. Por otro lado, estará cubierto para evitar la entrada de aguas pluviales y la emisión de malos olores.

Neutralización del pH

Teniendo en cuenta que el pH de la mezcla es 4,51, se debe agregar una base para neutralizarlo y así evitar la desestabilización del medio biológico. Para subir el valor del pH, se añade una solución de NaOH 10M. Frecuentemente utilizada en industrias para modificar pH. Para la determinación del volumen de base a incorporar en el tanque para alcanzar el pH neutro se aplica la siguiente *ecuación 7.8*:

$$V_{NaOH} = \frac{V_{Mezcla} \cdot (pH_{final} - pH_{Mezcla})}{[NaOH] \cdot pH_{final} - pH_{Mezcla}}$$

(Ecuación 7.8)

Donde:

V NaOH es el volumen aproximado de solución diluida de NaOH necesaria para neutralizar el pH del sustrato.

pH mezcla es el pH previo al agregado de solución neutralizadora.

pH final es el pH deseado, es decir 7,0.

[NaOH] es la concentración molar de hidronios presentes en la solución, 10 M.

Se deben agregar **1 m³** de NaOH 10 M por día en el tanque de pretratamiento para poder neutralizar el pH.

Agitación

Con el objetivo de asegurar la homogeneización de los parámetros del sustrato, el tanque de pretratamiento incluye un sistema de agitación. Para seleccionar específicamente al agitador, se calcula la potencia utilizando la *ecuación 7.9*. Se adopta un gradiente de 70 s⁻¹, dentro del rango 10-70s⁻¹. μ se obtiene de bibliografía, tomando como referencia el valor

agua residual tratada o los efluentes de plantas de tratamiento de aguas residuales a una temperatura de 35°C; 0,000933 kg/m.s.⁹⁰

$$P = \mu \cdot V \cdot G^2$$

(Ecuación 7.9)

Donde:

P: potencia del agitador, *W*

μ : viscosidad dinámica kg/m.s.

V: volumen del tanque, *m*³

G: gradiente, *s*⁻¹

Con el volumen del tanque de pre-fermentación calculado anteriormente, se obtiene una potencia de 387.77 W. Para este tipo de fluidos se recomienda el uso de agitadores tipo turbina o hélice. El equipo de agitación seleccionado es un agitador tipo hélice. Se seleccionaron dos agitadores tipo hélice de la marca Xylem modelo Flygt 4220. Véase *figura 7.1*.



Figura 7.1. Sistema de agitación dentro del tanque pre-fermentador.

Fuente: ⁹¹

Digestor Anaeróbico

El biodigestor PAC está constituido por un reactor de mezcla completa CSTR alimentado por el caudal de ingreso y un caudal recirculado que permite obtener un menor volumen de reactor y menores costos constructivos. A continuación se presentan las ecuaciones implementadas para calcular el dimensionamiento del digestor anaeróbico.

⁹⁰ Metclaf & Eddy

⁹¹ [Xylem | mixing equipment - flygt 4200](#)

La Carga Orgánica (CO): es la cantidad de materia orgánica que se introducirá en el reactor, determinada a partir del caudal y de la concentración:

$$CO = Q \cdot C$$

(Ecuación 7.10)

Donde:

CO: carga orgánica en términos de DQO (kg DQO/d).

C: Concentración DQO (kg DQO/m³).

Q: Caudal (m³/d).

Por otra parte, la carga orgánica volumétrica indica la carga orgánica expresada por volumen de reactor. Se obtiene a partir de la relación entre la carga orgánica diaria y el volumen del reactor y se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$COV = \frac{CO}{V_{reactor}}$$

(Ecuación 7.11)

Donde:

COV: carga orgánica volumétrica (kg DQO/m³.d)

V_{reactor}: Volumen del reactor (m³)

El tiempo de retención hidráulico (TRH) es el tiempo que el efluente a tratar permanecerá en el reactor. Debe ser suficiente para asegurar un tratamiento apropiado y aprovechado para la generación de biogás. Se calcula de la siguiente manera:

$$THR = \frac{V_{reactor}}{Q}$$

(Ecuación 7.12)

Donde:

THR: Tiempo de retención hidráulico (d)

Para determinar el volumen, en primer lugar se adopta un valor teórico de COV. En este caso, **5 kgSV/m³.d**, perteneciente al rango mencionado en el Capítulo 5, desde 0.5 a 10 kg DQO/m³ .día.⁹² Conociendo también la carga orgánica, mediante la *ecuación 7.11*, se obtiene un volumen útil de **696,3 m³**. No obstante, para asegurar un margen de seguridad,

⁹² Prof. María Teresa Varnero Moreno Manual de biogás, Santiago de Chile (2011)

se adopta una revancha del 15% del volumen útil. Asimismo, de manera similar a como se estimaron las dimensiones del tanque de pretratamiento, se adopta una relación D:H igual a 2. Por lo tanto, el volumen final se estima en base a la *ecuación 7.13*, mientras que las dimensiones del reactor se despejan con la relación y la fórmula volumétrica de un cilindro.

$$V_{total} = V_{\text{útil}} \cdot (1 + 0,15)$$

(Ecuación 7.13)

Donde:

V_{total} : Volumen total del reactor (m^3)

$V_{\text{útil}}$: Volumen calculado del reactor en base a la COV adoptada (696,3 m^3)

Finalmente, se obtiene un volumen de **800,7 m^3** , con un diámetro de 12,68 m y una altura de 6,3 m. Pero, por fines constructivos, se redondean dichos valores y se vuelve a estimar el volumen. Los valores son representados en la *tabla 7.5*. Las dimensiones del reactor permiten un tiempo de retención hidráulico de 11,5 días.

tabla 7.5. dimensiones finales del digestor anaeróbico

Variable	Valor
V_{Final}	810,7 m^3
H_{final}	6,4 m
ϕ	12,7 m
ε	0,5 m

V_{final} : volumen final

H_{final} : altura final

ϕ : diámetro

ε : espesor de la pared

Agitación

De igual manera que se realizó para el tanque de pre-fermentación. Se calcula la potencia del agitador utilizando la *ecuación 7.9*, adoptando nuevamente un gradiente de 70 s^{-1} y utilizando el volumen final de 201,06 m^3 . La potencia obtenida es de 3.706,3 W o bien, 3,7 kW.

Para el digestor anaeróbico se ha optado por un sistema de agitación mecánica vertical con motor sumergible ya que son los más ampliamente utilizados en plantas de biogás agrícolas. La potencia de los equipos necesaria dentro del reactor es de 3,7 kW. Se dispone de 4 agitadores distribuidos uniformemente dentro del reactor. Nuevamente, se seleccionaron los agitadores de la marca Flygt modelo 4460 Biogás Mixer. Véase *figura 7.2*.



Figura 7.2. Agitador Flygt modelo 4460 Biogás Mixer

Fuente:⁹³

El agitador Flygt 4460 está diseñado específicamente para la mezcla eficiente de biogás. Cuenta con hélices de acero dúplex de gran diámetro para manejar contenidos de digestor difíciles. Su diseño hidráulico especial permite un funcionamiento sin obstrucciones incluso con sustratos fibrosos. Puede funcionar a bajas velocidades para un mayor empuje con bajo consumo de energía. Además, el Flygt 4460 se instala a lo largo de barras guía rígidas a profundidades adecuadas para optimizar la eficiencia de mezcla; “BIS-1 Biogas Support System”.

Aislación térmica

Para prevenir fugas de calor dentro del reactor y por lo tanto, conservar la temperatura óptima para la digestión anaerobia, se utiliza material aislante. Para el presente proyecto se ha optado por poner espuma de poliuretano (0,02-0,035 W/m.K) de 10 cm de espesor cubierto por una chapa de revestimiento galvanizado.

Intercambio de Calor

⁹³ [Xylem | Mixing equipment - Flygt 4460 biogas mixer](#)

Para prevenir una posible baja en la temperatura de la mezcla, se diseña un intercambiador de calor mediante cañerías de acero inoxidable. El objetivo del mismo es ser utilizado únicamente cuando la temperatura no es la ideal y representa un riesgo para la generación de biogás de calidad. Para estimar la pérdida de calor del digestor, se calcula el área del suelo y pared del digestor. No se tiene en cuenta las pérdidas por la superficie del reactor ya que se considera que son despreciables porque la mezcla está en contacto con el biogás generado y no directamente con las estructuras del reactor. Para la elaboración de los cálculos se asumen las condiciones ambientales más frías. Por lo tanto, se suponen 9,4°C como temperatura ambiente, ya que es la temperatura promedio más fría registrada en Villa María, como se indicó previamente en el Capítulo 1. Mencionados estos criterios, en la *ecuación 7.10* se muestra lo que contempla la pérdida de calor. A su vez, la *ecuación 7.11* indica cómo se calcula cada pérdida de calor

$$q_{p\acute{e}rdida} = q_{pared} + q_{fondo}$$

(Ecuación 7.10)

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

(Ecuación 7.11)

Dónde:

q: pérdida de calor (Kcal).

U: Coeficiente global de transmisión de calor (Kcal/h·m²·°C).

A: superficie a través de la cual se produce la pérdida de calor (m²).

ΔT: Diferencia de temperatura entre el interior y el exterior (°C).

Adicionalmente, la *ecuación 7.12* muestra cómo se calcula el coeficiente global de transmisión de calor. Los datos que se necesitan para calcular el coeficiente son indicados en la *tabla 7.6*.

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

(Ecuación 7.12)

Donde:

h1: kilocalorías transmitidas por un fluido de temperatura *T1* a la superficie *S1* en una hora para un grado centígrado de diferencia de temperatura y para un metro cuadrado de superficie (Kcal/h.m².°C).

h2: kilocalorías transmitidas por un fluido de temperatura *T2* a la superficie *S1* en una hora para un grado centígrado de diferencia de temperatura y para un metro cuadrado de superficie (Kcal/h.m².°C).

k : kilocalorías que pasan en una hora a través de un metro cuadrado de superficie del material cuando su espesor es un metro y la diferencia de temperatura entre sus caras es un grado centígrado (Kcal/h.m. °C).

e_1 : Espesor (m).

Table 7.6. Tabla de coeficientes de convección y coeficientes de conductividad.

Parámetro	Superficie en contacto	Coeficiente h (KCal/h.m ² .°C)
h_{sustrato}	Pared de hormigón - sustrato	100
h_{aire}	Pared - aire	20
h_{suelo}	Pared - suelo	50

Parámetro	Material	Coeficiente k (KCal/h.m.°C)
$k_{\text{hormigon armado}}$	Hormigón armado	1,4
$k_{\text{hormigon masa}}$	Hormigón en masa	1,1
$k_{\text{Poliuretano}}$	Espuma de poliuretano	0,02

Fuente: Hernández Lehmann

Tanto para el caso de la pared como para el suelo, se necesitan calcular las superficies de contacto de las paredes con el aire y el suelo respectivamente. En esta instancia, se utilizan las ecuaciones de superficie considerando que el reactor posee geometría cilíndrica. Las ecuaciones 7.13 y 7.14 muestran las fórmulas que se utilizaron para determinar ambas áreas. Por otra parte, para el cálculo del coeficiente global de transmisión de calor, indicado en la ecuación 7.12, se utilizó un espesor de 0,4 m de hormigón y 0,1 m de espuma de poliuretano. La tabla 7.7 indica el coeficiente global de transmisión de calor para la pared, el área superficial, los espesores y la pérdida de calor obtenida.

Pared

$$\text{Superficie Pared} = \pi \cdot \frac{D}{2} \cdot H = 127,67 \text{ m}^2$$

(Ecuación 7.13)

Suelo

$$Superficie\ Suelo = \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 = 126,67\ m^2$$

(Ecuación 7.14)

Tabla 7.6. Resultados de la pérdida de calor.

Pared		Suelo	
Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
Área	127,67 m ²	Área	126,67 m ²
U	0,19 Kcal/h·m ² ·°C	U	2,06 Kcal/h·m ² ·°C
qp pared	736,46 Kcal/h	qp pared	7984,77 Kcal/h
q total		8721,23 Kcal/h	
q total		10,14 KW	

Temperatura tanque: 35°C

Temperatura exterior: 9,4°C

Para determinar la temperatura del fluido frío se hace un promedio entre la temperatura latente y la temperatura exterior del día más frío. La siguiente ecuación muestra la temperatura media del fluido desde la entrada y la salida. Por otra parte, para determinar el caudal másico, se adopta la densidad del agua como la densidad del fluido frío, 998,23 kg/m³. La temperatura del fluido frío es **12,8°C**.

$$T_{fluido} = \frac{T_{entrada} + T_{salida}}{2}$$

(Ecuación 7.15)

Para estimar el calor específico de la mezcla, se tiene en cuenta la composición entre agua y WDGS como se muestra en la *ecuación 7.16*. El resultado de la ecuación indica un calor específico de **4,087 Kj/Kg·°C**; similar al agua. Dicho valor tiene sentido ya que la WDGS está compuesta mayormente por agua.

$$C_{Mezcla} = \frac{C_{WDGS} \cdot 25,98\% + C_{Agua} \cdot 74,02\%}{100}$$

(Ecuación 7.16)

Donde:

C_{WDGS} es el calor específico de la WDGS 3,811 Kj/Kg. °C

C_{Agua} es el calor específico del agua, 4,184 Kj/Kg. °C

C_{Mezcla} es el calor específico de la mezcla. Kj/Kg. °C

El calor necesario para mantener una temperatura de al menos 35°C en invierno dentro del digestor se define de la siguiente manera:

$$Q_{total} = m \cdot C_{Mezcla} \cdot \Delta T + \text{Pérdidas de calor en el digestor}$$

(Ecuación 7.17)

Donde:

Q_{Total} es el calor que necesita el sistema para alcanzar los 35°C.

ΔT es la diferencia de temperatura entre la entrada y la salida, °C

C_{Mezcla} es el calor específico de la mezcla. 4,087 Kj/Kg. °C

Para calentar el sistema en invierno, se necesitan **110,19 kW**. Por lo tanto, se necesita un sistema de intercambiador de calor que proporcione esa energía al sistema. En este caso, el agua proveniente del equipo de cogeneración actúa como la corriente caliente. La temperatura de entrada del agua y su caudal másico están determinadas por el motor-generator del sistema de cogeneración. El modelo M08 CHP B333 circula el agua a una temperatura entre los 80°C y los 90°C a un caudal de 16,3 m³/h. Por lo tanto, se adopta una temperatura inicial de **85°C** cuya densidad es de **968,39 kg/m³**, dando como resultado un caudal másico de agua caliente de **4,38 kg/s**.

Sabiendo que el calor que entrega el fluido caliente tiene que ser equivalente al calor que necesita el fluido frío para alcanzar los 35°C, se procede a calcular la temperatura de salida del fluido caliente a partir de la *ecuación 7.18* que surge de la ecuación fundamental de la calorimetría. La temperatura de salida del sistema es de **79°C**. En la *tabla 7.7* se resumen los resultados obtenidos para el intercambiador de calor.

$$T_{c,sal} = T_{c,entr} - \frac{Q}{m_c \cdot C_{p,c}}$$

(Ecuación 7.18)

Donde:

$T_{C, sal}$ Temperatura del fluido caliente a la salida del intercambiador, °C.

$T_{C, entr}$ Temperatura del fluido caliente a la entrada del intercambiador, 85 °C.

m_c es el caudal másico del fluido caliente, 4,38 kg/s.

C_p es el calor específico del fluido caliente, 4,184 Kj/Kg. °C.

Tabla 7.7. Intercambiador de calor.

Parámetro	Fluido Frío	Fluido Caliente
m (kg/s)	0,8	4,39
T entrada (°C)	9,4	85
T salida (°C)	35	79
Calor intercambiado (kW)	110,19	-110,19

Con los datos de la *tabla 7.7* se procede a calcular el incremento de la temperatura logarítmica (ΔT_{ml}) en base a la expresión de la *ecuación 7.19*. El incremento de la temperatura logarítmica en este caso es de **59,26°C**.

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{C, sal} - T_{F, ent}) - (T_{C, ent} - T_{F, sal})}{\ln \left(\frac{T_{C, sal} - T_{F, ent}}{T_{C, ent} - T_{F, sal}} \right)}$$

(Ecuación 7.19)

Donde:

$T_{C, sal}$ Temperatura del fluido caliente a la salida del intercambiador, 79 °C.

$T_{C, entr}$ Temperatura del fluido caliente a la entrada del intercambiador, 85 °C.

$T_{F, sal}$ Temperatura del fluido frío a la salida del intercambiador, 35 °C.

$T_{F, entr}$ Temperatura del fluido frío a la entrada del intercambiador, 9,4 °C.

Otro parámetro que debe ser determinado, es el coeficiente global de transferencia de calor, U. Para su determinación, se debe comprender cómo se transfiere el calor en el sistema. El calor se transporta desde el fluido caliente, hacia la pared interna del tubo por convección, luego, por conducción se transfiere a hacia la pared externa donde nuevamente por convección calienta al fluido frío. Los tres tipos de transporte que ocurren tienen una resistencia asociada. Adicionalmente, en este caso, se desprecian las resistencias que se puedan generar por las incrustaciones con el paso del tiempo en ambas

paredes de los tubos. Las resistencias que se consideran en el sistema son indicadas en la *ecuación 7.20*.

$$R_{Total} = R_{int} + R_{pared} + R_{ext} + R_{incrustaciones} = \frac{1}{h_{int} \cdot A_{int}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_{ext} \cdot A_{ext}}$$

(Ecuación 7.20)

Donde:

K es la conductividad térmica del material, en $W/m \cdot K$

L es la longitud de los tubos, m

$h_{int,ext}$ son los coeficientes de convección interior y exterior, $Kcal/h \cdot m^2 \cdot ^\circ C$.

r_{int} es el radio interno del tubo, en m .

r_{ext} es el radio externo, en m .

$A_{int, ext}$ son las áreas internas y externas que se calculan según el diámetro en cada caso, m^2

Para resolver los cálculos, se tienen que definir las características de los tubos que se van a utilizar. En el presente proyecto, teniendo en cuenta que el caudal del fluido caliente es mucho mayor al del fluido frío, se seleccionó un sistema de acero al carbono con un diámetro nominal (DN) de 2½ in para el tubo exterior y 1¼ in para el interior. Las características de la tubería seleccionada se resumen en la *tabla 7.8*.

Tabla 7.8. Intercambiador de calor.

Dimensión	Tubo interior	Tubo exterior
DN	1¼ in	2½ in
Diámetro interior	39,43 mm	69,95 mm
Diámetro exterior	42,2 mm	73 mm
Espesor	2,77 mm	3,05 mm

Dimensiones estándar N° cédula intermedio 40.

Para estimar el coeficiente global de temperatura, se usa como referencia la superficie interior del tubo interno. La expresión matemática para llevar a cabo el cálculo en base a las resistencias planteadas anteriormente se desarrolla en la *ecuación 7.21*.

$$\frac{1}{U_{int}} = \frac{\phi_{int}}{h_{ext} \cdot \phi_{ext}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{ext}}{r_{int}}\right) \phi_{int}}{2 \cdot k} + \frac{1}{h_{int}}$$

(Ecuación 7.21)

Donde:

$\phi_{int, ext}$ es el diámetro interno y externo, m

$r_{ext, int}$ es el radio externo e interno, m

$h_{int, ext}$ son los coeficientes de convección interior y exterior, Kcal/h.m². °C.

U_{int} , coeficiente global de transferencia de calor interior W/m². °C

k es la conductividad térmica del material, en W/m·K

Se calculan los coeficientes de película interna y externa. Para ello, se utilizan los parámetros para ambos fluidos en su temperatura media. Para facilitar la comprensión, se resumen en la *tabla 7.9* los valores utilizados en los cálculos.

Tabla 7.9. Datos para el cálculo de U.

Parámetro	Unidad	Fluido Frío	Fluido Caliente
Caudal másico	kg/s	0,8	4,39
Temperatura entrada	°C	9,4	85
Temperatura salida	°C	35	79
Temperatura promedio	°C	22,2	82
Calor específico medio	KJ/Kg°C	4,181	4,197
densidad media	kg/m ³	997,86	972,23
μ medio	kg/m.s	0,000955	0,000359
K media	W/m.°C x10 ³	604,6	673,0
Área superficial	m ²	0,00122	0,00262

En primera instancia, se define la velocidad másica G (kg/m²s) para posteriormente estimar el número de Reynolds (Re). Además, se requiere calcular el número de Prandtl (Pr). Tanto el Reynolds como el Prandtl definen cual es el número de Nusselt (Nu). A continuación se presentan las *ecuaciones 7.22* para calcular cada parámetro.

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k}$$

$$G = \frac{m}{As}$$

$$Re = \frac{G\phi i}{\mu}$$

$$hi = \frac{Nu.k}{\phi}$$

(Ecuaciones 7.22)

Donde:

μ : viscosidad, $kg/m.s$

Cp : calor específico, $KJ/Kg^{\circ}C$

m : caudal másico, kg/s

As : área superficial, m^2

ϕi : diámetro, m

k : conductividad térmica del material, $W/m.K$.

Además, para la determinación del Nusselt, se tiene en cuenta que en base a los resultados obtenidos, si se cumplen las siguientes condiciones, se pueden adoptar los valores de n mencionados a continuación:

$$Nu = 0,023 \cdot Re^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^n$$

(Ecuación 7.23)

$n = 4$ Cuando $Re > 10.000$ y $0,6 < Pr < 160$ para $T_{salida} > T$

$n = 3$ Cuando $Re > 10.000$ y $0,6 < Pr < 160$ para $T_{salida} < T$

Por lo tanto, en la *tabla 7.10* se muestran los valores obtenidos tanto para la corriente fría como para la caliente. Se debe aclarar que para el cálculo del coeficiente h en el caso de la corriente caliente se utiliza el diámetro equivalente que corresponde a la diferencia entre el diámetro interior y el exterior.

Tabla 6.10. Números adimensionales para la determinación de U.

Parámetro	Corriente Fría	Corriente Caliente
Pr	6,60	2,23
G	655,73	1675,57
Re	27073,75	326.479,45
Nu	211,3	537,9
h	3.239,97	118.690,72

Con los coeficientes estimados, se procede a calcular el coeficiente global de la temperatura como se muestra en la *ecuación 7.21* obteniéndose un total de **964,28 W/m².°C**. Con este dato, se procede a calcular el área requerida para calentar la mezcla y el largo de cañería. Véase *ecuación 7.24* que considera un factor de seguridad del 15%.

$$Q = U_i \cdot A_{inter} \cdot \Delta T_{ml} \cdot \xi$$

(Ecuación 7.24)

Donde:

ξ : *factor de seguridad, 15%*

U : *Coeficiente global de transferencia de calor, W/m².°C.*

A_{int} : *Area interna, m².*

Q : *calor W*

ΔT_{ml} : *caudal másico, °C*

De la ecuación se obtiene un área de intercambio igual a **2,22 m²**, lo que implica un largo de **18 m**. Comúnmente, la longitud efectiva de cada tubo para los de tipo acero inoxidable corresponde entre 1,5 a 12 m. En este caso, se adopta una longitud efectiva de 6 m, por lo que cada tubo posee una longitud de **3 m**. El N° de horquillas se determina haciendo el cociente entre el largo del tubo por la longitud de cada tubo, dando un total de **6** horquillas. El equipo seleccionado es el modelo DTR 168/129 de la marca HRS-Heat Exchangers. Véase *figura 7.3*.



Figura 7.3. Intercambiador de calor modelo DTR 168/129 de la marca HRS-Heat Exchangers

Fuente:⁹⁴

Producción de biogás

⁹⁴ [Heat Exchangers | DTR 168/129](#)

Para determinar el caudal de biogás generado en el sistema planteado, se utilizan los rendimientos obtenidos a partir del ensayo de Potencial de Biometano desarrollado en el Capítulo 4. Por lo tanto, se conoce que el rendimiento para una relación S/I de 1 es de **327,0 Nml/g SV_s**. Se aplica la *ecuación 7.25*. Para los cálculos, se estimó un rendimiento a escala industrial del 85% en base a otros casos similares estudiados. Se aclara que es posible que los resultados reales sean menores a esta aproximación.

$$Q_{biogás} = \frac{PBM \cdot WDGS \%SV \cdot R \cdot \beta}{F}$$

(Ecuación 7.25)

Donde:

$Q_{biogás}$: es el caudal de biogás generado por día, expresado en m³/d

PBM: es el rendimiento de generación de CH₄ con respecto a los sólidos volátiles del sustrato, en Nml CH₄/gSV_s.

WDGS representa los g de sustrato diarios introducidos al digestor anaerobico, 479,45 t/d, expresado en g/d.

% SV: porcentaje de sólidos volátiles presentes en la mezcla, 10,55%.

R: rendimiento adoptado a escala industrial, de 85%.

F: factor del 60% de metano en biogás, 0,6.

β: es el factor de conversión de Nml a Nm³ de CH₄ (1x10⁻⁶).

El caudal de generación de gas metano diario es de **1.825,30 Nm³/día**. Suponiendo que el biogás está compuesto por un 60% de CH₄, el caudal de biogás generado es de **3.042,16 Nm³/día**. Para almacenar el biogás, se necesita de un gasómetro. En el presente proyecto se selecciona una cubierta de doble membrana por su tiempo de vida útil y su flexibilidad. Además, se tiene que tener en cuenta que el tiempo de almacenamiento mínimo está aproximadamente entre 4 y 6 hs.

El volumen del gasómetro se calcula teniendo en cuenta el caudal del biogás y adoptando un tiempo de permanencia. En este caso, se adopta un tiempo de **4 horas**. No obstante, se debe corregir la temperatura del caudal, ya que se genera con 35°C. La corrección y el cálculo de volumen se expresan de la siguiente manera. Notar que se considera un factor de seguridad del 15% del volumen. Asimismo, el diámetro del gasómetro tiene que ser el mismo que el del reactor CSTR. Los resultados se pueden encontrar en la *tabla 7.11*.

$$Q_{biogas(35^{\circ}C)} = Q_{biogas} \cdot \frac{308 K}{273 K}$$

(Ecuación 7.26)

$$V_{biogas(35^{\circ}C)} = Q_{biogas(35^{\circ}C)} \cdot \theta_{gasómetro} \cdot 1,15$$

(Ecuación 7.27)

Donde:

$Q_{biogás}$: es el caudal de biogás generado por día, expresado en m^3/d

$Q_{biogás(35^{\circ}C)}$: es el caudal de biogás generado por día a $35^{\circ}C$, expresado en m^3/d

$\theta_{gasómetro}$ Tiempo de retención, 4 h.

Tabla 7.11. Generación de biogás y dimensiones del gasómetro.

Parámetro	Valor	Unidades
Q biogás	3.042,16	Nm ³ biogás/d
Q biogás (35°C)	3.432,18	m ³ biogás/d
Volumen gasómetro	657,83	m ³
Diámetro	12,7	m

Se seleccionó un gasómetro con la capacidad de almacenar 660 m³ de biogás con un tiempo de retención de 4 horas. La empresa encargada de proveer el equipo es AquaLimpia⁹⁵. Un ejemplo de los gasómetros que proporciona la empresa se puede observar en la *figura 7.4*. Se cubre con una membrana EPDM de 1,5 o 2 mm sellada en fábrica.



Figura 7.4. Gasómetro Aqualimpia

⁹⁵ [Aqua Limpia | Biodigestores - gasómetros](#)

Fuente: ⁹⁶

El cálculo de la energía primaria del biogás se realiza asumiendo un contenido energético de 6.0 kWh/m³. La energía primaria diaria generada es de **20.593,08 kWh/d** (ecuación 7.28), lo que indica una potencia de **858 kW**. Para seleccionar el generador de energía, se agrega un factor de seguridad del 10%, lo que modifica la potencia a **943,8 kW**. En cuanto a la generación de energía eléctrica, ya que la planta opera todo el año, se calcula la energía generada para 365 días. De la ecuación 7.29 se obtiene que la energía anual generada equivale a **7.516,47 MWh/año**.

$$E_{\text{primaria}} = Q_{\text{biogás}}(35^{\circ}\text{C}) \cdot 6.0 \text{ kWh/m}^3$$

(Ecuación 7.28)

$$E_{\text{eléctrica}} = 20.593,08 \text{ kWh/d} \cdot 365 \text{ d}$$

(Ecuación 7.29)

Donde:

$Q_{\text{biogás}}(35^{\circ}\text{C})$: es el caudal de biogás generado por día a 35°C, expresado en m³/d.

E_{primaria} : Energía primaria del biogás, kWh.

$E_{\text{eléctrica}}$: energía eléctrica generada kWh.

Para la selección de un grupo de cogeneración, se tiene que tener en cuenta que el consumo de energía sea menor a la energía generada. Se seleccionó un grupo de cogeneración de la empresa, Schmitt Enertec mediante la empresa Zorg Biogás, modelo M08 CHP B333; *figura 7.5*. A continuación se exponen sus principales características técnicas y su comparación con los parámetros calculados del sistema. El cual tiene un consumo propio de **5,6 kW** y una eficiencia eléctrica de **41,5 %** y una eficiencia térmica del **45,8%**.

⁹⁶ [Aqua Limpia | Biodigestores - gasómetros](#)



Figura 7.5. Equipo de Cogeneración M08 CHP B333

Fuente: ²⁶

Con las eficiencias del equipo definidas, se procede a estimar la energía eléctrica y térmica generada por el equipo tras multiplicar la energía primaria por la eficiencia correspondiente. Con dichos resultados, se calculan las potencias. Los resultados se muestran en la *tabla 7.12*.

Tabla 7.12. Generación de biogás y dimensiones del gasómetro.

Parámetro	Valor	Unidades
Energía primaria	20.593,08	kWh/d
Potencia primaria	858	kW
Energía eléctrica	8.546,1	kWh/d
Potencia eléctrica	356,1	kW
Energía térmica	9.431,63	kWh/d
Potencia térmica	393,0	kW

Fuente: elaboración propia.

Tratamiento del biogás

Trampa de Humedad

El primer paso del tratamiento de biogás es la remoción de la humedad que este contiene. Se trata de un tanque de acero inoxidable en donde se almacena el condensado por golpeo del biogás contra una hoja de acero inoxidable. El condensado se descarga por

medio de un sifón de descarga automática por presión o por medio de una llave de cierre. La estimación del caudal de agua en el biogás se calcula en base a la siguiente fórmula. El caudal másico de agua en el biogás corresponde a **117 kg H₂O/día**.

$$H_2O \text{ biogás} = Q \text{ biogás} \cdot \delta \text{ biogás} \cdot \text{humedad absoluta}$$

(Ecuación 7.30)

Donde:

Q biogás: caudal de biogás en CNPT.

δ biogás: densidad del biogás a 35°C, 1,049 kg/m³

Humedad absoluta: Se aproxima a la humedad del aire a 35°C, 36,7 g H₂O/kg de aire.

Como trampa de gas, se seleccionó el modelo CP01 de AquaLimpia Engineering. La entrada y salida del biogás se colocan en la parte superior del tanque, La descarga se realiza a través de un sifón en forma automática cuando el nivel de condensado en el tanque sobrepasa el nivel de salida de la tubería del sifón. Dicho artefacto está preparado para recibir un caudal de biogás menor a 200 Nm³/h.

El modelo CP01 tiene un diámetro de 300 mm y una altura de 800 mm. El caudal de biogás que soporta es <200 Nm³/h. El caudal de biogás generado en el reactor es de 126,76 Nm³/h, por lo que cumple con los parámetros del equipo. La *figura 7.6* muestra una imagen de la trampa de humedad.



Figura 7.6. Trampa de humedad.

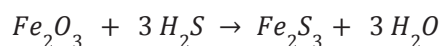
Fuente: ⁹⁷

Columna de adsorción de H₂S

⁹⁷ [Filtro de condensados](#)

Para la eliminación del sulfuro presente en el gas, se plantea una columna de adsorción. Para determinar la concentración de ácido sulfhídrico en el biogás, se adopta un porcentaje de 0,1% de H_2S^{98} . Por lo tanto, con el caudal de biogás a 35°C, se estima que el volumen de sulfhídrico presente equivale a **3,43 m³/d**. Por otra parte, siendo la densidad del ácido sulfhídrico 1,06 g/L a 35°C, el caudal másico a tratar es **3,64 kg/d** de H_2S .

Para la remoción de sulfhídrico, se utilizan filtros de óxido de hierro (Fe_2O_3). Su dimensionamiento está directamente relacionado con la concentración de sulfhídrico. El producto de la absorción proporciona sulfuro ferroso y vapor de agua. La reacción química es la siguiente:



El caudal másico de óxido ferroso que se requiere para remover el sulfuro se calcula en base a la fórmula de la reacción química. La *ecuación 7.31* indica cómo se determina. En principio, se requieren 237,46 g Fe_2O_3 /h en la columna de absorción. No obstante, se asume una eficiencia del 50%, por lo que en verdad se requieren **356,19 g Fe_2O_3 /h**.

$$m(Fe_2O_3) = m(H_2S) \cdot \frac{p(Fe_2S_3)}{p(H_2S)} \cdot 1.5$$

(Ecuación 7.31)

Donde:

mFe_2O_3 es el caudal másico de óxido ferroso, g/h.

mH_2S es el caudal másico del sulfhídrico, 151,6 g/h.

$p(Fe_2O_3)$ es el peso molecular, 159,7 g.

$p(H_2S)$ es el peso molecular, 102 g.

Para el dimensionamiento de la columna, se adopta un tiempo de permanencia del material absorbente de 4 meses, es decir 120 días aproximadamente. El filtro, por lo tanto, debe contener la masa de óxido férrico para esa cantidad de tiempo; **43,8 kg de Fe_2O_3** . Asimismo, la densidad del óxido férrico es de 5,24 g/L, por lo que se puede calcular el volumen del lecho sólido, siendo el mismo **8,36 m³**.

Para determinar las dimensiones de la torre, se adopta una velocidad superficial de biogás sobre el lecho, la cual comprende un rango entre 5 a 50 cm/s. De esta manera, con

⁹⁸ Botero B. & Preston, 1986

el caudal de biogás se puede determinar la sección transversal (S) del lecho en base a la siguiente ecuación:

$$S = \frac{Q}{v} = \pi \frac{\phi^2}{4}$$

(Ecuación 7.32)

Donde:

S es la sección transversal, m

Q es el caudal de biogás, m³/s

v es la velocidad superficial adoptada, m/s.

Se adopta una velocidad superficial de 0,05 m/s. En efecto, se obtiene un área de **0,92 m²** y un diámetro de **1,08 m**. La altura, se determina haciendo el cociente entre el volumen y el área superficial, siendo 10 m. No obstante, a la altura se le deben dejar de 0,3048 m a 0,4572 m (1 a 1½ pies) de cada lado; se decide dejar 0,3048 (1 pie) de diferencia entre cada filtro. Las dimensiones se resumen en la *tabla 7.13*.

Tabla 7.13. Dimensiones torre de adsorción de H₂S.

Parámetro	Valor	Unidades
Volumen	8,36	m ³
Área	0,79	m ²
Diámetro	1,00	m
Altura	11,18	m

Fuente: elaboración propia.

Balances

La presencia de los microorganismos anaeróbicos en el sistema implica un aumento en el porcentaje de sólidos totales del sistema. Por lo tanto, para asegurarse que el reactor no supere el 15% máximo de ST, se calcula cuántos g/L de biomasa se pueden agregar. Esto da que se pueden agregar como máximo 100 g/L de ST de biomasa, lo que indica una relación S/I igual a 1.

En primer lugar, se calcula la eficiencia de remoción del reactor teniendo en cuenta la generación de biogás por la masa de sólidos totales. Para ponerlo en términos de DQO, se adopta la relación DQO/ST de la vinaza (0,95). Por lo tanto, la eficiencia de remoción del reactor se calcula de la siguiente manera:

$$\% \text{ Remoción} = \frac{Q_{\text{Biogás}}}{ST_{0,95}} \cdot 100$$

(Ecuación 7.33)

Donde,

ST son los kg de sólidos totales WDGS que ingresan al reactor por día, 6.965 kg/día.

Q biogás es el caudal de biogás diario, 3.432 m³/d.

De la ecuación, se obtiene una eficiencia de remoción de la DQO del 52%. Por otro lado, en la *tabla 7.14* que se muestra a continuación, se mencionan los valores de los parámetros cinéticos del sistema, junto con la remoción calculada.

Tabla 7.14. Parámetros cinéticos para reacciones anaeróbicas.

Parámetro	Valor	Rango	Unidades
kd	0,04	0,02 - 0,04	g/g.d
μ máximo (35°C)	0,0457	-	g/g.d
Ks	60	60-200	mg/L
Producción biogás	0,52	-	m³/kg DQO

Fuente: Metcalf & Eddy.

Para garantizar la calidad y estabilidad de los microorganismos encargados de degradar la materia orgánica se define al tiempo de retención celular y es el tiempo medio de residencia de la materia orgánica en el reactor. En este caso, se adopta un tiempo de retención celular de 22 días.

$$\theta_c = \frac{V_{\text{reactor}} \cdot X_{\text{reactor}}}{Q_p \cdot X_p}$$

(Ecuación 7.34)

Donde:

V reactor = Volumen del reactor (m³).

X reactor = biomasa contenida dentro del biodigestor (gSV/L).

Q_p = caudal de purga de lodos, expresado en (m^3/d).

X_p = biomasa que egresa con la purga de lodos (gSV/L).

θ_c = Tiempo de retención celular (d).

La figura 7.7 resume el sistema e indica cada uno de los parámetros presentes en cada unidad del sistema. Se puede observar un caudal de entrada que está compuesto por una dada concentración de microorganismos en la entrada y sustrato. Asimismo, dentro del digestor anaeróbico está presente la cantidad de microorganismos ya mencionada para degradar al sustrato. A la salida del digestor se obtiene un caudal con sustrato menor al de entrada, dependiendo de la eficiencia de degradación. Este caudal ingresa al sedimentador donde se separa un caudal de salida y uno de purga y recirculado.

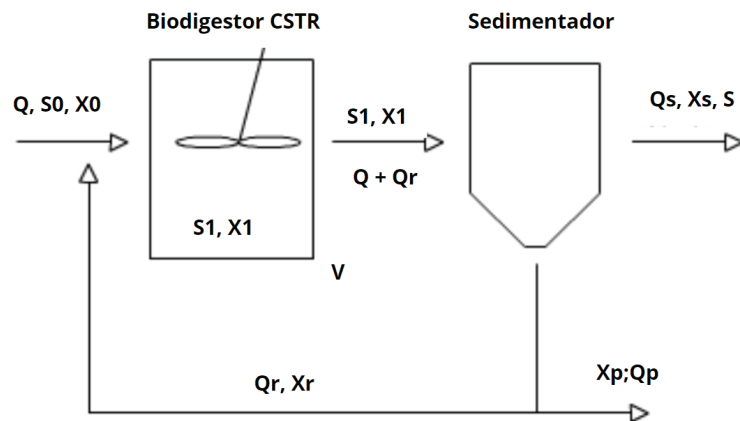


Figura 7.7. Esquema del sistema de digestión anaeróbica PAC.

Fuente: Elaboración propia.

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 es la concentración de sustrato que egresa con el efluente, expresada en $kg DQO/m^3$

En primer lugar, se calcula el X_0 habiendo previamente adoptado una concentración de microorganismos en la salida del efluente (X_S). Para este cálculo, se tiene en cuenta que un 20% del agua que se requiere para la dilución de la WDGS en el tranque de pre fermentación corresponde a una fuente de agua limpia.

Por otro lado, se adopta la recirculación (Q_r) respetando la relación $Q_r/Q = 0,5$. Asimismo, se adopta una concentración de microorganismos en el recirculado de 200 g/l. Con dichos datos, se procede a definir el caudal de purga en base a la fórmula de la *ecuación 7.35*.

$$(Q_0 + Q_r)X_1 = Q_S X_S + (Q_p + Q_r)X_r$$

(Ecuación 7.35)

Donde:

Q_0 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_1 es la biomasa contenida dentro del biodigestor (gSV/L).

X_S es la biomasa contenida en el caudal de salida (gSV/L).

X_r es la biomasa del recirculado (gSV/L).

Para definir los parámetros restantes se aplica un balance de masa de biomasa y caudales, tal como se indican en las *ecuaciones 7.36 y 7.37*. Para los cálculos, se supone que el sistema está en estado estacionario. Tanto los resultados, como los valores adoptados se indican en la *tabla 7.6*. Por otra parte, los valores de las constantes que se utilizan en la *ecuación 7.36* fueron mencionados previamente en la *tabla 7.14*.

$$\text{Acumulación} = \text{Entrada} - \text{Salida} + \text{Crecimiento} - \text{Muerte}$$

$$\frac{VdX}{dt} = Q_0 X_0 - Q_S X_S - Q_p X_p + V \left(\frac{u_{max} X_S}{K_s + X_S} - K_d X_1 \right)$$

(Ecuación 7.36)

$$Q_0 = Q_S + Q_p$$

(Ecuación 7.37)

Tabla 7.15. Caudales, sustratos y biomasa del sistema de digestión anaeróbica.

Caudales	Resultados (m³/d)	Biomasa	Resultados (gSVx/L)	Sustrato	Resultados (gSVs/L)
Q0	69,30	X0	1,16	S0	99,50
Qp	18,43	X1	100,00	S	48,76
Qs	50,9	Xr	193,97	θ_c	22
Qr	34,65	Xp	200,00	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Sedimentador Secundario

El sedimentador secundario tiene un caudal de ingreso que contempla el caudal de ingreso del digestor anaeróbico más el caudal de recirculación ($Q_0 + Q_r$). Por lo tanto, el caudal de ingreso es **103,95 m³/d**. Por otra parte, la carga superficial (C_s) que es producto de la relación del caudal y su área superficial debe ubicarse dentro del rango 1,16 a 2,38 m³/m².d.⁹⁹ La ecuación 7.38 muestra cómo se calcula la carga superficial.

$$C_s = \frac{Q_0}{A_{sup}}$$

(Ecuación 7.38)

Donde:

C_s es la carga hidráulica superficial m³/m².d.

Q_0 es el caudal de alimentación, m³/d.

A_{sup} es el área superficial del sedimentador, m².

La carga de sólidos se calcula con la ecuación 7.39. Su rango frecuente entre 3,9 - 5,85 kg/m²h, con un máximo de punta tolerado de 9,76 kg/m²h.¹⁰⁰

$$C_m = \frac{(Q_0 + Q_r) X_1}{A_{sup}}$$

(Ecuación 7.39)

Donde:

⁹⁹ Metcalf & Eddy.

¹⁰⁰ Metcalf & Eddy.

C_s es el caudal másico superficial de sólidos en el sedimentador, expresado en $\text{kg ST/m}^2 \cdot \text{h}$

Q_0 es el caudal de alimentación, m^3/d .

Q_r es el caudal de recirculado, m^3/d .

X_i es la concentración de sólidos que ingresan en el sedimentador, kg ST/m^3 .

A_{sup} es el área superficial del sedimentador, m^2 .

En el presente diseño, se adoptó una carga superficial de **1,4 $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{d}$** . De esta manera, se puede despejar el área superficial del sedimentador utilizando la *ecuación 7.38*. El área obtenida es de **49,5 m^2** . Conociendo el área y teniendo en cuenta la fórmula del área de un círculo, se determina que el diámetro superficial es de **7,9 m**.

Con el área superficial, se procede a estimar la carga de sólidos. Para ello, se utiliza como concentración de ingreso de sólidos en el sedimentador 106,4 kg ST/m^3 , adoptando una relación SV/ST de 0,94. De la *ecuación 6.39* se obtiene una carga de sólidos por debajo del máximo permisible, **9,31 $\text{kg ST/m}^2 \cdot \text{h}$** .

Por otra parte, se adopta un tiempo de retención de **24 hs**, ya que el porcentaje de sólidos en los sedimentadores secundarios a la salida de un digestor anaeróbico suelen ser elevados. El volumen de sedimentación se calcula mediante la *ecuación 7.40*, donde se multiplica el tiempo de permanencia por el caudal horario. Dando como resultado un volumen de sedimentación de **103,95 m^3** . Asimismo, con el volumen y el diámetro, se calcula que la altura de sedimentación es de **2,12 m**. Las dimensiones de la zona de sedimentación se resumen en la *tabla 7.16*.

$$V_s = Q \cdot T_p$$

(Ecuación 7.40)

Donde:

V_s el volumen de sedimentación, m^3 .

Q es el caudal de alimentación, m^3/h .

T_p es el tiempo de permanencia.

Tabla 7.16. Dimensiones de la zona de sedimentación.

Parámetro	Valor	Unidades
Caudal	103,95	m^3/d
Área superficial	49,5	m^2
Diámetro	7,9	m

Volumen de sedimentación	103,95	m ³
Altura de sedimentación	2,12	m

Fuente: elaboración propia.

Además de la zona de sedimentación, la unidad está compuesta por una zona de lodos o tolva. El diámetro mayor coincide con el diámetro calculado para la zona de sedimentación y se adoptan 0,5 m como diámetro menor. Para continuar con el dimensionamiento, se calcula el parámetro k, que es la distancia entre ambos diámetros; **4,15 m** a partir de la ecuación 7.41.

$$K = \frac{(D + D_M)}{2}$$

(Ecuación 7.41)

Donde,

K es la distancia entre los diámetros, m.

D: diámetro inferior, m.

D_M: diámetro mayor, m.

La altura de la tolva (ht) se estima con la fórmula que se muestra en la ecuación 7.42. Para ello, se adopta un ángulo interno de 50°. La altura de la tolva es de **2,67 m** y en efecto, el volumen es **64,67 m³**. Para mayor claridad, en la figura 7.8 se muestra un esquema de la tolva del sedimentador secundario con los parámetros mencionados.

$$Ht = k \cdot \sin(\alpha)$$

(Ecuación 7.42)

Donde,

K es la distancia entre los diámetros, m.

α: ángulo externo, 50°

Ht: altura de la tolva, m.

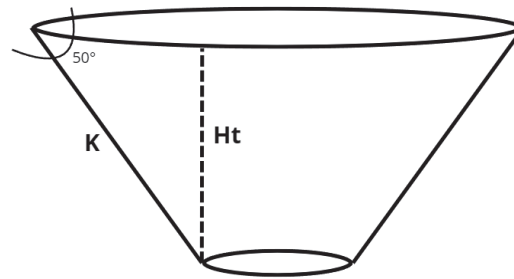


Figura 7.8. Esquema a modo de ejemplo de la tolva con el parámetro K que indica la diferencia entre el diámetro inferior y mayor, la Ht que indica la altura real de la tolva y el ángulo de 50°.

Fuente: elaboración propia.

Tras sumar el volumen de sedimentación y de la tolva, se obtiene que el volumen total del sedimentador secundario es **150,51 m³**. Aplicando lo mismo para la altura, la altura total de la unidad es de **4,79 m**. Las dimensiones de la zona de lodos y las dimensiones totales se mencionan en la *tabla 7.17*.

Tabla 7.17. Dimensiones de la zona de lodos y del sedimentador total.

Parámetro	Valor	Unidades
Diámetro mayor	7,9	m
Diámetro menor	0,5	m
Distancia k	4,15	m
Ángulo interior	50	°
Altura tolva	2,67	m
Volumen tolva	46,56	m ³
Altura total	4,79	m
Volumen total	150,51	m ³

Fuente: elaboración propia.

Para el dimensionamiento de la zona de entrada, se adoptó una velocidad de paso de 0,10 s. Al dividir el caudal de entrada en segundos, $1,203 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, por la velocidad adoptada, se obtiene un área de paso de $8 \times 10^{-3} \text{ m}^2$. Por otra parte, se adopta un diámetro de orificio (Do) de 0,02 m. Del cociente entre el área de paso y el diámetro de los orificios se estima un total de 26 orificios.

Teniendo en cuenta que la altura de sedimentación es 2,12 m, se define como altura de comienzo de orificios 3,09 m y altura de finalización de orificios 4,37 m. La primera se calcula dividiendo por 5 a la altura de sedimentación y la última se multiplicando a la primera por 4. En ambos casos se suma la altura de lodos para tener los valores de referencia desde el 0 (superficie inferior del sedimentador).

La entrada cuenta con 3 orificios con 10 ranuras; un total de 30. Para el ingreso se dispone de un canal de distribución de 1,5 m de largo y una altura de 1,37 m.

Para la salida del sedimentador secundario se seleccionó un radio de vertedero de 45°. Además, se adoptó una altura útil de 4 cm y más 2 cm como factor de seguridad, dando una altura total de 6 cm. El ancho del vertedero (W_v) se calcula mediante la *ecuación 7.43*, utilizando los datos adoptados de altura y ángulo. El ancho es de 12 cm.

$$W_v = 2 \cdot h \cdot \tan(45^\circ)$$

(Ecuación 7.43)

Donde,

W_v : es el ancho del vertedero, cm.

h : altura de del vertedero, cm

A partir de la *ecuación 7.44* se calcula el caudal que atraviesa cada vertedero (q_v), dando como resultado $4,72 \times 10^{-4}$ m³/s. El número de vertederos se obtuvo mediante el cociente del caudal de entrada y el que atraviesa los vertederos; el resultado obtenido fue de 3 vertederos. Se adopta una distancia entre vertederos de 1 m.

$$q_v = 1,34 \cdot (h_v)^{2,47}$$

(Ecuación 7.44)

Para la determinación de la distancia entre los vertederos (e_v), se calcularon la longitud efectiva (Lu) y el perímetro del sedimentador. Para el primero, se multiplicó el ancho de los vertederos por la cantidad, como resultado, 0,36 m de longitud efectiva. Siendo el diámetro mayor 7,9 m, el perímetro es 12,8 m. Como se indica en la *ecuación 7.45*, se calcula la distancia entre los vertederos.

$$e_v = \frac{P - Lu}{n}$$

(Ecuación 7.45)

Para los cálculos de los canales, se adoptó una velocidad de canal de 0,012 m/s y un ancho del canal de 20 cm. Se dividió al caudal de entrada al sedimentador por la velocidad adoptada, dando un área de canal de 0,1 m². Luego, al dividir el área por el ancho, se obtuvo que la altura interna de los canales corresponde a 0,5 m, mientras que la altura externa, tras agregarle una revancha de 0,2 m da 0,76 m.

Diseño Hidráulico

Para realizar el diseño hidráulico se parte definiendo dos líneas. Por un lado se tiene a la línea del sustrato, que contempla el ingreso del recirculado de agua al tanque de pre-fermentación y toda las corrientes de efluentes líquidos generados y transportados desde el tanque de pre-fermentación, el digestor anaeróbico y el sedimentador. Por otra parte, se considera una segunda línea de cañerías para el transporte de biogás. La *figura 7.8* resume cada línea por color e identifica cada corriente con una letra para mayor comprensión.

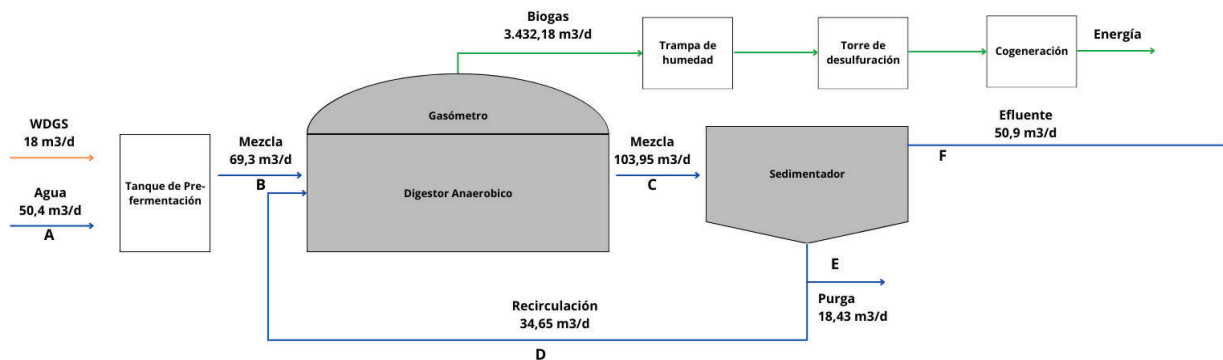


Figura 7.8. Esquema del sistema de biodigestión donde las flechas azules representan la línea de sustrato, mientras que las verdes son las del biogás.

Fuente: Elaboración propia.

Línea de sustrato

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

(Ecuación 7.46)

Donde:

V : velocidad del agua, m/s.

Q : caudal, m³/s.

D : diámetro de la tubería, m.

Se realiza una iteración empleando la *ecuación 7.46*. En primer lugar, se adopta una velocidad entre 0,6 y 1 m/s. Luego, con la velocidad adoptada, se procede a determinar el diámetro de la cañería. En base al resultado, se elige un valor estándar de diámetro de la cañería y se vuelve a calcular la velocidad buscando que permanezca dentro del rango. La *tabla 7.18* resume el proceso de iteración para cada una de las corrientes de la línea del sustrato. Para un primer ingreso al tanque de pre-fermentación se utiliza un transportador helicoidal como se muestra en la *figura 7.9*.



Figura 7.9. Transportador helicoidal para WDGS.

Fuente: ¹⁰¹

Tabla 7.18. Diámetros y velocidades de cada tramo de cañería.

Tramo	V adoptada (m/s)	D calculado (m)	D(adoptado) mm	V calculado (m/s)	D (pulgadas)
A	0,75	0,031	32	0,73	1-1/4
B	0,75	0,037	40	0,64	1 1/2
C	0,75	0,045	50	0,61	2
D	0,75	0,026	25	0,82	1
E	0,75	0,019	20	0,68	3/4
F	0,75	0,032	32	0,73	1-1/4

¹⁰¹ [TRANSPORTADOR HELICOIDAL O TRANSPORTADOR DE TORNILLO - Maquinados Industriales CDMX](#)

Fuente: Elaboración propia.

Línea de biogás

La cañería seleccionada para la línea de salida del biogás es PVC ya que es resistente al ácido sulfhídrico. En este caso, las velocidades dentro del tubo no deben superar los 10 m/s. Se adoptó una velocidad de 9 m/s, obteniéndose un diámetro de 0,075m. Se redondeó a un diámetro de **85 mm** o **3 in**, dando como resultado una velocidad de **7,9 m/s** dentro del rango.

Pérdidas de Carga

Las pérdidas de carga para cada cañería se calculan con la *ecuación 7.47* de Haaland que se indica a continuación:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -1.8 \cdot \log \left(\frac{6,9}{Re} + \left(\frac{\frac{\varepsilon}{D}}{3,7} \right)^{1,11} \right)$$

(Ecuación 7.47)

Donde,

ε es la rugosidad relativa (ε/D).

Re es el número de Reynolds ($\rho \cdot V \cdot D / \mu$).

D es el diámetro de la tubería, m

f es el coeficiente de fricción.

La pérdida de carga se determina en base a la siguiente *ecuación 7.48*:

$$hl = f \cdot \frac{L \cdot V^2}{2 \cdot g \cdot D}$$

(Ecuación 7.48)

Donde,

L es la longitud de la cañería, m.

V es la velocidad del fluido, m/s.

g es la gravedad, 9,8m/s².

f es el coeficiente de fricción.

D es el diámetro de la tubería, m.

hl es pérdida de carga, m

Los parámetros adoptados y los resultados tanto del coeficiente de fricción y la pérdida de carga se muestran a continuación en la *tabla 7.19*.

Tabla 7.19. Pérdida de carga en cada tramo

Tramo	Diámetro (m)	V calculado (m/s)	Reynolds	Viscosidad dinámica	E	Factor de fricción f	Longitud (m)	Pérdida de carga hl (m)
A	0,032	0,73	24.817,58	0,000933	0,002	0,08	15	0,10
B	0,040	0,64	35.375,39	0,00072	0,002	0,07	10	0,06
C	0,050	0,61	42.299,84	0,00072	0,002	0,07	10	0,06
D	0,025	0,82	28.199,89	0,00072	0,002	0,09	20	0,15
E	0,020	0,68	18.749,06	0,00072	0,002	0,10	10	0,05
F	0,032	0,73	32.363,24	0,00072	0,002	0,08	20	0,14

Fuente: Elaboración propia.

Bombas y Equipos de Conducción

Se procede a determinar los caudales y potencia necesaria para la compra de bombas en el sistema de digestión anaerobia. Las bombas que serán necesarias instalar serán: bomba de alimentación al digestor, bomba de alimentación del recirculado y bomba para la alimentación del caudal de agua para el tanque de pre-fermentación.

En primer lugar, se realizan los cálculos para determinar la altura manométrica de cada bomba. Esto se logra mediante la implementación de la ecuación de Bernoulli. Véase *ecuación 7.49*.

$$\frac{P_1}{g \cdot \delta} + \frac{v_1^2}{2 \cdot g} + z_1 + Hb = \frac{P_2}{g \cdot \delta} + \frac{v_2^2}{2 \cdot g} + z_2 + hl$$

$$Hb = \frac{P_2 - P_1}{g \cdot \delta} + \frac{v_2^2 + v_1^2}{2 \cdot g} + (z_2 - z_1) + hl$$

(Ecuación 7.49)

Donde:

P1: Presión del fluido en el punto de aspiración de la bomba. Se toma la superficie libre del tanque de homogeneización siendo 1 atm = 101325 Pa.

P2: Presión del fluido en el punto de descarga de la bomba. Se realiza la descarga por la parte superior, de esa manera, 101325 Pa.

δ : densidad del efluente, 997,62 kg/m³

v1: velocidad del fluido en el ingreso del tanque. La velocidad será en la superficie libre del tanque, 0 m/s

v2= velocidad de descarga en el punto de descarga de la bomba., en m/s.

g= gravedad, 9,8m/s².

z1= Altura a la que se encuentra el punto de succión de la bomba, m.

z2= Altura a la que se encuentra el punto de descarga de la bomba, m.

H= Altura manométrica, m

hl= pérdidas de carga que se producen en la línea, m.

Posteriormente, se calcula la potencia de las bombas a partir de la siguiente expresión:

$$P = w \cdot g \cdot H_b$$

(Ecuación 7.50)

Donde:

P: potencia de la bomba (W).

Hb: altura manométrica (m).

w: caudal másico impulsado (kg/s).

g: gravedad (9,8 m/s²).

Los resultados obtenidos tanto para la altura manométrica, como para la potencia de cada bomba se muestran en la *tabla 7.20*.

Tabla 7.20. Altura manométrica y potencia de cada tramo indicado.

Bomba	Altura manométrica (m)	Potencia (W)
1	5,71	32,57
2	6,57	51,50
3	8,95	35,07

1: Alimentación del caudal de agua al tanque de pre-fermentación

2: Alimentación del efluente hacia el digestor anaeróbico.

3: Alimentación del recirculado hacia el digestor anaeróbico.

La bomba seleccionada para la alimentación del digestor anaeróbico es la Bomba Sumergible Grundfos SEG.40.09.E.2.1.502 Véase *figura 7.10*. Además, se coloca una válvula antirretorno para evitar cualquier reflujo del digestor anaeróbico en sentido inverso.



Figura 7.10. Bomba Sumergible SEG.40.09.E.2.1.502

Fuente: ¹⁰²

Para la alimentación del tanque de pre-fermentación y el recirculado al digestor, se seleccionó una Bomba Centrífugas Multietapa DAB Euro aptas para instalaciones domésticas, civiles e industriales. Cuenta con protección térmoprimétrica incorporada en los modelos monofásicos y posee un rango de trabajo: de 0,6 a 7,2 m³/h con altura de elevación de hasta 72 metros. Véase *figura 7.11*.



Figura 7.11. Bomba Centrífugas Multietapa DAB Euro

Fuente: ¹⁰³

¹⁰² [Grundfos pump](#)

¹⁰³ [Clima Técnica | Bombas centrífugas Multietapa dab Euro](#)

Por otro lado y por motivos de seguridad, se incorpora una antorcha para controlar el gas metano, altamente inflamable. Quemar el metano en la antorcha previene explosiones al evitar la acumulación de concentraciones peligrosas en el aire y reduce las emisiones de gases de efecto invernadero al convertir el metano en dióxido de carbono. Teniendo en cuenta que el caudal de biogás esperado es de 126,75 Nm³/h, se seleccionó el modelo Antorcha de gas cerrada FAII 100MP de Zorg Biogás, que opera dentro del rango de 80-150Nm³/h.¹⁰⁴

¹⁰⁴ [Antorcha de gas cerrada FAII 100 - Zorg Biogas GmbH](#)

Capítulo 8: Evaluación de Impacto Ambiental

Resumen Ejecutivo

El objetivo del presente informe es documentar el desarrollo del estudio de impacto ambiental (EslA) previo a la construcción, operación y cierre del proyecto “Planta de Digestión Anaeróbica para WDGS” situado en una biorrefinería a base de maíz en Villa María, Córdoba. De esta manera, se asegura cumplir la normativa nacional vigente en el área de implantación. Al igual que optimizar desde el punto de vista ambiental, aquellos componentes que fueran pertinentes y obtener las correspondientes aprobaciones y autorizaciones de las diversas autoridades de aplicación y control involucradas.

El proyecto consiste en la creación de una planta de digestión anaeróbica con el objetivo de producir biogás y transformarlo en energía eléctrica para el uso interno de la industria. La planta contará con 3 unidades para la digestión de la WDGS, sustrato utilizado que se obtiene como subproducto en la columna de destilación para purificar y concentrar el etanol. Además, consta con otras 3 unidades de captación y purificación del biogás hasta ser transformado en electricidad mediante un cogenerador. La planta permite aliviar la tensión de la red eléctrica de Villa María y reducir costos en la industria, además de generar nuevos puestos de trabajo y contribuir a la economía circular. El proyecto se divide en 3 grandes etapas: Construcción, la cual abarca la preparación del terreno, la instalación de conexiones para servicios con y una duración estimada de 6 meses. La segunda etapa es la más extensa, se trata de la operación, en la cual se digiere la WDGS y se produce la energía, el tiempo de vida es de 30 años. Finalmente, la etapa de cierre, en la cual se planifica que llegado el momento, se desmantelará la planta y se restaura la zona; aproximadamente 1 año.

Villa María se encuentra en la provincia de Córdoba y posee un terreno principalmente llano. Su fuente de agua es por extracción de fuentes subterráneas. Tiene una población de alrededor de 98.169 habitantes y posee diversas actividades industriales, siendo una de las más importantes cuencas lecheras del país. Además, cuenta con industrias agropecuarias, metalmecánicas, alimenticias y tecnológicas. En la línea de base se puede adelantar el deterioro del ambiente por dichas actividades.

La metodología consistió en relevar información contundente para comprender el estado inicial de todos los factores que pueden ser modificados por el proyecto. Se realizó un análisis para determinar los impactos que trae aparejada la realización del proyecto en

cuestión. Si bien los impactos negativos existen, se han desarrollado programas y planes para mitigar, reducir o prevenir en la medida de lo posible dicho efecto. El mayor impacto negativo sucede durante la construcción de la planta. Sin embargo, es la etapa que más empleo genera, impactando positivamente en el aspecto socioeconómico.

Aplicando el Plan de Gestión Ambiental diseñado, el cual incluye un Plan de Mitigación, Plan de contingencias, Programa de manejo de residuos, Plan de Monitoreo, Programa de concientización ambiental y cumpliendo con la normativa vigente, se califica al proyecto como ambientalmente viable.

Introducción

El presente documento constituye un Estudio de Impacto Ambiental (EsIA) para el proyecto “Planta de Digestión Anaeróbica para WDGS” que se llevará a cabo en Villa María, Córdoba. El sistema operará para la producción de biogás a partir de la WDGS o burlanda húmeda generada como subproducto del proceso de producción de etanol a partir de maíz. El biogás será tratado y utilizado como una fuente de energía renovable, siendo inyectado a la red de la empresa para su consumo interno. Esta práctica contribuirá a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y promoverá la autosuficiencia energética de la empresa.

El EsIA abordará de manera integral los posibles impactos ambientales y socioeconómicos asociados a las etapas constructivas, operativas y de cierre del digestor anaeróbico, así como también las medidas de mitigación, contingencia y de monitoreo. Las cuales son necesarias para garantizar la protección del entorno y cumplir con la normativa. Mediante este estudio se busca evaluar de manera rigurosa y transparente los efectos potenciales del proyecto, así como identificar las acciones necesarias para minimizar sus impactos negativos y potenciar sus beneficios en términos ambientales, socioeconómicos.

Descripción del proyecto

El proyecto se trata de la construcción y puesta en marcha de un digestor anaeróbico para la generación de biogás a partir de la WDGS, subproducto de una planta destiladora de maíz para la producción de bioetanol. Los residuos de la industria son 19.9 t/día y son conducidos a la planta de biogás para su degradación y tratamiento hasta

convertirlo en energía eléctrica mediante un equipo de cogeneración. La planta está compuesta por seis unidades descritas en detalle en el capítulo 5.

Nombre del proyecto

El proyecto es denominado: “Planta de Digestión Anaeróbica para WDGS”

Acceso al sitio

El predio está ubicado junto a la Autopista Córdoba - Rosario o bien, Autopista N°9. La dirección exacta es Au Córdoba - Rosario 203, Córdoba. Situado específicamente en Villa María. La *figura 8.1.* muestra una imagen satelital del predio y su proximidad a la ruta.



Figura 8.1. Imagen satelital del predio ubicado en Villa María, Córdoba.

Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth.

Etapas

El proyecto está dividido en tres etapas; etapa de construcción, etapa de operación y etapa de cierre del proyecto. Cada una tiene diferentes tiempos de duración y actividades llevadas a cabo. Por lo tanto, tendrán diferentes impactos. A continuación se describe en detalle cada etapa.

Etapas Constructiva

La primera etapa se refiere a todo lo que abarca la construcción de la planta de biodigestión. Es decir, la obra civil, la incorporación de equipos y/o materiales, mano de obra, etc. En particular, las actividades a realizar son las siguientes.

1. Transporte de obrador y materiales: Organización de la contratación de la mano de obra y los materiales requeridos para la elaboración total de la planta. Esto incluye materiales constructivos, como también equipos y maquinaria.

2. Montaje del Obrador: Se refiere al montaje e instalación de la infraestructura temporal para alojar la mano de obra, depositar los materiales y administrar la construcción.

3. Movimiento de suelos: Trabajo llevado a cabo para modificar el relieve del terreno mediante el movimiento de tierras a poca profundidad.

4. Obra civil: Construcción de toda la infraestructura de la planta de biogás. Es decir, las unidades de pre fermentación, tanque de digestión anaeróbica y sedimentador secundario. También se incluyen las unidades de purificación del biogás, el gasómetro, el equipo de cogeneración seleccionado y el sistema de cañerías y bombas.

5. Desmantelamiento del Obrador: Consiste en el desmontaje, desinstalación y transporte de la infraestructura temporal previamente instalada en la actividad 2. Además, se realiza la recolección y retiro del material constructivo, maquinarias y residuos.

Duración: 6 meses.

Etapas Operativa

La etapa de operación hace referencia a las actividades que se llevan a cabo una vez que la planta está construida y se procede a operar. En particular, el orden de actividades dentro de esta etapa son:

1. Puesta en marcha: El proceso que se realiza inmediatamente después de que esta confeccionada la planta. En este momento, se busca generar un crecimiento de microorganismos anaeróbicos y generar las condiciones necesarias para su crecimiento. Cuando se alcance la población objetivo, se puede comenzar a digerir la WDGS como se menciona en la memoria descriptiva del capítulo 5.

2. Descarga y homogeneización: El ingreso al tanque de pre fermentación de la WDGS y la corriente de agua para su dilución.

3. Digestión anaeróbica y generación de biogás: Digestión de la WDGS y producción de gas que es posteriormente purificado.

4. Generación de energía eléctrica: Aquí el biogás purificado ingresa al equipo de cogeneración para transformarse en energía eléctrica.

5. Disposición de efluentes y residuos.

6. Aplicación del biofertilizante.

Duración: 30 años.

Etapa de Cierre

La etapa de cierre se refiere al caso en donde se decide finalizar el uso de la planta de biogás y por lo tanto, el cese total de las actividades operacionales. Las actividades del cierre se listan en continuación:

1. Desmontaje: desmontaje completo y desinstalación de las unidades que componen la planta de biogás y los equipos electromecánicos comprendiendo cualquier tipo de infraestructura que sea requerida. ·

2. Recomposición del área: Retiro de residuos, limpieza del área, acondicionamiento del suelo y cobertura con forraje típico del área presente.

Duración: 1 año.

Marco Legal

Para resumir el marco legal pertinente para el presente proyecto, en la matriz de la tabla .. Se incluye una columna describiendo el tipo de regulación, seguida por el número e información particular de la normativa mencionada y finalmente una breve descripción de la misma.

Tipo	N°	Descripción
Ambiente	Ley 25.675	establece los presupuestos mínimos para una gestión ambiental adecuada y sustentable, la preservación y protección de la diversidad biológica e implementación de desarrollo sustentable. Uno de los instrumentos de política y gestión ambiental previstos es la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA)
Recursos Hídricos	Ley 25.688	establece los presupuestos mínimos ambientales para la preservación del agua y su utilización y aprovechamiento racionales. Con el propósito de utilizar los recursos hídricos de conformidad con esta ley, se requiere un permiso emitido por la autoridad correspondiente. Si la cuenca es interjurisdiccional y si el impacto ambiental en cualquiera de las otras jurisdicciones es importante, dicha utilización debe recibir aprobación del Comité de Cuencas Hídricas correspondiente.
Acceso a la Información	Ley 25.831	Ley de Acceso público a datos ambientales por la cual los habitantes del país gozan del derecho de acceso libre a datos ambientales del gobierno – en diferentes niveles y status. Este derecho es libre y gratuito, y no es necesario demostrar un interés en particular para ejercerlo.
Ordenamiento Territorial de Bosques	Ley 26.331	Establece el OTB como presupuesto mínimo. Moratoria completa en todo el país por la cual se frene la tala y el desmonte hasta que cada provincia realice el ordenamiento de su territorio. Participación de todos los sectores involucrados. Evaluación de Impacto Ambiental para cada solicitud de desmonte y para el aprovechamiento sostenible con impacto significativo una vez que se haya efectuado el ordenamiento territorial. Crea un fondo de compensación para la protección del bosque nativo.

Residuos Peligrosos	Ley 24.051	Generación, transporte y disposición de residuos peligrosos. El Decreto Nacional 831/93 reglamenta la Ley y se aplica a las actividades que se realicen en lugares sometidos a jurisdicción nacional; a residuos que, ubicados en territorio de una provincia, deban ser transportados fuera de ella y cuando se trate de residuos que, ubicados en el territorio de una provincia, pudieran afectar directa o indirectamente a personas o al ambiente más allá de la jurisdicción local en la cual se hubieran generado.
Calidad del Aire	Ley 20.284	Establece normas para la prevención de la contaminación atmosférica e incluye estándares de calidad de aire. Suelos Ley 22.428 Establece medidas generales de protección de suelos. En lo atinente a la contaminación de suelo debe ser complementada la información teniendo en consideración la ley 24.051 y prescripciones de la Res 250/03 modificatoria de la ley 24.701 que aprueba la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación en los países afectados por sequía grave o desertificación.
Biocombustibles	Ley 26.093	Régimen de Regulación y Promoción para la Producción y Uso Sustentables de Biocombustibles. Autoridad de aplicación. Funciones. Comisión Nacional Asesora. Habilitación de plantas productoras. Mezclado de Biocombustibles con Combustibles Fósiles. Sujetos beneficiarios del Régimen Promocional. Infracciones y sanciones.
Energías Renovables	Ley 26.190	Establece el régimen de fomento nacional para el uso de fuentes renovables de energía destinadas a la producción de energía eléctrica, promoviendo el desarrollo de tecnologías limpias y la diversificación de la matriz energética. Incluye beneficios fiscales y económicos para proyectos de energías renovables.
Energías Renovables	Ley 27.191	Modifica la Ley 26.190, aumentando los objetivos de participación de energías renovables en la matriz energética. Amplía los incentivos fiscales, establece nuevas metas de contribución y plazos, y fomenta la inversión en energías limpias para asegurar una mayor sostenibilidad y reducción de emisiones de carbono.
Digestión Anaeróbica	Res 19 2019	Norma técnica que regula la aplicación agrícola de digerido proveniente de plantas de digestión anaeróbica, asegurando que el uso de estos subproductos no afecte negativamente al medio ambiente. Establece criterios de calidad y procedimientos para la gestión y uso seguro del digerido como fertilizante.
Higiene y Seguridad	Ley 19.587	Establece las condiciones básicas de higiene y seguridad en el trabajo, obligando a los empleadores a proporcionar ambientes laborales seguros y saludables. Incluye regulaciones sobre prevención de accidentes, enfermedades profesionales, y obligaciones de capacitación y equipamiento para la protección de los trabajadores.
Higiene y Seguridad	Decreto 351/79	Reglamentación de la Ley 19.587, especifica las condiciones de seguridad que deben cumplir los lugares de trabajo, abordando la prevención de incendios y explosiones, medidas de seguridad para el almacenamiento, manejo y uso de sustancias inflamables y explosivas, y los requisitos para la instalación de sistemas de detección y extinción de incendios.

Caracterización Ambiental

Área de Influencia Directa (AID)

El área de influencia directa o AID se definió en base a los impactos ocasionados principalmente por los olores y los ruidos, a un área de 10 km a la redonda de la ubicación del biodigestor y a todo el predio que ocupa la planta. Esta área incluye el terreno edificio donde se lleva a cabo el desarrollo productivo del etanol. Se cree que fuera de este espectro, los olores y ruidos no afectarán directamente. Asimismo se considera el impacto directo positivo la generación de energía eléctrica y el biofertilizante. El área incluye por lo tanto al predio donde se desarrolla el bioetanol.

Área de influencia Indirecta (AII)

Se define como el Área de Influencia Indirecta (AII) al pueblo de Villa María, dentro del partido de General San Martín, Córdoba. En este caso, los impactos indirectos asociados a la construcción de la planta de digestión anaeróbica son principalmente socioeconómicos. Por ejemplo, el impacto en los accesos por el transporte de materiales y el empleo. Además, la generación de energía genera un impacto positivo en la red eléctrica de la zona.

La *figura 8.2* señala tanto la AID (naranja) como la AII (violeta) del presente caso.



Figura 8.2. Áreas de influencia directa (naranja) e indirecta (violeta)

Fuente: Elaboración propia mediante Google Earth.

Línea de Base del Medio Físico

Edafología

Villa María se encuentra dentro de la unidad geomorfológica conocida como Pampa Plana, situada en el centro este de la Llanura Cordobesa. Se caracteriza por un relieve muy plano con una ligera pendiente de de 0,5% hacia el este, depósitos eólicos de textura limosa que forman los suelos, una capa freática poco profunda que afecta áreas cóncavas causando problemas de drenaje y salinización, así como también la presencia de bajos alargados que actúan como colectores de aguas superficiales. Además, se observan fajas fluviales sedimentarias al oeste, originadas por antiguos derrames del Río Ctalamochita, con una variedad de formas fluviales y materiales heterogéneos.

El principal accidente fisiográfico es el Río Ctalamochita, que atraviesa la zona de manera meándrica. Al norte de Ballesteros Sur, su curso cambia de norte a sur antes de retomar su rumbo original cerca de esa localidad. Al sur de este río, discurre el Arroyo Cabral, un paleocauce del Ctalamochita, cuyo curso se vuelve indefinido al este de la ruta provincial N°4, activándose en épocas de fuertes lluvias.¹⁰⁵

Precipitaciones

El régimen pluviométrico es monzónico, destacándose con lluvias abundantes en los seis meses estivales (595 mm de octubre a marzo), mientras que el semestre invernal registra una precipitación significativamente menor (183 mm de abril a septiembre), lo que contrasta con el régimen isohigro de la región pampeana húmeda. La precipitación media anual es de 778 mm, siendo los meses más lluviosos diciembre, enero y marzo, y los más secos junio, julio y agosto. La variabilidad pluviométrica se puede observar en la *tabla 8.1*, donde se evidencia que el mayor desvío está en el semestre primavera-estival, aunque el coeficiente de variación más alto se da en el semestre otoño-invernal, lo que puede generar incertidumbre en la actividad agrícola en años con coeficientes de variación superiores al 50%.

Tabla 8.1. Lluvias Medias Mensuales y su Variabilidad en Villa María

¹⁰⁵ [Carta de Suelos - Hoja 3363-9 VILLA MARÍA](#)

Meses	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	AÑO
Lluvia promedio (mm)	113	89	97	61	30	15	20	18	39	91	96	109	778
Desvío estándar (mm)	57	60	46	47	36	13	36	19	35	56	61	58	157
Coefficiente de Variación (mm)	52	74	46	70	109	100	152	106	92	62	64	53	20

Fuente: Servicio Meteorológico Nacional (1921-1955) y del INTA AER Villa María (1955-2005).

Vientos

Los vientos predominantes se originaron principalmente en el cuadrante Norte, seguidos por aquellos del cuadrante Sur. La mayoría de los registros indicaron velocidades del viento por debajo de los 50 m/s, con un 15% en el rango de 0.1 a 10 m/s y un 12% de los días sin vientos. Además, se realizaron cálculos de promedio mensual y anual de velocidad y dirección del viento utilizando datos de la Estación Meteorológica de la Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional Villa María. Se identificaron cerca de 63 tornados, principalmente de categoría F0 a F2 en la escala de Fujita, con el área de estudio siendo catalogada como de alta frecuencia y riesgo de tornados.¹⁰⁶

Temperaturas

El régimen térmico de Villa María se clasifica como templado, con una temperatura media anual de 16.05 °C, típica de la región central de la pradera pampeana. La amplitud térmica entre el mes más cálido (enero) y el más frío (julio) es de aproximadamente 14.5 °C. Las temperaturas extremas pueden ser visualizadas en la *figura 8.3*. La temporada de heladas en Villa María comienza alrededor de la primera quincena de mayo y termina en la segunda quincena de septiembre, con más de 212 días libres de heladas por año, siendo estas un fenómeno presente en el 100% de los años.

¹⁰⁶ Servicio Meteorológico Nacional (1921-2000)

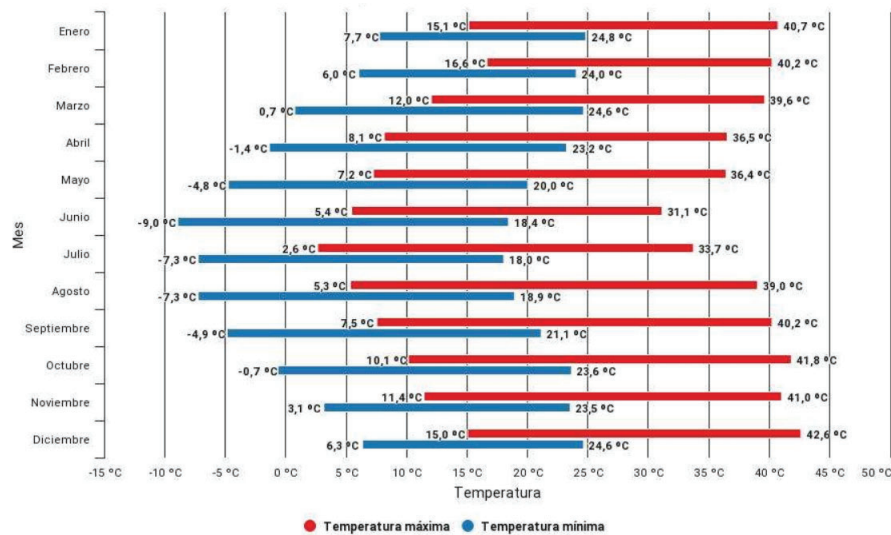


Figura 8.3. Rangos de temperatura extremas en Villa María

Fuente: Observatorio Pilar entre 1961 y 2020.

Hidrografía

La hidrografía de la provincia de Córdoba destaca por sus seis cuencas hídricas principales, incluyendo la cuenca de Salinas Grandes al noroeste y la cuenca de la laguna de Mar Chiquita al noreste. La cuenca del río Carcarañá se ubica en el centro sur, mientras que al sur se encuentra parte de la cuenca de la región Noroeste de la Llanura Pampeana, donde se destaca el río Quinto. El río Tercero, el más caudaloso de la provincia, recorre la región en sentido este-oeste y abastece principalmente la ciudad de Villa María para fines recreativos, industriales y agrícolas, además de recibir descargas de efluentes cloacales.

El proyecto bajo análisis se sitúa al norte del río Tercero y al sur de los arroyos Las Mojarras y Algodón, con un diseño de desagües pluviales que minimiza el impacto en las aguas superficiales. Considerando las fuentes de abastecimiento de agua potable en Villa María, mayoritariamente subterráneas, el proyecto presenta un riesgo bajo de afectación del recurso hídrico superficial. La *figura 8.4* muestra la ubicación del predio con respecto a las principales fuentes hídricas más cercanas.



Figura 8.4. Principales cuerpos de agua subterráneos.

Fuente: Gobierno de Villa María.

Sismicidad

Según las normas argentinas para construcciones sismo resistentes (Reglamento INPRES - CIRSOC 103), el territorio argentino se divide en cinco zonas según el grado de peligrosidad sísmica, donde el área en estudio se encuentra en la zona de peligrosidad 0, con sismicidad muy reducida. Además, los materiales del subsuelo se clasifican como de Tipo III, con una velocidad de onda de corte (VS) menor a 100 m/s, según la zonificación y clasificación de suelos de fundación dinámicamente estables.³

Línea de Base del Medio Biológico

Flora

La ubicación del predio en la provincia pampeana, dentro del distrito del Espinal, ha experimentado una notable pérdida de su vegetación autóctona debido a las actividades agropecuarias predominantes en la región. Aunque en los alrededores del área de proyecto se ha observado la casi completa erradicación de la flora nativa, se destaca la presencia de un pequeño bosque de olmos en la esquina este del terreno, próximo a la ruta N°2. En el contexto del distrito del Espinal en la provincia de Córdoba, se evidencia una transición de especies arbóreas del género *Prosopis* conforme se desciende en latitud. Desde la presencia del caldén en el sur hasta el predominio del algarrobo blanco y negro hacia el norte, y finalmente, el ñandubay en el noreste. Estas especies se acompañan de una variedad de flora que incluye al chañar, la tusca, el tala, el quebracho blanco, el mistol, la sombra de toro, la palmera carandá, el itín y la mora. Sin embargo, el impacto humano a lo largo del último siglo ha ocasionado la desaparición de gran parte de este bosque nativo,

dejando áreas remanentes aisladas y de extensión limitada que solo permiten una reconstrucción parcial de su biodiversidad original.¹⁰⁷

Fauna

Villa María exhibe una fauna silvestre empobrecida en comparación con su estado original en el Espinal. Esto se debe a la transformación de los extensos bosques en tierras de cultivo, lo que ha reducido significativamente los hábitats disponibles para la fauna y ha alterado sus niveles de biodiversidad. Las especies presentes en el área han logrado adaptarse a las profundas transformaciones ambientales o sobreviven en pequeñas áreas de bosque remanentes. En el predio donde se llevarán a cabo las obras, se observa una diversidad de fauna. Entre los mamíferos más comunes se encuentran ratas, cuises y perros, mientras que las aves incluyen caranchos, gaviotas, palomas y distintas especies de pájaros como jilgueros y tordos. Además, se ha registrado la presencia de reptiles como lagartos, y aunque no se han observado directamente, es posible la existencia de felinos pequeños como el gato montés.³

El área también alberga una variedad de insectos, como moscas y tucuras, que se alimentan de materia orgánica y vegetación en descomposición. A pesar de la presencia de algunas especies adaptadas a entornos urbanizados y agrícolas, la diversidad general de la fauna refleja la continua presencia de elementos de la fauna autóctona que han logrado subsistir en el área a pesar de la transformación del paisaje. Estos hallazgos resaltan la importancia de considerar el impacto ambiental en futuros proyectos en la región, así como la necesidad de implementar medidas de conservación y restauración para mitigar los efectos negativos sobre la biodiversidad local.¹⁰⁸

Línea de Base Socioeconómica

Población

Según el censo de 2010, la aglomeración de Villa María - Villa Nueva, también conocida como Gran Villa María, tenía una población de 98.169 habitantes, consolidándose como la tercera más poblada de la provincia, después del Gran Córdoba y el Gran Río Cuarto.

¹⁰⁷ [Evaluación de Impacto Ambiental y social Construcción y Operación del Centro de Gestión Ambiental de Villa María y Villa Nueva- Córdoba](#)

¹⁰⁸ [Evaluación de Impacto Ambiental y social Construcción y Operación del Centro de Gestión Ambiental de Villa María y Villa Nueva- Córdoba](#)

Empleo

En el aspecto industrial, es una de las más importantes cuencas lecheras del país, cuenta además con industrias agropecuarias, metalmecánicas, alimenticias y tecnológicas. En la *tabla 8.2* se visualiza la información de un relevamiento del Centro Estadístico de Villa María realizado en 2021 con respecto a la actualidad del empleo.

Tabla 8.2. Empleo en Villa María

Aspecto	Tasa en %
Actividad	55,1
Empleo	50,2
Desocupación	9,1
Desocupados demandantes de empleo	9,7
Subocupación demandante de empleo	5,9
Ocupados no demandantes de empleo disponible	6,1
Subocupación no demandante de empleo	1,4
Subocupación horaria	7,3
Sobreocupación horaria	27,0
Asalariados	37,0
No asalariados	63,0

Fuente: Centro Estadístico de Villa María.

Servicios

La ciudad de Villa María cuenta con una red de provisión de agua potable que abarca buena parte de su área urbana, mientras que el sistema de desagües pluviales está presente según la información de la Municipalidad. Sin embargo, la cobertura de la red cloacal se limita al área central, dejando al resto de la ciudad dependiente de pozos absorbentes para el tratamiento de aguas residuales. Respecto a la infraestructura vial, se observa una variedad de estados de desarrollo, como se detalla en información proporcionada por la Municipalidad sobre la gestión de calles y accesos.

La ciudad de Villa María cuenta con una red de suministro eléctrico proporcionada por la Empresa Provincial de Energía de Córdoba (EPEC), la cual incluye una central

térmica ubicada en el Parque Industrial y Tecnológico de la localidad, en un terreno de 8 hectáreas. Esta central, conectada a la subestación Villa María a través de una red de 132 kV operada por EPEC, tiene la capacidad de despachar energía a la red nacional y se abastece del gasoducto norte de Transportadora Gas del Norte S.A. (TGN).¹⁰⁹

Transporte y Accesos

La ciudad de Villa María, estratégicamente ubicada, es atravesada por importantes rutas nacionales y provinciales, como la 9 y la 158, que conectan con ciudades como Rosario, Buenos Aires y regiones del noroeste argentino, así como con Brasil y Chile. La estación de trenes Villa María es un punto intermedio del servicio de larga distancia Retiro - Córdoba y terminal del servicio regional Villa María - Córdoba, mientras que el Aeropuerto Regional Presidente Néstor Kirchner se encuentra a 10 kilómetros del centro. Además, la ciudad cuenta con un sistema de transporte público que comprende 6 líneas de colectivo que cubren su área.

Educación

Villa María cuenta con una amplia oferta educativa que incluye institutos de enseñanza primaria y secundaria, tanto públicos como privados, así como la presencia de la Universidad Nacional de Villa María, la UTN FRVM (Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Villa María) y una sede de la Universidad Católica de Salta. Durante la Encuesta Trimestral de Hogares, se estimó que un 31,14% de los ciudadanos urbanos estaban estudiando, con un 86,97% de los jóvenes de 15 a 18 años vinculados educativamente. Además, se presentan datos sobre el máximo nivel educativo alcanzado por la población que ya no asiste a instituciones educativas y el máximo nivel educativo alcanzado por la población económicamente activa.¹¹⁰

Salud

La ciudad de Villa María cuenta con un centro de salud destacado, el Hospital Regional Pasteur, que fue inaugurado en una nueva ubicación en diciembre de 2014. Este hospital, de nivel II de complejidad, tiene un alcance regional y proporciona una amplia gama de servicios médicos. Además, la ciudad cuenta con 16 centros de salud públicos, que incluyen Centros de Atención Primaria (CAP) y la Asistencia Pública, como parte de su infraestructura para la atención de la comunidad.

¹⁰⁹ [Nuestras centrales – MSU Energy](#)

¹¹⁰ [Evaluación de Impacto Ambiental y social Construcción y Operación del Centro de Gestión Ambiental de Villa María y Villa Nueva- Córdoba](#)

Identificación y Valoración de Impactos Ambientales

Identificación y valorización de impactos ambientales

Se procede a identificar los potenciales impactos tanto positivos como negativos dentro de cada etapa del proyecto. En las siguientes secciones, se mencionan en detalle los impactos en el medio físico, biológico y socioeconómico que se espera.

Etapas de construcción

Medio físico: La primera etapa como se mencionó anteriormente, consiste en la preparación del terreno, incluyendo movimientos de tierras, almacén de materiales, uso y circulación de maquinarias con niveles de ruido entre 60-90 dB, compactación del terreno, obras civiles e instalación y desmantelamiento del operador.

Agua: El agua puede verse afectada por las perforaciones y la nivelación de la tierra. Además, los escombros y residuos que puedan ser generados pueden impactar en la calidad del agua en primera instancia.

Aire: Podría verse afectado por la suspensión de material particulado (PM10), elevados niveles de ruido y generación de gases como NO₂ y CO.

Suelo: Los cambios que atraviesa el suelo son la compactación, erosión por el movimiento de equipos pesados y degradación por la nivelación y las instalaciones temporales.

Medio biológico: Todas las acciones mencionadas generan una pérdida de cobertura vegetal, cambios en el hábitat y modificaciones que podrían desviar de las zonas o caminos frecuentes a los animales. Sobre todo por los ruidos y el nivelamiento del suelo.

Medio socioeconómico: La generación de residuos será una carga que se suma a la recolección municipal, además afectará negativamente el paisaje que por un tiempo se encontrará la zona en tareas de construcción. En cuanto a los impactos positivos, se generan puestos de trabajo para la población local, ya que es la etapa con más actividades programadas.

Etapas de operación

Medio físico: La operación es un proceso mayormente automatizado a excepción de algunas actividades de mantenimiento y operación. El consumo de agua es uno de los

principales factores que puede generar un impacto en esta área, al igual que los olores propios del sustrato y de la digestión anaeróbica.

Agua: La capacidad de recarga del acuífero puede verse afectada por el uso del caudal de agua para la dilución de la WDGS en el tanque de prefermentación. Por otra parte, los efluentes del digestor anaeróbico se descargan en una laguna de estabilización como sucede actualmente en la planta de bioetanol con los efluentes cloacales. Esto podría generar un impacto negativo en el agua subterránea.

Aire: En esta etapa, los impactos en el aire son en su mayoría por parte de los olores. No obstante, para mitigar estos, todas las unidades se mantienen cerradas.

Suelo: El suelo recibe beneficios durante la operación de la planta gracias a la aplicación del biofertilizante generado secundariamente.

Medio Biológico: El biofertilizante impacta positivamente a la flora del área de influencia ya que al nutrir el suelo facilita el crecimiento de las plantas.

Medio socioeconómico: El medio socioeconómico es fuertemente beneficiado durante la etapa de operación. El requerimiento de personal para la operación y mantenimiento crea nuevos empleos. Además, la generación de energía eléctrica implica un ahorro en los costos de la empresa y un alivio en la tensión de la red que utiliza toda la población de Villa María y alrededores.

Etapas de cierre

En la última etapa se programa la desconexión de la energía eléctrica generada a la red y se clausura y desmantela la planta. Finalmente se recolectan los escombros y se retiran junto con todo tipo de residuo remanente para posteriormente restaurar el área.

Medio físico: Las actividades nuevamente implican demolición, por lo que se genera ruido, material particulado y polvos en suspensión. Algunos impactos son similares a los de la etapa de construcción por el movimiento de personal y maquinaria para la demolición. Pero sobre todo, el aire es el más afectado.

Medio socioeconómico: Las tareas generan nuevos empleos y al finalizar se obtiene un paisaje ordenado. No obstante, se pierde el aporte a la red y se cierran los puestos de trabajo que había generado la planta durante su uso.

Metodología

Se estudió el impacto en los componentes estudiados en la línea de base ambiental anteriormente, incluyendo los factores físicos, biológicos y socioeconómicos del área de influencia. Para esto, se utiliza la metodología que se describe a continuación:

a. Se enumeran en columnas las actividades desarrolladas en las distintas etapas del proyecto y en las filas los factores ambientales considerados.

b. Se evalúa la importancia (I_m) de la actividad desarrollada sobre un factor del ambiente a partir de la valoración numérica y posterior ponderación de los siguientes atributos, según la fórmula:

$$I_m = \pm [3i + 2 EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + MC]$$

En el Anexo 1, se explica a qué se refiere cada término en la ecuación y qué valores pueden tomar. Los resultados obtenidos se clasifican y relacionan con una escala de color según se muestra en la siguiente Tabla:

Valores	Tipo
Positivos	Positivo
> -51	Leve
Entre -51 y -80	Medio
< -80	Alto

Se confecciona la matriz de impacto ambiental con la importancia de cada efecto sobre los distintos factores del medio. Véase tabla 8.3.

Matriz de Evaluación de Impacto Ambiental

Tabla 8.3 Matriz de impactos ambientales evaluados para el proyecto, en todas sus etapas

			Factores Ambientales																	Valor Medio	
			Medio Natural											Socioeconómico							
			Aire			Agua				Suelo			Biotico	Económico		Social					
Factores			Calidad del aire	Olores	Ruido	Capacidad de recarga del acuífero	Calidad de agua superficial	Calidad de agua subteranea	Escorrentía	Fertilidad	Vibraciones	Adsorción	Flora	Fauna	Población	Empleo	Calidad de vida	Paisaje	Servicios municipales		
Acciones																					
Etapas	Construcción	Transporte del obrador y materiales	-21	-21	-26					-23	-22		-23	-36	21	21	21	-32		-13	
		Montaje del obrador			-27				-21		-62	-21	-62	-66	27	30	18	-58		-24	
		Movimiento de suelos	-60		-62	-26	-23	-36	-21	-62	-67	-21	-71	-71		32		-62		-42	
		Obra civil	-66		-62	-21		-62	-62	-62	-71	-21		-71	21	39	21	-21		-34	
		Desmantelamiento del obrador	-62		-62		-21	-21		-23	-62		-21	-21						-37	
	Operación	Puesta en marcha		-36		-21	-21	-21						-21		21				27	-10
		Descarga y homogenización		-23	-21	-21			-21					-26							-22
		Digestion anaerobica		-21								21				21				21	11
		Generacion de energia eléctrica			-21	-26									32	21	32			66	17
		Disposición de efluentes y residuos		-39			-60	-62	-55												-54
		Aplicación de biofertilizante					-21	-21		39			27	21				21	32		14
	Cierre	Desmontaje	-36	-62	-67	-21	-26	-21	-26	-21	-60	-21	-60	-66				-21		-60	-41
		Recomposición	21	21						21			27	27		-62			27	-21	8
Valor Medio			-37	-26	-44	-23	-29	-35	-34	-19	-57	-13	-26	-33	25	15	15	-19	7		

Análisis de Riesgos

Las plantas de digestión anaeróbica para generar energía conllevan la manipulación de sustancias que pueden implicar diferentes tipos de peligros. En líneas generales, en el presente proyecto se dividen en peligros para la salud y para el medio ambiente. En el siguiente apartado se identifican los posibles riesgos que se deben tener en cuenta en este caso.

Identificación de Riesgos

Los peligros para el medio ambiente en una planta de digestión anaeróbica se centran en las emisiones gaseosas y los vertidos en el suelo y el agua. Las emisiones gaseosas incluyen gases de efecto invernadero, como el metano, que pueden escapar de los reactores y durante la combustión del biogás. Además, se pueden generar productos de combustión que deben regularse según las disposiciones nacionales. En cuanto a los efluentes, las grandes cantidades de líquidos que atraviesan el sistema pueden contaminar el entorno, especialmente si hay fugas.

Los peligros para la salud humana en una planta de biogás se dividen en cuatro categorías: sustancias peligrosas, peligros eléctricos, peligros mecánicos y peligros de explosión e incendio. Las sustancias peligrosas presentes en la planta incluyen el biogás, auxiliares tecnológicos, bases y agentes biológicos, entre otros. Además, existen riesgos

eléctricos y mecánicos asociados al uso de equipos eléctricos y a la naturaleza de las operaciones en la planta. Por último, los peligros de explosión e incendio pueden surgir debido a la naturaleza inflamable del biogás y sus componentes, lo que puede provocar detonaciones o deflagraciones con consecuencias graves para la salud humana.

Metodología

El análisis de riesgo es el estudio de las causas de las posibles contingencias y los daños y consecuencias que estas pueden producir. Se denomina riesgo ambiental a la posibilidad de que por forma natural o antrópica se produzca un daño en el ambiente. La cuantificación de la magnitud de los riesgos se calcula como el producto entre la certeza y la magnitud de los mismos:

$$R = C \times M$$

Donde los valores de certidumbre C o probabilidad, van de 0 a 1. Y el valor M, factor de vulnerabilidad o magnitud toma valores entre 1 y 5. Cada valor está explicado en el Anexo 2.

La matriz de riesgos asociadas al proyecto, como así también su valoración a partir de las variables de certidumbre y magnitud, se muestra en la *tabla 8.4*.

Matriz de Riesgos

Tabla 8.4. Matriz de riesgos del presente proyecto.

Tipo	Incidente	Certidumbre	Magnitud	Riesgo
Medio Ambiente	Emisiones gaseosas	0,2	3	0,6
	Vertidos de efluentes	0,6	4	2,4
Salud	Sustancias peligrosas	0,1	1	0,1
	Peligros eléctricos	0,3	5	1,5
	Peligros mecánicos	0,2	4	0,8
	Peligros de	0,4	5	2

	incendio			
	Peligro por inhalación	0,3	4	1,2

Plan de Gestión Ambiental

El Plan de Gestión Ambiental está integrado por el Plan de Mitigación Ambiental, el Plan de Monitoreo Ambiental y el Plan de Contingencias Ambientales. Su objetivo es prevenir, reducir, controlar y responder a los posibles impactos del proyecto identificados en la Evaluación de Impacto Ambiental. Para su implementación efectiva, se sugiere definir claramente las funciones y responsabilidades de cada parte involucrada, asignando un nivel de decisión cercano a la Dirección del Proyecto. Un aspecto crucial es la determinación de las medidas de mitigación de los impactos negativos evaluados en la EIA. Los siguientes apartados indican el plan diseñado para cada uno.

Plan de Mitigación

Control de material particulado					
Medida	Conservación de la calidad del aire.				
Medio/Componente	Medio físico- Aire	Etapas	Construcción, cierre	Nº	1
Tipo	Reducción/atenuación	Indicador	PM10, NOx, CO	Monitoreo	Mensual
Descripción	- Se debe impedir la utilización de equipos, materiales o maquinaria que produzcan emisiones objetables de gases, olores o humos a la atmósfera. -Para los sitios de acopio de materiales (durante la construcción), estos se deben cubrir con lonas u otro material que atenúe el efecto de los vientos - Los vehículos usados deben corresponder a tecnología Euro V o superior.				
Acciones del proyecto	Transporte del obrador y materiales, movimiento de suelo, obra civil, desmontaje del obrador y desmontaje.				
Responsable	Jefe de obra y analista ambiental				

Personal requerido	Personal técnico.
---------------------------	-------------------

Control de ruido					
Medida	Conservar el nivel de ruido del ambiente.				
Medio/Componente	Medio físico- Aire	Etap	Construcción, cierre	N°	2
Tipo	Reducción/atenuación	Indicador	dB	Monitoreo	Mensual
Descripción	- Los motores de las máquinas tendrán que cumplir con el mantenimiento adecuado para reducir los ruidos generados por su uso. - Se limitará la velocidad de los camiones, evitando las aceleraciones y frenadas fuertes, lo que contribuirá a reducir al máximo los niveles sonoros producidos por la maquinaria móvil de obra. - Se establece un periodo laboral de 7 a.m –22 p.m. - Línea de atención para recibir quejas por los ruidos por parte de los vecinos para inspeccionar.				
Acciones del proyecto	Transporte del obrador y materiales, movimiento de suelo, obra civil, desmontaje del obrador y desmontaje.				
Responsable	Jefe de obra y analista ambiental				
Personal requerido	Personal técnico.				

Control de capacidad de recarga del acuífero					
Medida	Control del nivel de agua subterránea				
Medio/Componente	Medio físico- Agua	Etap	Operación	N°	3
Tipo	Reducción/atenuación	Indicador	mm	Monitoreo	Mensual

Descripción	- Mediciones mensuales del nivel de agua. - Medición trimestral de calidad de agua.
Acciones del proyecto	recarga y homogeneización.
Responsable	Analista ambiental
Personal requerido	Personal técnico.

Control de impactos sobre la fauna					
Medida	Control de fauna nativa.				
Medio/Componente	Medio biológico-Fauna	Etapas	Construcción, operación, mantenimiento	Nº	4
Tipo	Reducción/atenuación	Indicador	Presencia de especies	Monitoreo	Cuatrimstral
Descripción	- No dejar residuos expuestos o al alcance de la fauna - Implementar medidas de seguridad para impedir acceso a maquinaria o instalaciones peligrosas - Relevamiento visual de las especies presentes nativas y migratorias				
Acciones del proyecto	recarga y homogeneización.				
Responsable	Analista ambiental				
Personal requerido	Personal técnico.				

Plan de Contingencias

El Plan de Contingencias Ambientales tiene como objetivo establecer procedimientos para prevenir y remediar siniestros causados por el presente proyecto. Se requiere la formulación de un PCA para garantizar respuestas adecuadas ante emergencias que pongan en riesgo recursos naturales, personas vinculadas y bienes de la compañía.

Este plan se aplicará desde el inicio hasta el cese del proyecto e incluye medidas para situaciones de incendios y evacuaciones médicas.

Incendios

Ante un incendio, se dará la voz de alarma y se alertará a los bomberos. Se intentará sofocar el fuego si es controlable, y en caso contrario, se evaluará a las personas a un punto de reunión seguro. Se alertará a los servicios de emergencia y se procederá con la remediación ambiental posterior.

Evacuación Médica

En casos de emergencia médica, se avisará al Supervisor de Operaciones, se brindarán primeros auxilios si es necesario y se iniciará la cadena de llamadas a los servicios médicos. Se retirará a los afectados del área si su permanencia representa riesgo y se seguirán los protocolos para manejar productos químicos.

Plan de Monitoreo

El Monitoreo Ambiental del proyecto consiste en actividades sistemáticas para controlar y seguir el impacto ambiental durante las etapas de construcción, operación y cierre. Los objetivos incluyen supervisar las actividades del proyecto y la implementación de medidas ambientales, evaluar los impactos a lo largo del tiempo y espacio, y mantener registros de todas las acciones realizadas. El plan de monitoreo ambiental detalla las medidas y procedimientos para garantizar el cumplimiento de los objetivos ambientales del proyecto.

El plan de monitoreo consiste en evaluar la calidad del aire y la calidad del suelo. Por un lado, se miden los parámetros: MP, NOx, CO, SO₂ y ruidos molestos. Dicha medición tendrá una frecuencia semestral y se realizará sobre las fuentes fijas de la instalación. Los parámetros deben cumplir con la Ley Provincial N° 8.167 "Preservación del estado normal del aire".

En cuanto a la calidad del suelo, se miden los siguientes parámetros anualmente: pH, conductividad eléctrica, Sodio, potasio, Calcio, Magnesio, Porcentaje de sodio intercambiable, materia orgánica oxidable, nitrógeno total, fósforo total y elementos potencialmente tóxicos. Dicho monitoreo se realiza específicamente en las zonas donde se aplica el biofertilizante a futuro. Los parámetros a cumplir corresponden a la Resolución (MAySS) N° 105/17.

Conclusiones

La evaluación ambiental concluye en que efectivamente el proyecto no representa un impacto significativamente negativo a la comunidad vecina. Por el contrario, tendrá efectos positivos sobre todo para el medio socioeconómico y en algunas etapas incluso, la flora; especialmente a través de la fertilización del suelo con el biofertilizante y la generación en energía eléctrica que aliviará la tensión de la red. Por otra parte, se identifican acciones potencialmente impactantes en la calidad de aire y fauna y se proponen medidas de mitigación para garantizar la sustentabilidad del proyecto. Se considera que el proyecto es factible desde los aspectos socioeconómicos y ambientales, ya que los impactos negativos pueden mitigarse adecuadamente y contribuirá al bienestar de la comunidad al crear empleo y preservar los recursos naturales.

En efecto, el Estudio de Impacto Ambiental respalda la viabilidad del proyecto en términos de equidad social, viabilidad económica y protección ambiental. Se enfatiza la importancia del monitoreo continuo para asegurar la efectividad del Plan de Gestión Ambiental propuesto y garantizar la sostenibilidad a largo plazo del emprendimiento.

Capítulo 9: Cómputo y Presupuesto

Presupuesto

Inversión Inicial

En el presente apartado, se determina el presupuesto e inversión inicial necesaria para la construcción del proyecto. Para facilitar la comprensión, se dividen los costos en base a las unidades del sistema.

En la *tabla 9.1* se incluye un listado de todos los precios para los materiales y equipos electromecánicos que se requieren durante la obra civil de la planta de digestión anaeróbica. Para poder expresar los precios en dólares, se utiliza el cambio de Banco Nación al día de la fecha que corresponde a 882 \$ARS.

Tabla 9.1. Listado de equipos y materiales para la obra civil.

Equipos Electromecánicos y Materiales Constructivos					
1. Tanque de pre fermentación (U-01)					
Código Item	Descripción	Cantidad	Unidad	Precio (USD/unidad)	Total (USD)
U-01-1	Hormigón armado pared	8,48	m ³	100,00	848,00
U-01-2	Hormigón armado suelo	8,48	m ³	100,00	848,00
U-01-3	Lámina plástica (gasómetro mini)	2,83	m ³	40,00	113,20
U-01-4	Transportador Helicoidal	1	uni	1.896,44	1.896,44
U-01-5	Bomba sumergible	1	uni	938,20	938,20
U-01-6	Agitador sumergible	2	uni	930,00	1.860,00
					6.503,84
2. Sistema de calefacción (U-02)					
U-02-1	Intercambiador de calor	1	uni	13.363,00	13.363,00
					13.363,00
3. Digestor Anaerobico (U-03)					
U-03-1	Aislante de polietileno	14,96	m ³	10,75	160,82
U-03-2	Hormigón armado pared	129,67	m ³	60,00	7.780,20
U-03-3	Hormigón armado suelo	19,95	m ³	60,00	1.197,00
U-03-4	Bomba de alimentación	1	uni	1001,40	1.001,40
U-03-5	Agitador sumergible Flygt 4460 (Equipo + Soporte)	4	uni	1.027,00	4.108,00
U-03-6	Chapa plegada acero inoxidable 1,5 mm galvanizada	129,67	m ²	60,00	7.780,20

U-03-7	Membrana HDPE Aislamiento fondo	19,95	m ²	15,00	299,25
U-03-8	Gasómetro	1	uni	21.000,00	21.000,00
					43.326,87
4. Sedimentador Secundario (U-04)					
U-04-1	Hormigón en masa zona de sedimentación	10,55	m ³	40,00	422,00
U-04-2	Hormigón en masa zona de tolva	24,42	m ³	40,00	976,80
U-04-3	Lámina plástica (gasómetro mini)	43,68	m ³	40,00	1.747,20
U-04-4	Bomba de recirculado	1	uni	1001,40	1.001,40
					4.147,40
5. Purificación del Biogás (U-05)					
U-05-1	Trampa de humedad	1	uni	10.325,00	10.325,00
U-05-2	Filtro de H ₂ S	1	uni	15.588,00	15.588,00
					25.913,00
6. Unidad de cogeneración (U-06)					
U-06-1	Equipo CHP	1	unidad	194.480,00	194.480,00
U-06-2	Sistema de bombeo para agua caliente	1	unidad	4.576,00	4.576,00
					199.056,00
7. Conducciones					
U-07-1	Caño PVC ¾"	25	m	1,09	27,20
U-07-2	Caño PVC 1-¼"	15	m	2,89	43,41
U-07-3	Caño PVC 1-½"	10	m	3,85	38,55
U-07-4	Caño PVC 2"	10	m	1,81	18,14
U-07-5	Caño PVC 1"	20	m	0,93	18,57
U-07-6	Caño PVC ¾"	10	m	1,09	10,88
U-07-7	Caño PVC 1-¼"	20	m	2,89	57,87
					214,62
TOTAL MATERIALES Y EQUIPOS ELECTROMECÁNICOS					292.524,72

En cuanto a la contratación del personal de obra, incluyendo los materiales y equipamientos constructivos, transporte, montajes del obrado y nivelación de terrenos, los presupuestos obtenidos corresponden a un 250% de los costos de los materiales y equipos electromecánicos. La *ecuación 9.1* muestra cómo se estima el valor de los costos del personal de la obra civil.

$$292.524,72 \text{ USD} \cdot 2,5 = 731.311,8 \text{ USD}$$

(Ecuación 9.1)

Sumando ambos costos, se obtiene que la inversión inicial es de **1.023.836,52 USD**.

Operación y Mantenimiento

Además de los costos para la construcción y armado de la planta, se deben considerar los costos asociados a su operación y mantenimiento. Los aspectos más importantes a considerar en este apartado son la contratación de personal, los insumos para la operación y la disposición de los residuos. No se considera el consumo energético de las bombas y los agitadores ya que será cubierto por la propia generación de energía de la planta.

El personal que se debe contratar incluye un operario, un jefe de planta y un técnico de laboratorio. Se destinan 3.300 USD mensuales para cubrir los sueldos de los 3 puestos. Los insumos son en principio el óxido férrico y la solución de NaOH 10 M. La *tabla 9.2* indica el tipo de insumo, cantidad y costo mensual. La misma tabla, incluye el salario unificado del personal.

Tabla 9.2. Costos de operación.

Insumo	Cantidad	Cantidad anualizada	Costo unitario	Costo anual (USD)
Óxido férrico	1025,83 kg/120 d	3.120,22 kg	629,99 USD/tn	1.965,57
NaOH 10 M	400 kg NaOH/d	146.000 kg	400 USD/t	58.400,00
Personal	3	-	-	39.600
Total (USD)				99.965,57

Por otra parte, para que la operación se mantenga eficiente durante el tiempo de vida del proyecto, se debe realizar el mantenimiento en algunos componentes de la planta. Para estimar los costos, se utiliza la *ecuación 9.2*, donde se define un porcentaje anual de mantenimiento con respecto a la unidad o equipo a reparar.

$$Costo_{Mantenimiento} = \%_{M/R} \cdot Costo_{Unidad}$$

(Ecuación 9.2)

La *tabla 9.3* lista los equipos y unidades a los que se les realiza un mantenimiento anual, el porcentaje de mantenimiento y/o reparación adoptado y los costos finales de mantenimiento. Además, se incluyen los equipos cuyo mantenimiento se encuentra incluido en el servicio de compra original.

Tabla 9.3. Costos de mantenimiento.

Equipo	Costo	%M/R	Costo Mantenimiento (USD)
Co generador	-	-	Cubierto
Agitadores	-	-	Cubierto
Trampa de humedad	10.325,00	1%	103,25
Bombas	2981,00	1%	29,81
Conducciones	214,62	3%	6,44
Tanque pre- fermentación	4.607,40	2%	92,14
Sedimentador	4.147,40	2%	82,95
Filtro H ₂ S	15.588,00	1%	155,88
Digestor Anaeróbico + gasómetro	43.326,87	2%	866,54
Total (USD)			1.337,01

Combinando el costo de operaciones con el mantenimiento anual de la planta, se obtiene un total de **101.302,58 USD**.

Análisis Financiero

Para analizar si el proyecto es viable o no, se debe hacer un análisis de los ingresos a largo plazo que podría generarle al proyecto. Para eso, se realiza una evaluación de los ingresos mediante el ahorro energético teniendo en cuenta los consumos propios de la planta por parte de los agitadores y las bombas. Posteriormente, se aplica un análisis de rentabilidad considerando los costos de la inversión inicial, la operación, el mantenimiento y los ingresos.

Ingresos

Como se mencionó previamente, el biogás generado en el digestor anaeróbico se destina a la generación de energía eléctrica. Parte de esta producción es destinada para el autoconsumo de la planta, particularmente las bombas y los agitadores. Por lo tanto, se utiliza la *ecuación 9.3* para definir la energía eléctrica remanente que podrá ser consumida por la biorrefinería.

$$\Delta E = E_{\text{producida}} - E_{\text{Consumida}}$$

(Ecuación 9.3)

Los consumos de la planta de digestión anaeróbica se calculan en base a la *ecuación 8.4*. Se tiene en cuenta el uso de los equipos durante los 365 días del año. El resumen de los consumos se muestra en la *tabla 9.4*.

$$\text{Consumo}\left(\frac{\text{kWh}}{\text{año}}\right) = \text{Consumo}(\text{kW}) \cdot 24 \left(\frac{\text{h}}{\text{día}}\right) \cdot 365 \left(\frac{\text{día}}{\text{año}}\right)$$

(Ecuación 9.4)

Tabla 9.4. Consumos de la planta de digestión anaeróbica.

Equipo	Cantidad	Consumo (kW)	Consumo (kWh/año)
Bomba 1	1	0,37	3.241,20
Bomba 2	1	0,37	3.241,20
Bomba 3	1	0,37	3.241,20
Agitador Flygt 4200	1	3,00	26.280,00
Agitador Flygt 4460	4	7,5	262.800,00
Total (kWh/año)			298.803,60

Reiterando los datos calculados en la memoria de cálculo en el capítulo 6, se calcula la energía eléctrica remanente generada por año mediante la *ecuación 9.3*. El costo unitario promedio para grandes generadores según EPEC es de 0,1 USD/kWh¹¹¹. La *tabla 9.5*

¹¹¹ [Información Comercial - Córdoba](#)

resumen los datos mencionados y muestra los ingresos equivalentes a la energía eléctrica generada.

Tabla 9.5. Balance de generación de energía.

Parámetro	Valor	Unidades
Energía eléctrica generada por año	3119,33	Mwh/año
Energía eléctrica consumida por año	298,80	Mwh/año
Energía eléctrica remanente	2820,53	Mwh/año
Precio por kwh generado	0,1	USD/kWh
Ingresos	282.053,00	USD/año

Se estima un ingreso anual por generación de energía eléctrica de aproximadamente 282.053 USD/año. En el próximo apartado, se calcula la rentabilidad del proyecto.

Rentabilidad

Para evaluar la rentabilidad del proyecto, se define un tiempo de vida útil de 30 años. A partir de esto, se calcula el Valor del Precio neto (VPN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). Para evaluar que el proyecto es viable, se debe obtener un VPN positivo y un TIR mayor a la tasa de retorno. El cálculo de ambos parámetros se inicia en las *ecuaciones 9.5 y 9.6*.

$$VPN = -C_0 + \sum_{i=1}^{30} \frac{C_i}{(1+r)^i}$$

(Ecuación 9.5)

$$0 = -C_0 + \sum_{i=1}^{30} \frac{C_i}{(1+TIR)^i}$$

(Ecuación 9.6)

Para realizar el balance, se establece un periodo de 30 años, equivalente al tiempo de vida del proyecto. Se considera la inversión inicial, la ganancia anual por la energía generada y los costos de operación y mantenimiento. El flujo es positivo a partir del

segundo periodo, es decir, el año 2025. La recuperación de la inversión se estima con el flujo acumulado. En este caso, sucede luego de 5 períodos; a partir del año 2029.

En la *tabla 9.6.* que se muestra a continuación se presenta el flujo de caja del proyecto por un período de 30 años. Por otra parte, para la determinación del VPN se considera una tasa de descuento del 7% anual en dólares. Los resultados del presente análisis incluyen un VPN de **6.790.640 USD** y un rendimiento anual del 21%. Siendo que cumplen con las condiciones mencionadas anteriormente, se considera que el proyecto es viable desde el punto de vista financiero.

Tabla 9.6. Flujo de Caja del Proyecto.

Año	Inversión Inicial (USD)	Ganancia Anual (USD)	Operación y mantenimiento	Flujo	Acumulado
2024	(1.023.836,52)	282.053	(101.303)	(843.087)	-839.077
2025		282.053	(101.303)	180.750	-658.327
2026		282.053	(101.303)	180.750	-477.577
2027		282.053	(101.303)	180.750	-296.827
2028		282.053	(101.303)	180.750	-116.077
2029		282.053	(101.303)	180.750	64.673
2030		282.053	(101.303)	180.750	245.423
2031		282.053	(101.303)	180.750	426.173
2032		282.053	(101.303)	180.750	606.923
2033		282.053	(101.303)	180.750	787.673
2034		282.053	(101.303)	180.750	968.423
2035		282.053	(101.303)	180.750	1.149.173
2036		282.053	(101.303)	180.750	1.329.923
2037		282.053	(101.303)	180.750	1.510.673
2038		282.053	(101.303)	180.750	1.691.423
2039		282.053	(101.303)	180.750	1.872.173

2040		282.053	(101.303)	180.750	2.052.923
2041		282.053	(101.303)	180.750	2.233.673
2042		282.053	(101.303)	180.750	2.414.423
2043		282.053	(101.303)	180.750	2.595.173
2044		282.053	(101.303)	180.750	2.775.923
2045		282.053	(101.303)	180.750	2.956.673
2046		282.053	(101.303)	180.750	3.137.423
2047		282.053	(101.303)	180.750	3.318.173
2048		282.053	(101.303)	180.750	3.498.923
2049		282.053	(101.303)	180.750	3.679.673
2050		282.053	(101.303)	180.750	3.860.423
2051		282.053	(101.303)	180.750	4.041.173
2052		282.053	(101.303)	180.750	4.221.923
2053		282.053	(101.303)	180.750	4.402.673
2054		282.053	(101.303)	180.750	4.583.423
VPN	\$ 6.790.640				
TIR	21%				

Capítulo 10: Conclusiones

En conclusión, el presente proyecto final integrador ha logrado cumplir con éxito los objetivos establecidos, tanto generales como específicos, en relación con el análisis y tratamiento del subproducto generado en la producción de bioetanol. La caracterización de la WDGS permitió identificar parámetros importantes para el diseño del digestor. Lo que permitió evaluar diferentes alternativas para el caso. La elección de un sistema de biodigestión con cogeneración de energía se fundamentó en la consideración de los objetivos del proyecto y las características de los sistemas analizados, asegurando la viabilidad técnica y económica del proyecto.

El ensayo de Potencial de Biometano (PBM) es una herramienta que se destaca dentro de este proyecto. La información que se obtuvo de dicho análisis permitió cuantificar con mayor precisión la energía generada por parte de la WDGS. Además, facilitó la evaluación y comportamiento de posibles inhibidores en el sistema y la configuración más conveniente en cuanto a la relación sustrato inóculo.

Como recomendación a futuro, se sugiere realizar un análisis del efluente de salida del ensayo PBM. Particularmente, considerando el porcentaje de sólidos totales (ST), demanda química de oxígeno (DQO) e inhibidores presentes, con el fin de poder perfeccionar el diseño y garantizar un tratamiento efectivo en caso de ser necesario. Por otro lado, un enfoque interesante a considerar es la implementación de biodigestores secos, dada la composición de los sólidos totales de la WDGS.

Asimismo, se recomienda estudiar los beneficios del biofertilizante obtenido. En efecto, se podrá sumar un beneficio económico para tener en cuenta en el análisis financiero que podría incluso mejorar el rendimiento de la inversión y obteniendo un retorno de inversión más temprano.

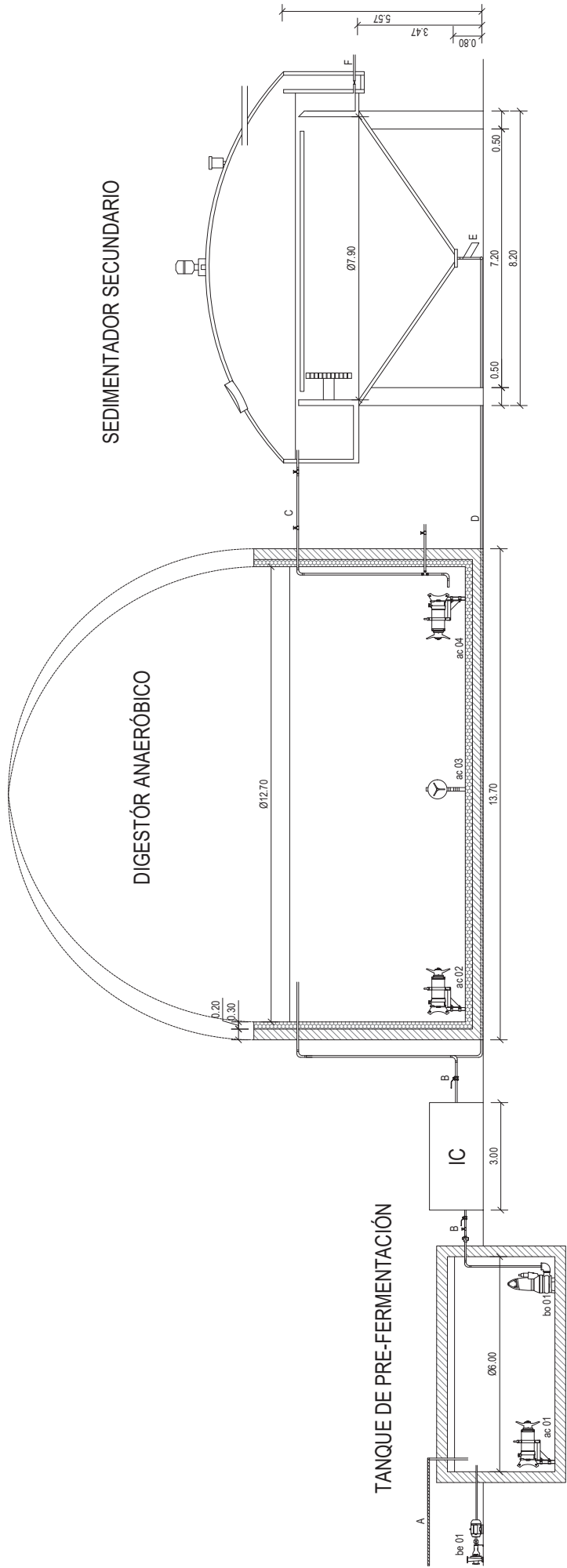
En cuanto al sustrato, la WDGS demostró ser un sustrato muy interesante por su potencial de generación de metano. Esta alternativa no sólo agrega valor a la empresa, sino que también se posiciona como una solución viable para satisfacer las demandas energéticas de la industria, promover el uso de fuentes de energía alternativas y reducir el impacto ambiental.

En resumen, los resultados obtenidos demuestran que el proyecto posee factibilidad técnica, económica y ambiental. Con un elevado potencial para generar beneficios tanto para la empresa como para el entorno socioambiental que lo rodea. Implementar las recomendaciones sugeridas podría fortalecer aún más los beneficios obtenidos y mejorar la sostenibilidad del proyecto a largo plazo.

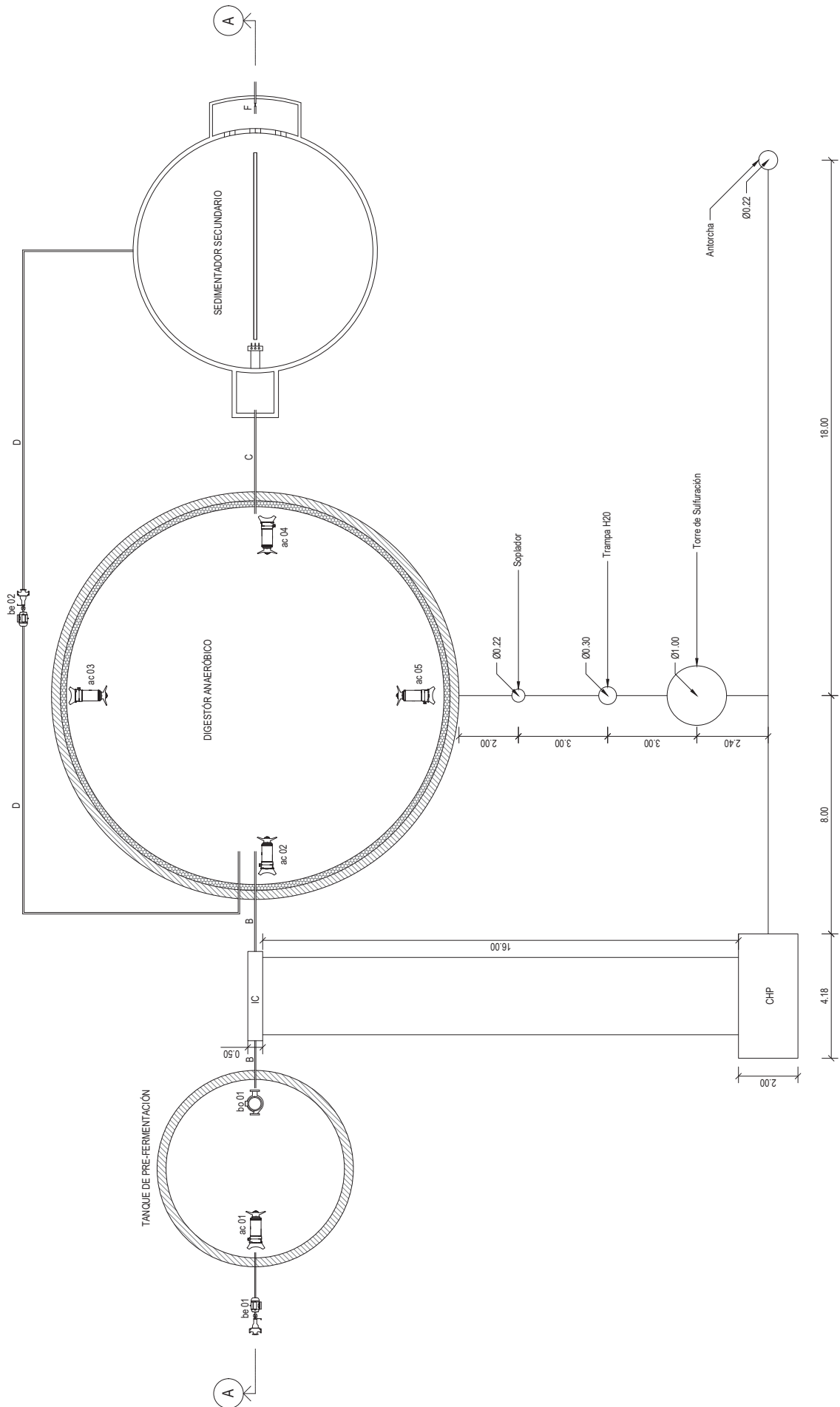
Capítulo 11: Planos

Se presentan dos planos de la planta con vistas en corte A-A y superior y tres planos que muestran con más detalle cada unidad. Con el objetivo de simplificar los nombres dentro del plano de las plantas, se aplicaron las siguientes denominaciones:

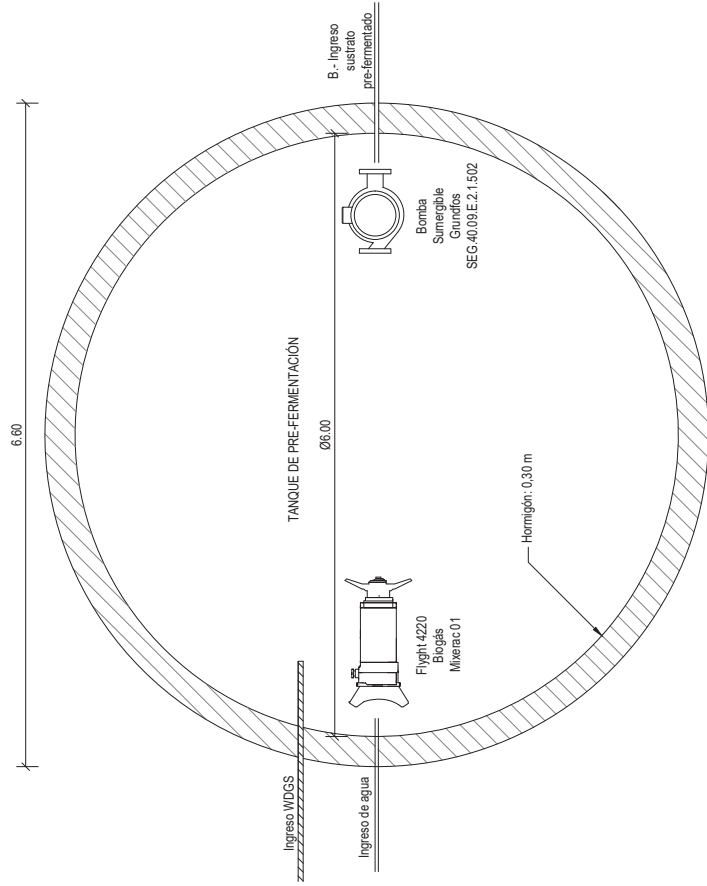
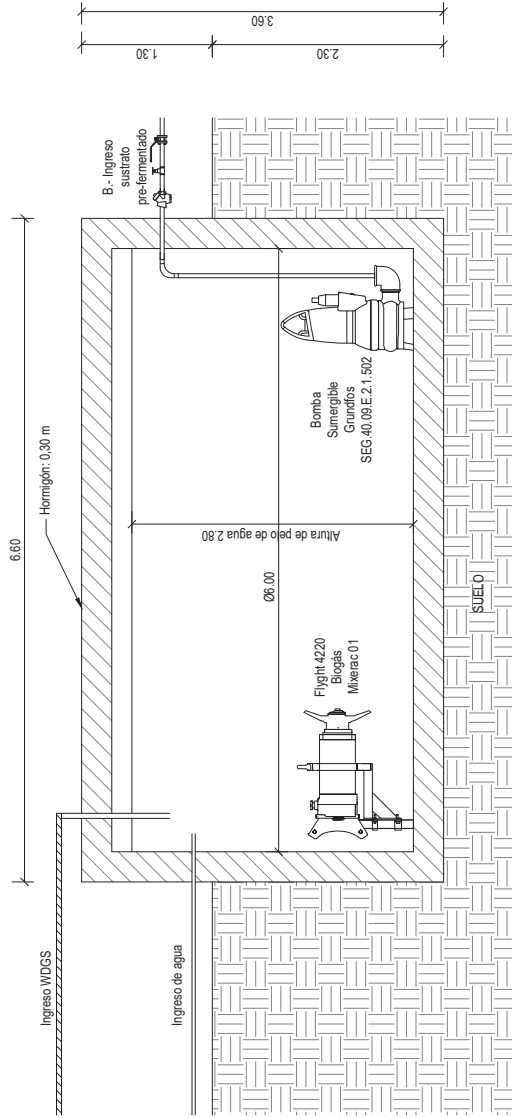
- ac01, ac02, ac03 y ac 04: agitadores.
- be01 y be02: bombas centrífugas.
- bo01: bomba sumergible.



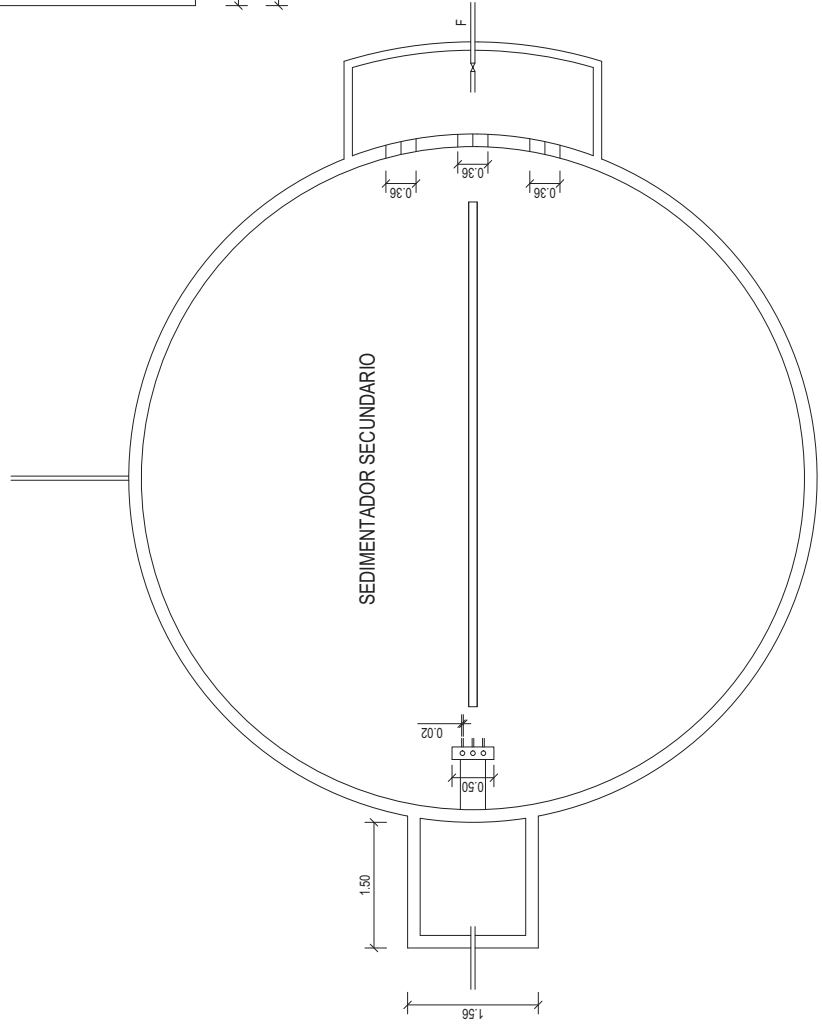
Tolerancias Generales	Proyecto	2024	Grupo 1	 UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN	Estudiante	Visciglio, Delfina Elena	
	Dibujó	2024	Grupo 1		Docentes		
	Revisó						
	Aprobó						
	Escala	Denominación			Proyecto	Estudio de prefactibilidad para la digestión anaeróbica de WDGs; subproducto de una biorrefinería	
	1:100						
		Vista Lateral en Corte A-A			Cateoría	PFI	
	Formato A3						
					Nº plano	PFI Visciglio 1	Pág. 1



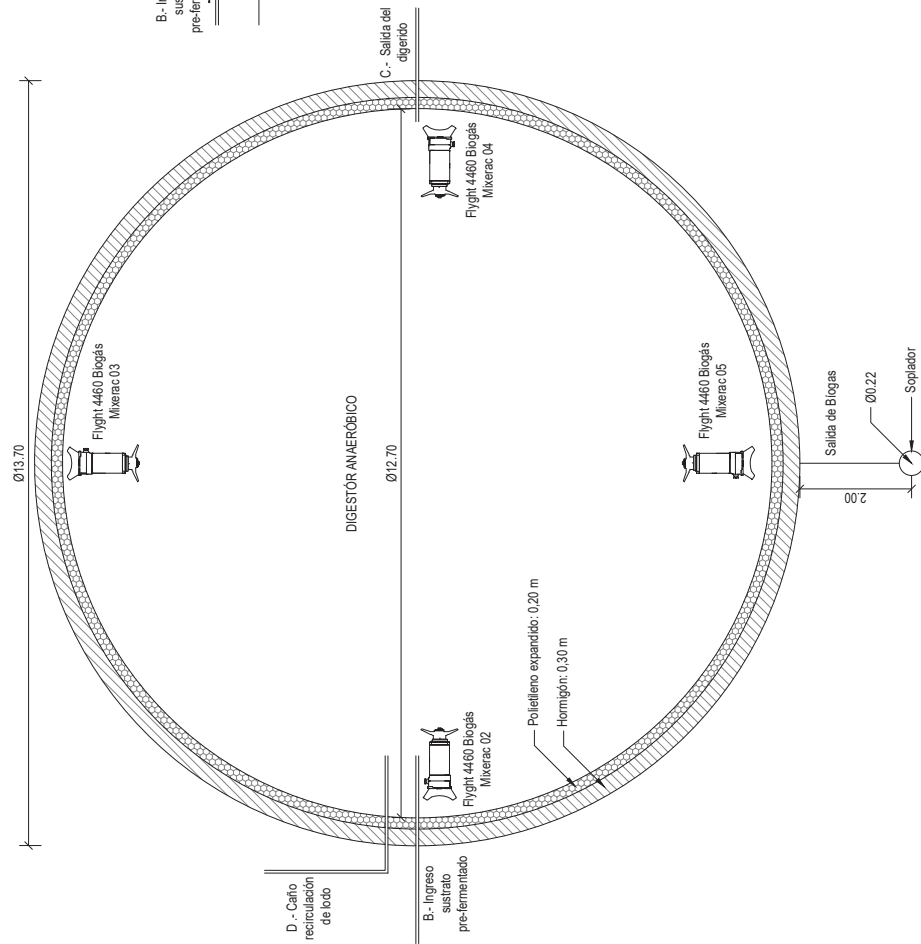
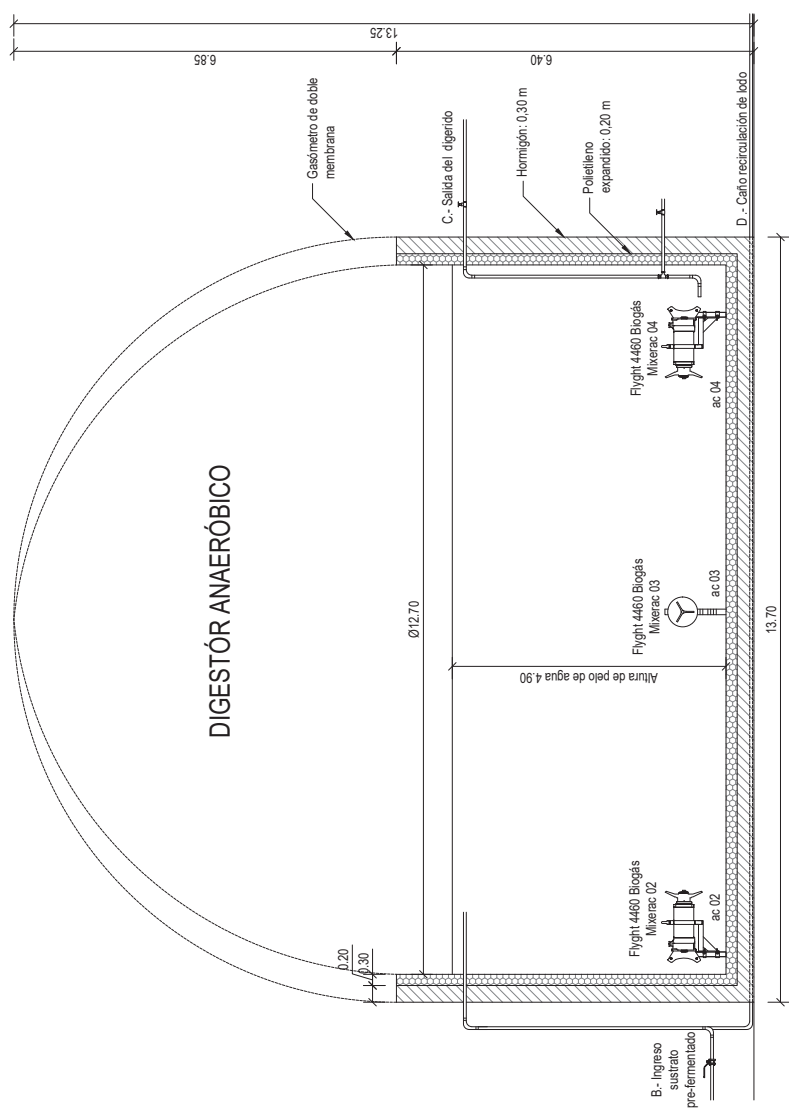
Tolerancias Generales	Proyecto	2024	Grupo 1	UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTIN	Estudiante Visciglio, Delfina Elena
	Dibujó	2024	Grupo 1		
	Revisó				
	Aprobó				
Escala				Denominación	Vista Superior de Planta
1:125					
					PFI
				Nº plano	PFI Visciglio 1
					Página 2



Tolerancias Generales	Proyecto	2024	Grupo 1	 UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN	Estudiante
	Dibujo	2024	Grupo 1		Visciglio, Delfina Elena
	Revisó				Docentes
	Aprobó				Rodríguez, Ruth
	Escala	Denominación			Proyecto
		1:50			Estudio de prefabricabilidad para la digestión anaeróbica de WDSG; subproducto de una biorefinería
		Detalle Tanque de Pre-Fermentación Planta - Corte			
		Cálculo			
	Formato A3	PFI			
		N° plano PFI Visciglio 1			
	Pág. 4				



10



Tolerancias Generales	Proyecto	2024	Grupo 1	 UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN MARTÍN	Estudiante	Visciglio, Delfina Elena	
	Dibujó	2024	Grupo 1		Docentes	Rodriguez, Ruth	
	Revisó						
	Aprobó						
	Escala				Denominación	Proyecto	Estudio de prefabricabilidad para la digestión anaeróbica de WDSG; subproducto de una bierrrefinería
		1:90					
		Detalle Tanque de Digestor Anaeróbico Planta - Corte			Catedra	PFI	
	Formato A3				Nº plano	PFI Visciglio 1	Pág: 5

ANEXO

Anexo 1: Valoración de Impacto Ambiental

NATURALEZA (SIGNO)	
Impacto beneficioso +	
Impacto perjudicial -	
INTENSIDAD (I) (grado de destrucción)	EXTENSION (EX) (área de influencia)
Baja 1	Puntual 1
Media 2	Parcial 2
Alta 4	Extenso 4
Muy Alta 8	Total 8
Total 12	Crítica 12
MOMENTO (MO) (plazo de manifestación)	PERSISTENCIA (PE) (permanencia del efecto)
Largo plazo 1	Fugaz 1
Medio plazo 2	Temporal 2
Inmediato 4	Permanente 4
Crítico 8	
REVERSIBILIDAD (RV)	SINERGIA (SI) (regularidad de la manifestación)
Corto plazo 1	Sin sinergismo (simple) 1
Medio plazo 2	Sinérgico 2
Irreversible 4	Muy sinérgico 4
ACUMULACIÓN (AC) (incremento progresivo)	EFEECTO (EF) (relación causa-efecto)
Simple 1	Indirecto (secundario) 1
Acumulativo 4	Directo 4
PERIODICIDAD (PR) (regularidad de la manifestación)	RECUPERABILIDAD (MC) (reconstrucción por medios humanos)
Irregular o aperiódico y discontinuo 1	Recuperable de manera inmediata 1
Periódico 2	Recuperable a medio plazo 2
Continuo 4	Mitigable 4
	Irrecuperable 8
Importancia del impacto $I: \pm [3I + 2EX + MO + PE + RV + SI + AC + EF + PR + MC]$	

Anexo 2: Parámetros de análisis de riesgo

Los valores de certidumbre pueden tomar valores de 0 a 1.

Certidumbre: Refiera la probabilidad de ocurrencia.

- ❖ Frecuente (Alta probabilidad de ocurrencia, sucede en forma reiterada) → 1
- ❖ Moderada (Probabilidad de ocurrencia media, sucede algunas veces) → 0,8
- ❖ Ocasional (Ocurrencia limitada, sucede pocas veces) → 0,6
- ❖ Remota (Ocurrencia baja, sucede esporádicamente) → 0,4
- ❖ Improbable (Ocurrencia muy baja, sucede en forma excepcional) → 0,2
- ❖ Imposible (Difícil probabilidad de ocurrencia, no ha sucedido hasta el momento) → 0,1

Magnitud: Contempla el número y clase de afectados como así también el tipo y gravedad de las lesiones. Los valores de magnitud o vulnerabilidad toman valores entre 0 y 5.

- Nula: 0
- Leve: 1
- Media: 2
- Alta: 3
- Grave con daños reversibles: 4
- Grave con daños irreversibles: 5

La clasificación de los incidentes se muestra en la siguiente Tabla:

Clasificación del incidente	Descripción	Valores CxM
Aceptable	No representa un riesgo significativo. No es necesaria la inversión inmediata de recursos ni efectuar una acción específica para la gestión sobre el factor de vulnerabilidad considerado.	0 a 1,6
Tolerable	Se establece una prioridad de segundo nivel para abordar las actividades necesarias para la gestión del riesgo.	1,7 a 3,3
Inaceptable	Se deben tomar acciones prioritarias e inmediatas para la gestión del riesgo dado que conlleva impactos altos en el sistema.	3,4 a 5