



**Facultad de Ingeniería  
Escuela de Ingeniería en Medioambiente  
Ingeniería Ambiental**

**DETERMINACIÓN DEL POTENCIAL METANOGÉNICO DEL  
BAGAZO CERVECERO, PARA SU VALORIZACIÓN ENERGÉTICA  
EN UNA CERVECERÍA ARTESANAL MODELO**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL**

**AUTOR: César Araya Hurtado  
PROFESOR GUÍA: Dr. Joao Cerqueira Pinto  
PROFESOR CO-GUÍA: Gianfranco Debernardi  
VALPARAÍSO, 2017.**

---

## Resumen

Las cervecerías artesanales se han visto afectadas en los últimos años por el aumento de los costos de la energía, los productos primarios y de la gestión de sus residuos. Y es por esto que las medidas de ahorro energético se han transformado en una prioridad para la gran parte de las empresas del rubro.

El principal residuo que se obtiene del proceso productivo de cerveza es el bagazo cervecero. De acuerdo a sus características fisicoquímicas, una posible alternativa para el tratamiento de este residuo, es la digestión anaeróbica que por un lado permite degradar los componentes orgánicos del bagazo cervecero y por otro lado, generar metano, el cual puede utilizarse para suministro energético en las cervecerías.

Con el fin de revalorizar energéticamente al bagazo cervecero, se determinó experimentalmente el potencial metanogénico del bagazo cervecero, mediante ensayos de a escala de laboratorio, en los cuales también se comparó el rendimiento de estos según la relación sustrato/inoculo ( $gSV_{\text{bagazo}}/gSV_{\text{inoculo}}$ ) utilizada. Se elaboraron ensayos con relaciones S/I 0,5, 1 y 2, y se obtuvo potenciales metanogénicos de 339,16, 332,70 y 252,99 ml de  $CH_4$  por gramo de bagazo seco, en un tiempo de residencia de 20, 30 y 37 días, respectivamente.

Además, se evaluó la prefactibilidad técnico-económica de implementar una planta de biogás en una cervecería artesanal modelo, la cual aportaría energía calórica en sus procesos productivos a partir del bagazo cervecero.

De acuerdo al potencial metanogénico del bagazo cervecero obtenido en la mejor alternativa (utilizando la relación S/I de 0,5), y considerando la tasa de producción semanal de bagazo cervecero (200 kg semanales) y el consumo energético mensual de la cervecería artesanal (1555714 kcal/mes), se determinó que es posible abastecer un 41,73% del total de energía requerida para la producción de cerveza.

Se cotizó el costo de los principales equipos que se utilizarían en la planta de biogás diseñada, con su costo de instalación, y la construcción de un biodigestor de 15 m<sup>3</sup> de volumen total, obteniendo un valor de inversión inicial de \$8.028.228 pesos.

Finalmente se comparó el VAN para el gasto energético de la cervecería artesanal implementando el tratamiento anaerobio con el VAN del gasto energético manteniendo la fuente actual de energía, resultando mayor este último. Lo que advierte que es una mejor opción seguir utilizando el gas licuado como combustible.

---

# Índice

|  |    |
|--|----|
| Capítulo 1. Introducción.....  | 1  |
| 1.1    Nuevas fuentes de energía .....                                   | 1  |
| 1.2    Revalorización de residuos como recursos energéticos .....        | 1  |
| 1.3    Industria cervecera .....   | 2  |
| 1.3.1    Bagazo cervecero como fuente de energía.....                    | 3  |
| 1.3.2    Cervecería artesanal modelo .....                               | 4  |
| Capítulo 2. Planteamiento del Problema.....                              | 5  |
| Capítulo 3. Objetivos .....  | 6  |
| 3.1    Objetivo General.....   | 6  |
| 3.2    Objetivos Específicos.....  | 6  |
| Capítulo 4. Revisión bibliográfica .....                                 | 7  |
| 4.1    Energía a partir de la Biomasa .....                              | 7  |
| 4.1.1    Clasificación de la biomasa para la generación de energía ..... | 7  |
| 4.1.1.1    Cultivos energéticos .....                                    | 7  |
| 4.1.1.2    Biomasa natural .....   | 7  |
| 4.1.1.3    Biomasa residual .....  | 8  |
| 4.1.2    Biocombustibles.....  | 8  |
| 4.1.3    Biogás.....   | 9  |
| 4.2    Tratamiento anaeróbico de residuos.....                           | 10 |
| 4.2.1    Digestión anaerobia .....                                       | 10 |
| 4.2.1.1    Etapa hidrolítica .....                                       | 11 |
| 4.2.1.2    Acidogénesis.....   | 12 |
| 4.2.1.3    Acetogénesis .....  | 12 |
| 4.2.1.4    Metanogénesis.....  | 12 |
| 4.2.2    Factores ambientales.....                                       | 13 |
| 4.2.2.1    pH y Alcalinidad.....   | 13 |
| 4.2.2.2    Temperatura.....  | 14 |
| 4.2.2.3    Nutrientes.....   | 14 |

---

|             |  |    |
|-------------|--|----|
| 4.2.3       | Digestión anaerobia de residuos sólidos .....                                    | 15 |
| 4.2.4       | Potencial metanogénico .....   | 15 |
| 4.2.5       | Tecnologías Anaerobias disponibles para el tratamiento de residuos solidos ..... | 16 |
| 4.2.5.1     | Sistema por lotes.....   | 16 |
| 4.2.5.2     | Sistemas continuos.....  | 16 |
| 4.2.5.3     | Mezclamiento del biodigestor.....  | 18 |
| 4.2.6       | Almacenamiento del biogás.....   | 19 |
| 4.2.6.1     | Cubiertas flotantes .....  | 19 |
| 4.2.6.2     | Cubiertas fijas.....   | 20 |
| 4.2.6.3     | Gasómetro de doble membrana .....  | 20 |
| 4.2.6.4     | Bolsas de biogás .....   | 21 |
| 4.2.7       | Purificación del biogás (Remoción del sulfuro de hidrógeno) .....                | 21 |
| 4.2.7.1     | Desulfuración biológica .....  | 22 |
| 4.2.7.2     | Precipitación de sulfuros.....   | 23 |
| 4.2.7.3     | Absorción en una solución férrica quelante.....                                  | 23 |
| 4.2.7.4     | Adsorción en compuestos de hierro .....  | 24 |
| 4.2.7.5     | Adsorción en carbón activado.....  | 24 |
| 4.2.7.6     | Enlace químico con zinc .....  | 24 |
| 4.3         | Antecedentes de la industria cervecera.....                                      | 25 |
| 4.3.1       | La industria cervecera en Chile .....  | 25 |
| 4.3.2       | Bagazo cervecero .....   | 25 |
| 4.3.3       | Digestión anaeróbica en el bagazo cervecero .....                                | 27 |
| 4.4         | Evaluación de proyectos .....  | 27 |
| Capítulo 5. | Metodología .....  | 29 |
| 5.1         | Metodología analítica .....  | 30 |
| 5.1.1       | Caracterización del Inóculo.....   | 30 |
| 5.1.1.1     | Determinación de solidos totales.....  | 30 |
| 5.1.1.2     | Determinación de solidos volátiles .....   | 31 |
| 5.1.1.3     | Determinación de los Sólidos Suspendidos Totales (SST) .....                     | 32 |
| 5.1.1.4     | Determinación de los Sólidos Suspendidos Volátiles (SSV) .....                   | 33 |
| 5.1.1.5     | Determinación de AGV.....  | 34 |
| 5.1.1.6     | Determinación de alcalinidad.....  | 36 |

---

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| 5.1.2       | Preparacion del inóculo .....   | 37 |
| 5.1.3       | Caracterización del sustrato.....   | 39 |
| 5.1.3.1     | Determinación de la DQO .....   | 39 |
| 5.1.3.2     | Determinación de Carbono Orgánico.....  | 40 |
| 5.1.3.3     | Determinación de los Sólidos totales (ST).....  | 42 |
| 5.1.3.4     | Determinación de los Sólidos Volátiles (SV).....  | 43 |
| 5.2         | Metodología Experimental .....  | 44 |
| 5.2.1       | Ensayos de potencial metanogénico .....   | 44 |
| 5.2.1       | Medición de la producción de metano .....   | 46 |
| 5.2.2       | Descripción el proceso de producción de cerveza.....  | 48 |
| 5.2.3       | Balances de materia y energía .....   | 48 |
| 5.2.4       | Diseño, estimación y selección de equipos.....  | 48 |
| 5.2.4.1     | Volumen del biodigestor .....   | 49 |
| 5.2.4.2     | Volumen gasómetro.....  | 49 |
| 5.2.5       | Evaluación económica.....   | 49 |
| 5.2.5.1     | Valor Actual Neto VAN .....   | 50 |
| Capitulo 6. | Resultados .....  | 51 |
| 6.1         | Caracterización del inoculo.....  | 51 |
| 6.2         | Caracterización del sustrato.....   | 51 |
| 6.3         | Ensayos de potencial metanogénico .....   | 52 |
| 6.3.1       | Ensayo S/I 0,5.....   | 52 |
| 6.3.2       | Ensayo S/I 1.....   | 53 |
| 6.3.3       | Ensayo S/I 2.....   | 54 |
| 6.4         | Potencial metanogénico del bagazo cervecero .....   | 55 |
| 6.4.1       | Metano acumulado para las distintas relaciones S/I.....                                       | 55 |
| 6.4.2       | Metano acumulado respecto a los sólidos volátiles aportados por el bagazo de<br>cerveza ..... | 56 |
| 6.4.3       | Tiempo de residencia .....  | 57 |
| 6.4.4       | Productividad .....   | 59 |
| 6.4.5       | Potencial metanogénico .....  | 59 |
| 6.5         | Requerimientos energéticos de la Cervecería artesanal modelo .....                            | 60 |
| 6.5.1       | Cervecería artesanal modelo .....   | 60 |

---

|              |  |    |
|--------------|--|----|
| 6.5.2        | Análisis de los procesos unitarios que requieren energía .....     | 62 |
| 6.5.3        | Balance energético.....  | 63 |
| 6.5.4        | Generación de metano en planta de biogás.....                      | 63 |
| 6.5.5        | Energía producida en planta de biogás.....                         | 64 |
| 6.6          | Materia orgánica removida.....                                     | 64 |
| 6.6.1        | DQO removida por método analítico.....                             | 65 |
| 6.6.2        | DQO removida por método teórico.....                               | 65 |
| 6.7          | Diseño y selección de equipos .....                                | 65 |
| 6.7.1        | Acopio y almacenamiento del bagazo .....                           | 66 |
| 6.7.2        | Biodigestor .....  | 66 |
| 6.7.3        | Almacenamiento del biogás en gasómetro de bolsa.....               | 67 |
| 6.7.4        | Purificación del biogás .....                                      | 68 |
| 6.7.5        | Bombeo del biogás.....   | 68 |
| 6.7.6        | Planta de Biogás .....   | 68 |
| 6.8          | Factibilidad económica .....                                       | 69 |
| 6.8.1        | Costos.....  | 69 |
| 6.8.1.1      | Costo de equipos.....  | 69 |
| 6.8.1.2      | Costo de construcción del biodigestor.....                         | 70 |
| 6.8.2        | Flujo de caja .....  | 70 |
| 6.8.2.1      | Depreciación.....  | 71 |
| 6.8.2.2      | VAN.....   | 71 |
| 6.8.3        | Análisis de sensibilidad .....                                     | 72 |
| Capítulo 7.  | Discusiones.....   | 75 |
| 7.1          | Desempeño de las distintas relaciones S/I.....                     | 75 |
| 7.2          | Potencial metanogénico del bagazo cervecero .....                  | 76 |
| 7.3          | Aporte de biogás al proceso productivo de la microcervecería ..... | 76 |
| 7.4          | Diseño de la planta de biogás .....                                | 76 |
| 7.5          | Factibilidad económica .....                                       | 77 |
| Capítulo 8.  | Conclusiones.....  | 78 |
| Capítulo 9.  | Bibliografía .....   | 79 |
| Capítulo 10. | Anexos.....  | 82 |

---

|   |    |
|---|----|
| ANEXO 1 “Elaboración de los ensayos de potencial metanogénico” .....          | 82 |
| ANEXO 2 “Mediciones diarias de metano” .....                                  | 83 |
| ANEXO 3 “Mediciones de Ph y datos para el cálculo de AGV y alcalinidad” ..... | 87 |
| ANEXO 4 “Determinación de la DQO removida” .....                              | 88 |
| ANEXO 5 “Cotización Veniceton” .....  | 89 |
| ANEXO 6 “Flujos de caja” .....  | 91 |

## Índice de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1 Principales Biocombustibles. Adaptado de MARICA, 2009 .....                                       | 8  |
| Figura 2 Esquema del proceso de digestión anaerobia (Adaptado de Batstone et al, 2002)<br>.....            | 11 |
| Figura 3 Esquema de un biodigestor vertical .....  | 17 |
| Figura 4 Sistema de agitación neumática en digestor. Vista lateral y de planta. ....                       | 19 |
| Figura 5 Cubiertas flotantes para la recogida del biogás. (Metcalf y Eddy, 1996). ....                     | 20 |
| Figura 6 Cubiertas fijas para la recogida del biogás (Metcalf y Eddy, 1996). ....                          | 20 |
| Figura 7 Alternativas de utilización del biogás y sus requerimientos de purificación (Varnero, 2011) ..... | 21 |
| Figura 8 Diagrama del proceso obtención de bagazo de cerveza, adaptado de Mussatto et al, 2006.....        | 26 |
| Figura 9 Actividades realizadas en el estudio de potencial metanogénico del bagazo cervecero.....          | 29 |
| Figura 10 Ensayos de potencial metanogénico para el bagazo cervecero. ....                                 | 46 |
| Figura 11 Esquema del método de medición de metano por desplazamiento de líquido                           | 47 |
| Figura 12 Medición diaria del volumen de metano generado en los ensayos S/I 0,5.....                       | 53 |
| Figura 13 Medición diaria del volumen de metano generado en los ensayos S/I 1 .....                        | 54 |
| Figura 14 Medición diaria del volumen de metano generado en los ensayos S/I 2 .....                        | 55 |
| Figura 15 Volumen de metano acumulado para los ensayos de relaciones S/I 0,5, 1 y 2.<br>.....              | 56 |

---

|  |    |
|--|----|
| Figura 16 Volumen acumulado de metano por gramo de solido volátil aportado por el bagazo cervecero. ....   | 57 |
| Figura 17 Producción diaria de metano respecto al total acumulado (Ensayos de relaciones S/I 0,5, 1 y 2) .....   | 58 |
| Figura 18 Producción acumulada de metano en los tiempos de residencia establecidos   | 59 |
| Figura 19 Potencial metanogénico determinado para los ensayos de relaciones S/I 0,5, 1 y 2. ....   | 60 |
| Figura 20 Esquema de planta de la cervecería artesanal modelo .....  | 61 |
| Figura 21 Sistema de biogás a implementar en la cervecería artesanal modelo, vista planta. ....  | 69 |
| Figura 22 Comportamiento del VAN ante cambios operacionales (%ST Y %DQO removida), donde se representa la diferencia entre el VAN del proyecto y el VAN actual sin proyecto..... | 73 |
| Figura 23 Cotización VENICETON para sistema de biogás. ....  | 90 |

## Índice de tablas

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1 Gases generados a partir de diversos compuestos orgánicos en condiciones totalmente anaeróbicas y respectiva composición en metano (adaptado de Castells, 2012) ..... | 10 |
| Tabla 2 Concentración de macronutrientes del medio de cultivo para la medición de la actividad metanogénica (Field et al, 1988).....  | 37 |
| Tabla 3 Concentración de micronutrientes del medio de cultivo para la medición de la actividad metanogénica (Field et al, 1988).....  | 38 |
| Tabla 4 Composición de los ensayos de potencial metanogénico.....   | 45 |
| Tabla 5 Parámetros físicos del lodo anaerobio .....   | 51 |
| Tabla 6 Características físicas y químicas del bagazo cervecero .....   | 51 |
| Tabla 7 Gasto energético diario y mensual en la cervecería artesanal modelo .....   | 63 |
| Tabla 8 Bagazo producido mensualmente en la cervecería artesanal modelo .....   | 63 |
| Tabla 9 Valores de DQO obtenidos a partir de la determinación del porcentaje de Carbono orgánico.....   | 65 |
| Tabla 10 Valores de DQO removida teórica en la formación de metano .....  | 65 |
| Tabla 11 Composición del biogás producido a partir de bagazo cervecero.....   | 67 |

---

|  |    |
|--|----|
| Tabla 12 Costo de equipos para la planta de biogás .....   | 70 |
| Tabla 13 Vida útil, Valor residual y depreciación anual para componentes de la planta de biogás.....   | 71 |
| Tabla 14 Comparación VAN con y sin planta de biogás.....   | 71 |
| Tabla 15 VAN del proyecto de biogás respecto a distintos escenarios de condiciones de operación para el biodigestor a utilizar en la cervecería artesanal .....              | 73 |
| Tabla 16 Porcentaje de variación del VAN del proyecto en los posibles escenarios respecto al valor del VAN de la propuesta de proyecto original. %ST v/s %DQO removida ..... | 74 |
| Tabla 17 Componentes de los Ensayos de potencial metanogénico.....   | 82 |
| Tabla 18 Mediciones diarias de metano.....   | 83 |
| Tabla 19 Mediciones de pH y datos para el cálculo de AGV y alcalinidad final .....   | 87 |
| Tabla 20 Datos para el cálculo de la DQO removida. Método analítico.....   | 88 |
| Tabla 21 Flujo de caja para la implementación del sistema de biogás en la cervecería artesanal.....  | 91 |
| Tabla 22 Flujo de caja para la situación energética actual de la cervecería artesanal modelo. ....   | 92 |

## **CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN**

### **1.1 Nuevas fuentes de energía**

En la actualidad la mayor parte de la energía utilizada en el planeta para los distintos fines, proviene de recursos energéticos de origen fósil. El aumento de las demandas de energía y el descenso de las reservas del planeta de este tipo de recursos energéticos, sumado a la necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero para desacelerar el fenómeno de calentamiento global, nos llevará obligadamente a la sustitución de estas fuentes. La solución para enfrentar esta situación, sin duda está en la innovación tecnológica y la implementación de sistemas que trabajen con energías alternativas y no contaminantes (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2011). Las Energías renovables se pueden clasificar en dos categorías, convencionales y no convencionales. Dentro de las primeras, la más difundida es la energía hidráulica a gran escala, mientras que en las no convencionales (ERNC) se consideran la energía eólica, solar, geotérmica, mareomotriz y la derivada de la biomasa, ya sea a partir de su incineración directa o a través de la producción de biogás (Chamy & Vivanco, 2007). Además de su gran potencial para mitigar el cambio climático, las energías renovables pueden aportar otros beneficios. Si se utilizan de forma adecuada, las energías renovables pueden contribuir al desarrollo social y económico, favorecer el acceso a la energía y la seguridad del suministro de energía, y reducir sus efectos negativos sobre el medio ambiente y la salud (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2011)

### **1.2 Revalorización de residuos como recursos energéticos**

En la actualidad el alto desarrollo de la industria conlleva a un aumento en la generación de residuos, para lo cual se hace necesario el perfeccionamiento y la implementación de nuevas técnicas o métodos para el aprovechamiento y revalorización de éstos. (Yepes, Montoya, & Orozco, 2008).

Hoy en día, existe una gran presión política y social para reducir la contaminación procedente de las actividades industriales. Gran parte de los países desarrollados y subdesarrollados han tratado de adaptarse a esta realidad, mediante la modificación y

creación de normas que puedan regular la industria y sus procesos productivos, considerando el tratamiento de los residuos generados y la reutilización de estos como un aspecto principal. En consecuencia, la mayoría de las grandes empresas presentes ya no consideran residuos como desechos, sino como una materia prima para otros procesos. (Comisión Nacional de Energía , 2007)

Respecto a los residuos en general, es recurrente utilizar en forma indistinta los términos: subproductos, residuos y desechos, sin importar que existe una diferencia conceptual entre ellos. Según Bohórquez (2012), las diferencias serían las siguientes: un “subproducto” es un producto secundario, bien conocido, generalmente útil, comercializable y por lo tanto con valor agregado, que resulta de un proceso industrial. El término “residuos”, se aplica a aquellos que pueden tener o no un valor comercial, porque son poco comunes o porque se generan en bajas cantidades, sin embargo, algunos de sus constituyentes aún en baja proporción, le pueden conferir algún interés para su utilización.

Un sector que genera importantes cantidades de residuos es la agroindustria. Las características que estos tienen son muy variadas, dependen de la materia prima y del proceso que los generó, no obstante, comparten una característica principal que es el contenido de materia orgánica, constituida por diferentes porcentajes de celulosa, lignina, hemicelulosa y pectina. Por ser la materia orgánica su principal componente, en la práctica se les denomina “residuos orgánicos”. (Bohórquez, 2012).

La digestión anaeróbica como alternativa para el tratamiento de residuos orgánicos puede contribuir a la agroindustria en general en algunos factores importantes, como el mejoramiento de las condiciones sanitarias mediante el control de la contaminación, la generación de biogás para dar valor energético y económico a los residuos, y la generación de un efluente estabilizado, que finalmente puede llegar a ser utilizado como biofertilizante en cultivos. (Varnero, 2011). Es decir, la digestión anaeróbica como método de tratamiento de residuos orgánicos, por un lado, permite disminuir la cantidad de materia orgánica contaminante, y por otro, producir energía en a partir de la generación de biogás (Chamy & Vivanco, 2007).

### **1.3 Industria cervecera**

La industria cervecera en Chile ha tenido un cambio importante en los últimos años, ya que además de presentar un incremento en la producción anual, también ha aumentado la

participación de las microcerveceras en su matriz productiva. La producción de estas compañías rondó el 1% de la producción total de cerveza en Chile, y equivale a cerca de 6,8 millones de litros anuales (ACECHI, 2016).

### 1.3.1 Bagazo cervecero como fuente de energía

El principal residuo asociado a la producción de cerveza es el bagazo cervecero, este se obtiene luego de los procesos de prensado y filtrado del mosto obtenido tras la maceración del grano de cereal malteado. Este residuo es el mayor subproducto de la industria cervecera, con un volumen de producción aproximado de un 85% en relación al total de los residuos generados. (Musatto et al., 2004).

Conforme a su composición, este desecho tiene un importante valor nutritivo y por ello, tradicionalmente se le considera como un subproducto del proceso, siendo vendido como alimento para animales. Sin embargo, la disposición de este residuo cervecero depende directamente de la zona geográfica en que éste material se genere. Así en territorios donde la actividad ganadera sea reducida, el orujo de cebada (bagazo cervecero) se transforma en un residuo contaminante (Chamy et al., 2003).

Conforme a su composición, el bagazo cervecero puede ser considerado como biomasa para la generación de energía. La combustión como alternativa para utilizar este residuo como sustrato energético presenta ciertos inconvenientes; es necesario realizar un drenaje previo para reducir su humedad, y además durante el proceso de combustión surgen emisiones de NO<sub>x</sub> y partículas de polvo (Musatto et al., 2004).

En tanto, de acuerdo a las características fisicoquímicas del bagazo cervecero, una posible alternativa para el tratamiento de este residuo, es la digestión anaeróbica (Bochmann et al., 2015), que permite degradar los componentes orgánicos del bagazo cervecero, generando principalmente metano, el cual puede utilizarse para suministro energético en los procesos productivos de las cerveceras (Musatto et al., 2004).

### 1.3.2 Cervecería artesanal modelo

Las plantas de las cervecerías artesanales o microcervecías, normalmente son pequeñas, y producen volúmenes mensuales en el orden de los 1000 a los 10000 litros de cerveza. El proceso productivo de la cerveza implica un gasto energético, que corresponde básicamente a la energía calórica necesaria, la cual es abastecida generalmente mediante la combustión de gas licuado.

Las cervecerías artesanales se han visto sometidas a una presión económica en los últimos años, ya que han aumentado los costos tanto de la energía, como de los productos primarios y de la gestión de sus residuos. Por lo tanto las medidas de ahorro energético se han transformado en una prioridad para la mayoría de cervecerías (Musatto et al., 2004)

## CAPITULO 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los tratamientos de residuos como la digestión anaerobia son aplicables dependiendo de la biodegradabilidad del sustrato orgánico a tratar, la cual está dada principalmente por las propiedades fisicoquímicas de la materia prima o residuo.

Existe una cervecería artesanal modelo que desea evaluar la posibilidad de aprovechar el bagazo cervecero en su matriz energética, con el fin de conseguir una ventaja económica respecto al ahorro en el consumo de gas licuado.

Sin embargo, para considerar la digestión anaerobia como una posible alternativa para tratar el bagazo cervecero en la cervecería artesanal modelo, se debe determinar el potencial que este posee como sustrato para la producción de biogás. Y además, se debe evaluar si el proyecto es técnicamente compatible y económicamente rentable para la microcervecería modelo, mediante el desarrollo de una pre-factibilidad técnico-económica.

## **CAPITULO 3. OBJETIVOS**

### **3.1 Objetivo General**

Evaluar la digestión anaeróbica como alternativa de revalorización energética del bagazo cervecero, para suplir las necesidades energéticas de una cervecería artesanal modelo.

### **3.2 Objetivos Específicos**

1. Determinar el potencial metanogénico del bagazo cervecero.
2. Determinar los requerimientos energéticos de la cervecería artesanal modelo.
3. Desarrollar una pre-factibilidad técnico-económica de la implementación del tratamiento anaeróbico en la cervecería tradicional modelo.

## CAPITULO 4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

### 4.1 Energía a partir de la Biomasa

La biomasa se define como la materia orgánica que se genera, directa o indirectamente, mediante los mecanismos de fijación de la energía de la radiación solar (Menéndez, 2001). Al utilizar combustibles derivados de biomasa existe una emisión de CO<sub>2</sub> neutra. Esto quiere decir que se emite la misma cantidad de CO<sub>2</sub> que la materia vegetal absorbe durante su crecimiento mediante la fotosíntesis. Por ello al utilizar el biogás como alternativa energética, el CO<sub>2</sub> que se produce y es emitido, forma parte de un flujo de circulación natural entre la atmósfera y la vegetación por lo que se mantienen estables las emisiones de este gas de efecto invernadero (GEI), y si este biogás es utilizado como sustituyente de un combustible fósil se contribuye a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> (CNE y GTZ, 2007). Actualmente, en Chile, la biomasa proveniente de los residuos de procesos industriales se utiliza principalmente para producir electricidad mediante plantas de Cogeneración eléctrica (Bustos, 2008).

#### 4.1.1 Clasificación de la biomasa para la generación de energía

Los diferentes tipos de biomasa se clasifican en: cultivos energéticos, biomasa natural y Biomasa residual.

##### 4.1.1.1 Cultivos energéticos

Se refiere a cultivos realizados con el objetivo de producir biomasa transformable en biocombustible (Seoáñez, 2001).

Los cultivos energéticos para generar biomasa ya son una realidad en varios países como Brasil y Estados Unidos, los cuales producen etanol a partir de cultivos de caña de azúcar y de maíz, respectivamente (Figueroa & Marino, 2004).

##### 4.1.1.2 Biomasa natural

Este tipo de biomasa se encuentra en la naturaleza sin ningún tipo de intervención humana. Como ejemplo de este tipo de biomasa se puede mencionar los desechos naturales de un bosque (Comisión Nacional de Energía, 2007). Sin embargo, en un principio, no es la más recomendada para su aprovechamiento energético, debido a que los ecosistemas naturales podrían sufrir una degradación (Figueroa & Marino, 2004).

### 4.1.1.3 Biomasa residual

La biomasa residual es la que proviene como desecho de las diferentes actividades, ya sea de la actividad agrícola, forestal o ganadera. También son parte de esta categoría los subproductos de la industria agroalimentaria y de la generación y tratamiento de residuos generados por la población (Figueruelo & Marino, 2004).

## 4.1.2 Biocombustibles

Un biocombustible se define como un combustible sólido, líquido o gaseoso, derivado de la biomasa (Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 2007). Los distintos tipos de combustibles se presentan en el esquema de la Figura 1.

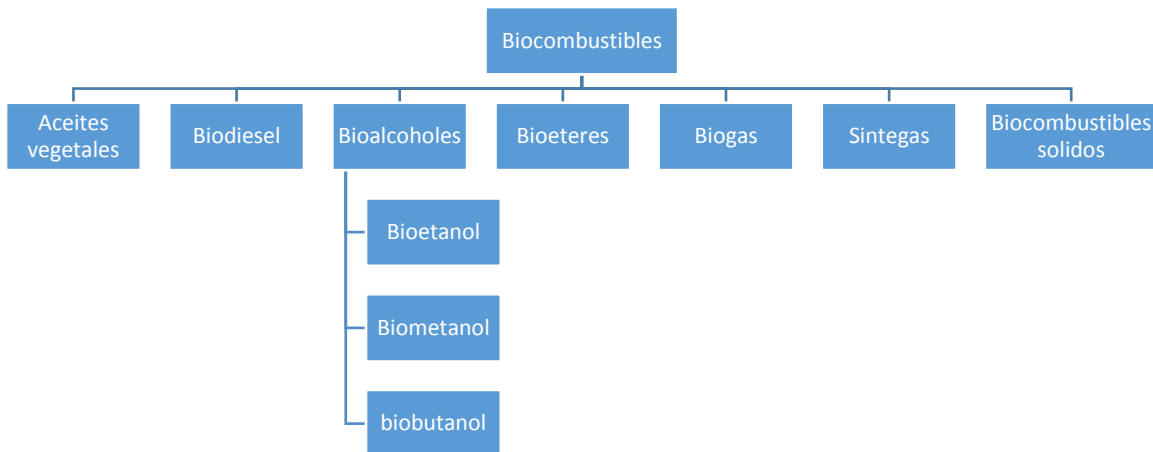


Figura 1 Principales Biocombustibles. Adaptado de MARICA, 2009

Según MARICA (2009), los biocombustibles pueden ser clasificados en biocombustibles de primera, segunda y tercera generación.

Los biocombustibles de primera generación son los que provienen de la biomasa, especialmente de cultivos alimenticios, y que se procesan por medios convencionales (MARICA, 2009). Por ejemplo el bioetanol, que se obtiene de la caña de azúcar o la remolacha.

Por otra parte, los biocombustibles de segunda generación son aquellos que son producidos a partir de materias primas que no son fuentes alimenticias, y para los cuales se utilizan tecnologías de producción que todavía están en etapas de investigación y desarrollo y con costos de producción elevados (MARICA, 2009).

Por último los biocombustibles de tercera generación son aquellos que provienen de cultivos específicos, como en el caso de los biocombustibles generados con microalgas (MARICA, 2009).

### 4.1.3 Biogás

El biogás es un tipo de biocombustible gaseoso de primera generación, que se obtiene a través de la descomposición de la materia orgánica en condiciones anaeróbicas. Los principales componentes del biogás son el metano, que regularmente se encuentra en un rango de concentración de un 55 a un 65% y el anhídrido carbónico que oscila entre un 35 y un 45%. El resto del biogás se compone en proporciones mucho menores de gases como el nitrógeno (0-3%), hidrógeno (0-1%), oxígeno (0-1%) y sulfuro de hidrógeno (trazas) (Montes, 2008).

El poder calorífico del biogás está determinado por la concentración de metano presente en este, pudiéndose aumentar eliminando todo o parte de los otros gases presentes. El poder calorífico inferior del metano según ICYTAL es de 8006,9 kcal/m<sup>3</sup>.

Previo al protocolo de Kyoto no existía un control sobre este gas, por el contrario, este se disipaba en la atmosfera, lo cual es una contribución al fenómeno de calentamiento global, puesto que los dos componentes mayoritarios en el biogás son considerados gases de efecto invernadero, y en especial el metano, ya que tiene un efecto 20 veces más nocivo que el CO<sub>2</sub> (MARICA, 2009). Hoy la realidad es distinta y el uso del biogás como biocombustible ha aumentado significativamente, ya sea utilizándose directamente su energía calórica en equipos compatibles como calderas o quemadores, o utilizando energía eléctrica generada a partir de su combustión en plantas de cogeneración de energía (MARICA, 2009).

Por otra parte, el digestato que se obtiene luego de la digestión anaerobia de la materia orgánica, puede ser utilizado como fertilizante, en sustitución o complemento de los fertilizantes químicos que se utilizan en la industria agraria.

El proceso de la digestión anaeróbica es muy complejo, debido tanto por el número de reacciones bioquímicas que tienen lugar como por la cantidad de microorganismos involucrados en ellas.

Tanto el volumen de biogás generado mediante la digestión anaeróbica de la materia orgánica, como su composición, dependerán de las características fisicoquímicas de la materia prima o sustrato al que se aplica este tratamiento (Castells, 2012).

Según Castells (2012), si se conoce la composición química de los materiales que se disponen para la fermentación se puede calcular teóricamente la cantidad de gas generado, además de la cantidad de componentes que este presenta. En la tabla 1 se muestra como varía la proporción de componentes (CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>) presentes en el biogás generado, de acuerdo al compuesto orgánico que se disponga como sustrato.

*Tabla 1 Gases generados a partir de diversos compuestos orgánicos en condiciones totalmente anaeróbicas y respectiva composición en metano (adaptado de Castells, 2012)*

| Compuesto Orgánico  | Composición (% Peso) |                 | Rendimiento volumétrico por masa de Residuo (m <sup>3</sup> <sub>gas</sub> /kg <sub>materia seca</sub> ) |                 |
|---------------------|----------------------|-----------------|--|-----------------|
|                     | CO <sub>2</sub>      | CH <sub>4</sub> | Biogás   | CH <sub>4</sub> |
| Hidratos de Carbono | 73                   | 27              | 0,75   | 0,37            |
| Lípidos             | 52                   | 48              | 1,44   | 1,04            |
| Proteínas           | 73                   | 27              | 0,98   | 0,49            |

## 4.2 Tratamiento anaeróbico de residuos

### 4.2.1 Digestión anaerobia

Varnero (2011) indica que la digestión anaeróbica es un proceso biológico complejo, que consiste en la descomposición de materia orgánica llevada a cabo por diferentes poblaciones bacterianas, en ausencia de oxígeno, y que tiene como resultado dos productos principales: biogás (compuesto mayoritariamente por metano) y el lodo estabilizado (digestato).

Mediante la digestión anaeróbica es posible convertir gran cantidad de residuos vegetales, estiércoles, efluentes de la industria alimentaria y fermentativa, de la industria papelera y de algunas industrias químicas, en subproductos útiles. Esta tecnología es utilizada para el

tratamiento de residuos orgánicos mediante el uso de reactores cerrados donde se controlan los parámetros para favorecer el proceso de fermentación anaeróbica (Varnero, 2011).

La digestión anaerobia de la materia orgánica está constituida por cuatro etapas (Varnero, 2011), tal como se representa en el proceso que se muestra en la figura 2.

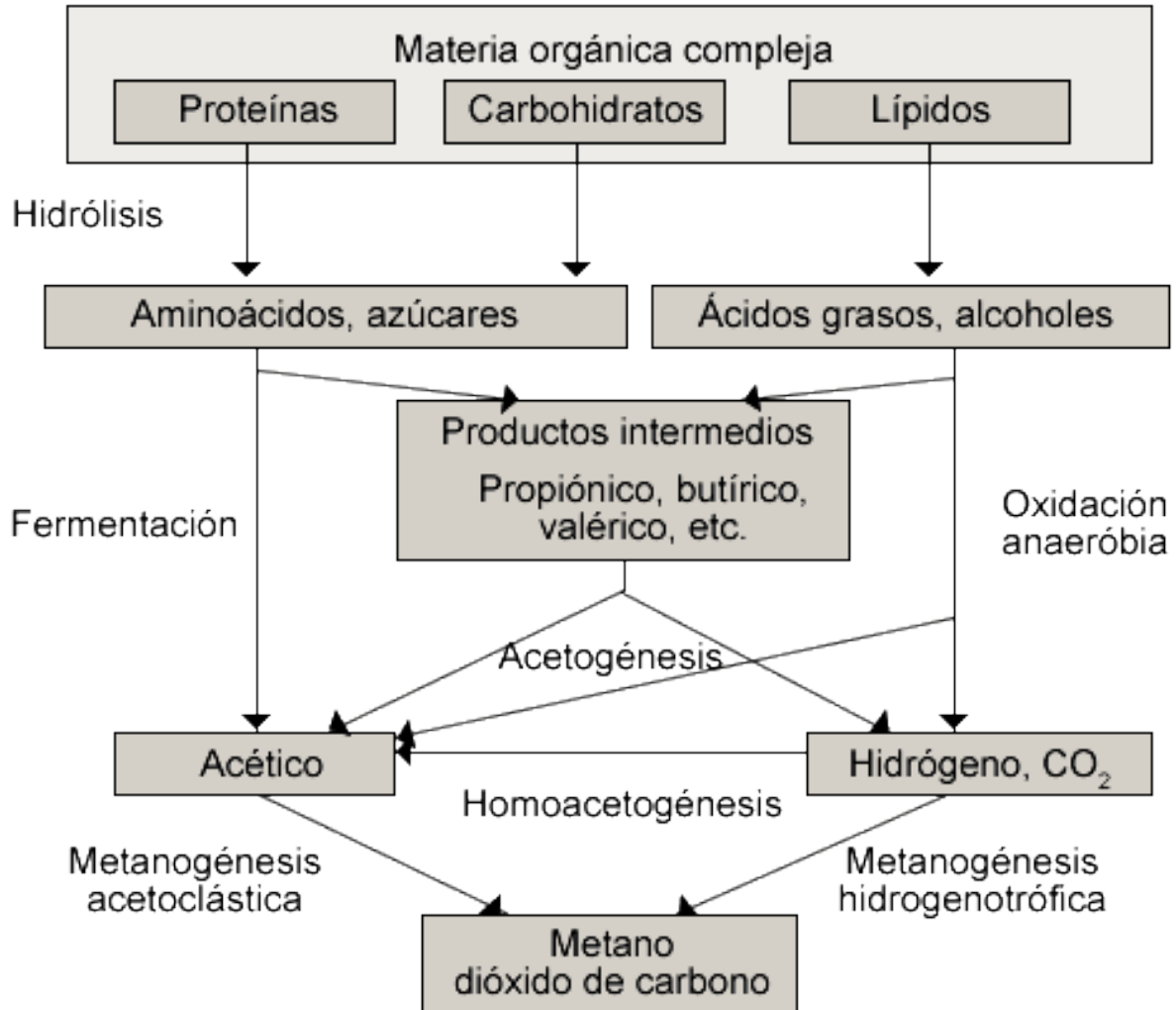


Figura 2 Esquema del proceso de digestión anaerobia (Adaptado de Batstone et al, 2002)

#### 4.2.1.1 Etapa hidrolítica

Los compuestos orgánicos complejos, como los lípidos, proteínas e hidratos de carbono, son despolimerizados, por acción de enzimas hidrolíticas, en moléculas solubles y

fácilmente degradables, como azúcares, ácidos grasos de cadena larga, aminoácidos, alcoholes, etc. Se trata de un proceso enzimático extracelular, y las bacterias responsables de su generación son las bacterias hidrolítico-acidogénicas (Vigueras, 2002).

### 4.2.1.2 Acidogénesis

En esta etapa las bacterias fermentan los productos solubles, generados en la etapa hidrolítica, en precursores de la metanogénesis como  $H_2$ ,  $CO_2$ , acetato y ácidos grasos volátiles (AGV). También se forman productos intermedios como propionato, butirato, etanol, etc. En la reducción del piruvato en altas concentraciones de  $H_2$  (Spinosa & Vesilind, 2001).

La acidogénesis es llevada a cabo por bacterias facultativas y anaerobias estrictas, a este grupo se les conoce como bacterias “formadoras de ácidos”. En este grupo se encuentran microorganismos de los tipos *Clostridium spp*, *Peptococcus anaerobus*, *Bifidobacterium spp*, *Desulphovibrio spp*, *Corynebacterium spp*, *Lactobacillus*, *Actinomyces*, *Staphilococcus* y *Escherichia coli* (Vigueras, 2002).

### 4.2.1.3 Acetogénesis

Los organismos que participan en esta etapa se ven favorecidos por un medio ambiente ácido. Estos utilizan los productos de la etapa anterior para producir acetato,  $CO_2$  e  $H_2$  (Espinoza, 1983).

Las bacterias acetogénicas aseguran la ausencia de oxígeno en el digestor. Son las encargadas de proveer a las metanogénicas de los nutrientes básicos, y la acción de sus enzimas sobre los aminoácidos libera sales de amonio que son la única fuente de nitrógeno que las metanogénicas pueden aceptar (Espinoza, 1983).

Estos microorganismos requieren una baja presión parcial de hidrógeno en orden de conservar la energía para el crecimiento. Por lo tanto, deben crecer en sintrofia con microorganismos consumidores de hidrógeno, como las bacterias metanogénicas (Lens et al, 2005).

El pH aumenta de 5,0 a aproximadamente 6,8 durante etapa (Vigueras, 2002).

### 4.2.1.4 Metanogénesis

Corresponde a la última etapa de la digestión anaerobia, y en la cual se utilizan como sustrato los productos de las etapas anteriores, produciendo grandes volúmenes de gas con entre un 65 a 70% de  $CH_4$  y alrededor de un 30% de  $CO_2$ , entre otros gases (Vigueras, 2002).

Aproximadamente un 2/3 de la producción de metano es consecuencia del consumo de acetato, mientras que el resto es obtenido por la utilización de hidrógeno y dióxido de carbono. Esta segunda vía de producción de metano es esencial para todo el proceso de digestión, debido a que es la responsable de remover el hidrógeno y mantener la presión parcial de hidrógeno baja, requerida para la producción de acetato (Spinosa & Vesilind, 2001).

Las bacterias metanogénicas pertenecen al grupo Archaea y son anaerobias estrictas (Lens et al., 2005). La presencia de oxígeno molecular es tóxico para estos organismos, e incluso, la presencia de fuentes inorgánicas de oxígeno como los nitratos pueden inhibir su crecimiento (Spinosa & Vesilind, 2001).

En esta etapa se han identificado los géneros de microorganismos bacilos (*Methanobacterium* y *Methanobacillus*) y cocos (*Methanococcus* y *Methanosarcinas*) (Metcalf & Eddy, 1996).

Durante esta etapa el valor del pH tiende nuevamente a la neutralidad, aumentando desde 6,8 a 7,4 (Vigueras, 2002).

### 4.2.2 Factores ambientales

#### 4.2.2.1 pH y Alcalinidad

El proceso anaeróbico es afectado adversamente con pequeños cambios en los niveles de pH. Los microorganismos metanogénicos son más susceptibles a las variaciones de pH que los otros microorganismos de la comunidad microbiana anaeróbica. Los diferentes grupos bacterianos presentes en el proceso de digestión anaeróbica presentan unos niveles de actividad óptimos en torno a la neutralidad. El óptimo es entre 5,5 y 6,5 para acidogénicos y entre 7,8 y 8,2 para metanogénicos. Es por esto, que para que el proceso se desarrolle satisfactoriamente, el pH del sistema no debe bajar de 6,0 ni subir de 8,0 (Varnero, 2011). Por otro lado, el pH no solo incide en la eficiencia de producción de biogás, ya que también determina la composición de este. Si el sistema presenta pH menor a 6,0, el biogás generado será muy pobre en metano (Varnero, 2011).

En los procesos anaeróbicos, la caída del pH es causada frecuentemente por la acumulación de ácidos grasos volátiles (AGV) y/o por la excesiva acumulación de dióxido de carbono. Es por esto que cuando la capacidad metanogénica del sistema está continuamente sobrecargada y no se adiciona un buffer que neutralice los AGV presentes,

el sistema se convertirá en un reactor de acidificación inhibiendo completamente la actividad metanogénica (Varnero, 2011).

La alcalinidad corresponde a la concentración de sales y se expresa en unidades de concentración de carbonato de calcio ( $\text{CaCO}_3$ ), aunque a ella contribuyan también los acetatos, bicarbonatos y formiatos, de calcio, amonio y otros (Montalvo & Guerrero, 2003). La alcalinidad es un aspecto importante a tener en consideración en un sistema de digestión anaerobia, ya que corresponde a la capacidad tampón del medio, controla el equilibrio químico en un rango de pH entre 6 y 8 y permite asegurar las mayores tasas de producción de metano (Lens et al., 2005).

### **4.2.2.2 Temperatura**

Existen tres rangos de temperatura en los que pueden trabajar los microorganismos anaeróbicos y de acuerdo a esto se clasifican en: psicrófilos (por debajo de  $25^\circ\text{C}$ ), mesófilos (entre  $25$  y  $45^\circ\text{C}$ ) y termófilos (entre  $45$  y  $65^\circ\text{C}$ ) (Varnero, 2011).

La digestión anaerobia de residuos sólidos puede llevarse a cabo entre  $5$  y  $55^\circ\text{C}$ . Se sabe que en el rango mesofílico se tiene una mayor velocidad específica de crecimiento celular, y la mayor productividad del metano se encuentra en el rango termofílico, sin embargo los sistemas anaeróbicos de este tipo no son tan comunes debido a los altos requerimientos energéticos necesarios para mantener el sistema a estas temperaturas (Chamy & Vivanco, 2007). De todas formas, en ciertos casos es conveniente llevar a cabo un sistema anaeróbico termofílico debido a que al operar con mayor temperatura se reduce el tiempo de residencia hidráulico en el reactor (Chamy & Vivanco, 2007).

### **4.2.2.3 Nutrientes**

Los nutrientes esenciales como son el nitrógeno, fósforo y azufre, deben estar presentes en suficientes cantidades para asegurar la actividad de las poblaciones bacterianas. En muchos casos estos elementos deben ser suministrados adicionalmente al sistema. En cuanto a los elementos traza el problema se soluciona generalmente agregando pequeñas cantidades de estiércol o agregando una solución de micronutrientes al sistema. Sin embargo, una de las ventajas inherentes al proceso de digestión anaerobia es la baja necesidad de nutrientes, debido a la pequeña velocidad de crecimiento celular existente (Lettinga et al., 1987).

### 4.2.3 Digestión anaerobia de residuos sólidos

El proceso de digestión anaerobia involucra distintas reacciones que son llevadas a cabo por diferentes poblaciones de bacterias.

Los principales parámetros a considerar para el tratamiento anaerobio de residuos sólidos son (Poirrier, 1998):

- Concentración de sólidos totales
- Temperatura
- Razón carbono/nitrógeno del sustrato (determina la concentración de metano en el biogás producido)
- Configuración del reactor (requerimientos de mezclado, tiempo de residencia)
- Pretratamiento de los residuos sólidos.

### 4.2.4 Potencial metanogénico

Los ensayos de potencial metanogénico, representan el procedimiento convencional para estimar el volumen de metano que es posible generar por unidad de masa de sólidos volátiles de un sustrato y esta es reportada como  $L\ CH_4/gSV$ . De esta forma, a partir de cantidades conocidas de biomasa (sólidos volátiles totales, SVT), bajo condiciones establecidas, se puede evaluar la producción de  $CH_4$  a lo largo de un periodo de tiempo. Algunos métodos utilizados para la medición de la producción de  $CH_4$  son desplazamiento de líquido, cromatografía gaseosa y respirometría (Torres & Perez, 2010).

Existen factores que inciden en el rendimiento de los ensayos de potencial metanogénico, y uno de los más significativos es la razón inicial entre el sustrato y el inóculo (razón S/I) que se utiliza en la mezcla dispuesta en un reactor anaeróbico. Esto debido a los fenómenos de inhibición que se pueden generar con el exceso o déficit de materia orgánica en el reactor con respecto a los microorganismos presentes. El comportamiento en la producción de metano de un ensayo está netamente relacionado con la razón S/I empleada, por lo que se debe determinar empíricamente el rendimiento para cada razón S/I (Lesteur, 2010).

Se recomienda definir para cada sustrato e inóculo la proporción que garantice la mayor producción de metano, sin embargo, existen estudios realizados que apuntan a que la cantidad de metano producida aumenta a medida que disminuye la razón S/I (Raposo, 2006).

## 4.2.5 Tecnologías Anaerobias disponibles para el tratamiento de residuos solidos

La variable más decisiva al momento de seleccionar la alternativa de tratamiento es el contenido de solidos totales de los residuos. Desde este punto de vista se pueden clasificar los sistemas de tratamiento de la siguiente manera (Poirrier, 1998):

- Tecnología para residuos diluidos (Máximo 2% de solidos totales).
- Tecnología para residuos de concentración media (2-12% solidos totales).
- Tecnología para residuos semisólidos (Sobre 12% solidos totales).

Según Rodríguez (2012), un digestor anaeróbico o biodigestor es en su forma más simple un contenedor dentro del cual se transforma la materia orgánica mediante el proceso de fermentación anaeróbica para la producción de biogás.

Existen diversos diseños como tipos de biodigestores. Así como, desde el punto de vista operacional, los reactores anaerobios de residuos sólidos pueden clasificarse en digestores por lote o continuos (Poirrier, 1998).

### 4.2.5.1 Sistema por lotes

Consiste básicamente en un depósito impermeable a líquidos y gases, térmicamente aislado, provisto de un acceso para carga y descarga de materiales y una salida de biogás. Este modelo es adecuado cuando la disponibilidad de residuos es esporádica. Su funcionamiento es muy simple; el residuo fresco es introducido en el digestor junto con el inóculo, y luego este se cierra. Aquí se inicia una corta fermentación aerobia hasta consumir el oxígeno presente en el reactor y luego se inicia la producción de biogás, que tiene una duración de 20 a 40 días. Cuando éste termina se abre y descarga el digestor. El gas generado se recoge en una campana flotante situada sobre el mismo digestor o en un deposito aparte (Chamy et al., 2003).

### 4.2.5.2 Sistemas continuos

En estos digestores anaerobios la alimentación es por regla semicontinua, con pequeñas cargas periódicas. De esta manera la producción y composición de biogás y de los lodos son prácticamente constantes (Chamy et al., 2003).

Los diseños básicos para estos sistemas son los biodigestores de mezclamiento vertical y los biodigestores de desplazamiento horizontal.

#### a.- Reactores de mezclamiento vertical

Consisten en un depósito cilíndrico de eje vertical, en el cual el desecho se introduce por el medio y los lodos se descargan por fondo producto del desplazamiento como se presenta en la figura 3. Mediante este digestor se mejora la velocidad y eficacia del proceso de conversión, por lo que se reduce el tamaño de la instalación y los costos de inversión. Al igual que en el sistema por lotes es posible implementar un sistema de mezclamiento. Este tipo de reactor representa una buena alternativa considerando su simple construcción y operación, y su alta eficiencia de conversión (Chamy et al., 2003).

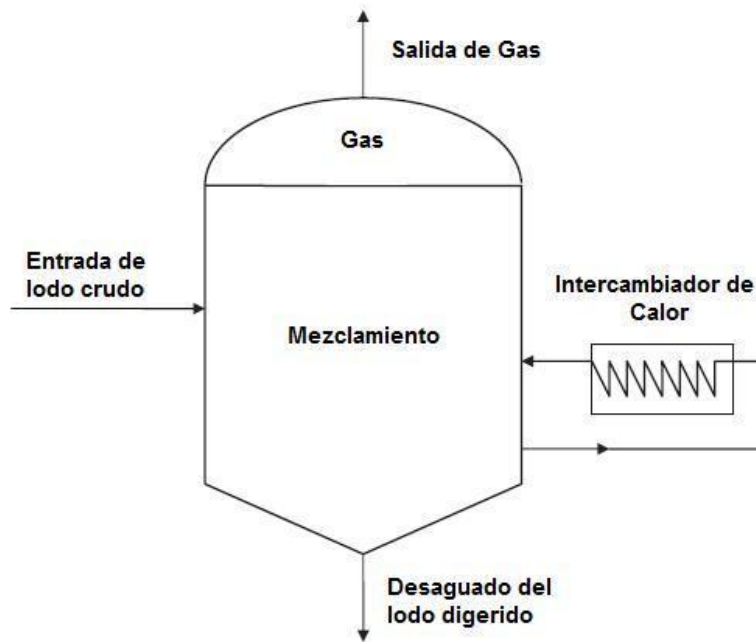


Figura 3 Esquema de un biodigestor vertical

#### b.- Reactores de desplazamiento horizontal

Consisten en un depósito cilíndrico alargado, en posición horizontal apoyado directamente sobre el suelo o sobre una estructura metálica que lo soporta. El residuo es alimentado por un extremo y se transporta gradualmente hasta el extremo opuesto atravesando una zona central donde la fermentación ocurre a una velocidad máxima. Ocasionalmente lleva un agitador múltiple de eje paralelo al del cilindro para facilitar el avance del material sólido (Chamy et al., 2003).

### 4.2.5.3 Mezclamiento del biodigestor

El mezclamiento de un biodigestor incide en una serie de factores que determinan la eficiencia de la degradación de la materia orgánica dentro de este. Entre los cuales se pueden destacar la remoción de los metabolitos producidos por las bacterias metanogénicas, el mezclado del sustrato fresco con la población bacteriana, evitar la formación de costra que se forma dentro del digestor, uniformar la densidad bacteriana y evitar la formación de espacios “muertos” sin actividad biológica que reducirían el volumen efectivo del reactor y prevenir la formación de espumas, y la sedimentación en el reactor. (Varnero, 2011)

La agitación permite mantener las condiciones requeridas por los microorganismos de manera uniforme, y así evitar inhibiciones (Varnero, 2011).

Existen dos tecnologías que pueden generar un mezclamiento dentro de un biodigestor, la agitación mecánica y la agitación neumática.

#### a.- Agitación mecánica

Requiere de dispositivos mecánicos internos, de los cuales existen una gran variedad. Se suelen emplear turbinas o agitadores de baja velocidad. En ambos sistemas, los elementos giratorios, desplazan el lodo y permiten el mezclado del contenido del reactor (Metcalf & Eddy, 1996)

#### b.- Agitación neumática

Se realiza a través de la recirculación e inyección de parte del biogás producido en el digestor, según el esquema de la figura 4. El biogás se inyecta por fondo, de tal modo que su ascenso a través del sustrato produce el mezclamiento. Este sistema no evita la estratificación, por ende se ocupa en sustratos que no tienden a formar estratos (sustratos más diluidos). Este tipo de mezclamiento es adecuado para cualquier tipo de configuración del reactor (Spinosa & Vesilind, 2001).

Para el caso de contenedores tipo tolva se recomienda que la inyección de gas sea por la periferia, de esta manera el lodo puede subir por las paredes y bajar por el centro (Sanchez, 2004).

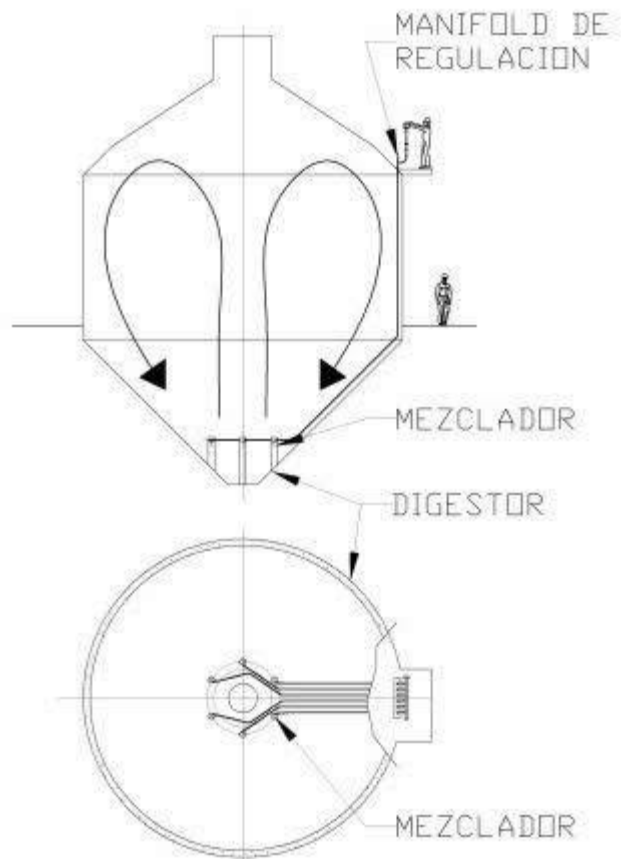


Figura 4 Sistema de agitación neumática en digestor. Vista lateral y de planta.

## 4.2.6 Almacenamiento del biogás

El almacenamiento del biogás puede ser a baja, media o alta presión, dependiendo del uso que este tenga. El 80% de los almacenamientos son a baja presión. La mayoría son de láminas de plástico pero también los hay de acero. Existen diversas opciones para almacenar el biogás (Nogues, 2010).

### 4.2.6.1 Cubiertas flotantes

Las cubiertas flotantes se ajustan sobre la superficie del digestor, según muestra la figura 5, y tienen libertad de movimiento tanto hacia arriba como hacia abajo, producto de la variación de la presión del gas. Normalmente, la amplitud de variación vertical de la cubierta es de unos 2,5 cm (Sanchez, 2004).

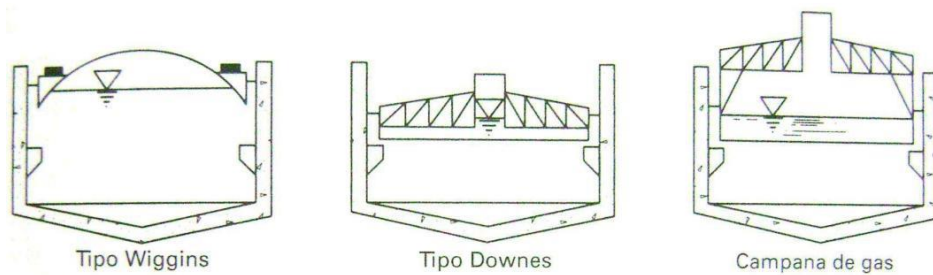


Figura 5 Cubiertas flotantes para la recogida del biogás. (Metcalf y Eddy, 1996).

#### 4.2.6.2 Cubiertas fijas

Son capaces de almacenar una pequeña cantidad de gas bajo presión. Este tipo de cubiertas se pueden utilizar en digestores de etapa única o en los digestores de dos etapas (Metcalf & Eddy, 1996).

Generalmente estas cubiertas tienen forma de cono, como se muestra en la figura 6, y son construidas de hormigón o acero, así se proporciona un espacio libre entre la cubierta y la superficie del líquido (Metcalf & Eddy, 1996).

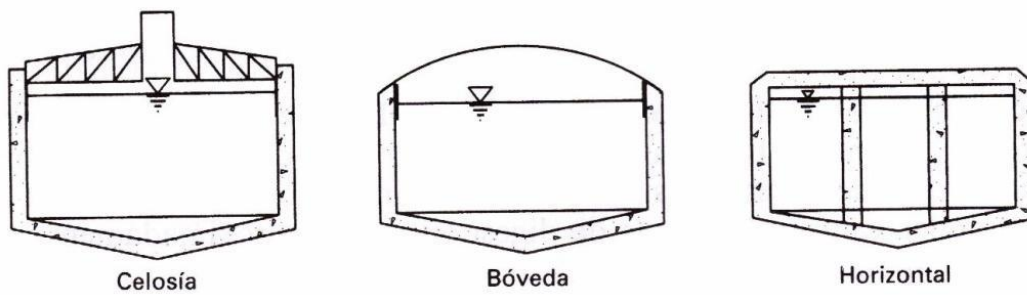


Figura 6 Cubiertas fijas para la recogida del biogás (Metcalf y Eddy, 1996).

#### 4.2.6.3 Gasómetro de doble membrana

Los equipos de doble membrana para el almacenamiento de biogás consisten en tres membranas de tela reforzada de alta resistencia fijadas en una plataforma de cemento con un anillo de acero galvanizado. La membrana inferior sella la bolsa a la plataforma. La membrana interior contiene el biogás, y puede estar más o menos tensionada dependiendo de la cantidad de biogás almacenado. La membrana externa protege a la membrana interna y se mantiene a una tensión constante, ya se introduce aire en el espacio que existe entre ambas membranas cuando el volumen de biogás almacenado por la membrana interna disminuye, y se libera cuando el volumen de biogás aumenta (Nogues, 2010).

#### 4.2.6.4 Bolsas de biogás

La disposición de las bolsas de biogás es muy sencilla, normalmente son colocadas en una base junto al biodigestor, protegidas al interior de un tanque de acero o de madera, o simplemente enterradas en el suelo. Las láminas empleadas para construir las bolsas de biogás están fabricadas en plásticos resistentes a la radiación UV, preparada para estar a la intemperie, también resistente a la degradación por parte de hongos, microbios, etc. Tienen alta resistencia a la rotura y son extremadamente duraderas (Nogues, 2010).

#### 4.2.7 Purificación del biogás (Remoción del sulfuro de hidrógeno)

Usualmente, antes de utilizar el biogás, éste debe ser limpiado, debido al contenido principalmente de ácido sulfhídrico y vapor de agua que este posee, ya que estos componentes pueden generar corrosión en los equipos en donde se utiliza y se combustiona (Montalvo & Guerrero, 2003).

Según Varnero (2011), si se desea utilizar el biogás como fuente de energía calórica el tratamiento de purificación de este debe estar enfocado en la desulfurización, como se muestra en la figura 7.

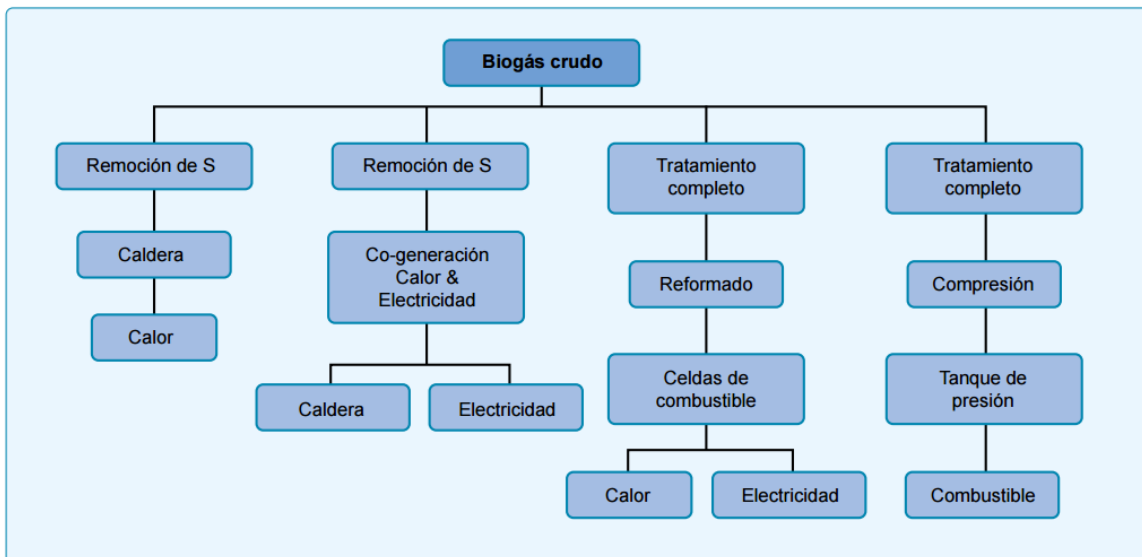


Figura 7 Alternativas de utilización del biogás y sus requerimientos de purificación (Varnero, 2011)

Según Varnero (2011), el sulfuro de hidrógeno en combinación con el vapor de agua en el biogás crudo, puede formar ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) el cual es muy corrosivo para los motores y sus componentes a concentraciones sobre 100 ppm en volumen, el  $H_2S$  es también muy tóxico.

#### 4.2.7.1 Desulfuración biológica

El principio de este método de purificación está basado en la oxidación microbiológica de H<sub>2</sub>S a compuestos de azufre de fácil eliminación, como azufre elemental (S<sup>0</sup>) o sulfatos (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>). El sulfuro de hidrógeno es absorbido en agua y es oxidado biológicamente. La oxidación del H<sub>2</sub>S puede ocurrir en presencia o ausencia de oxígeno. En condiciones micro aeróbicas el compuesto de azufre reducido actúa como dador de electrones y el oxígeno como aceptor de electrones y, en condiciones anaeróbicas, el ion nitrato actúa como aceptor de electrones. Los principales microorganismos que participan en este método y han sido estudiados corresponden a los géneros Beggiatoa, Xanthomonas y, especialmente, Chlorobium, Thiobacillus y Sulfolobus. (Varnero, 2011).

La retención de H<sub>2</sub>S y la formación de sulfato y/o azufre ocurren de acuerdo a las siguientes reacciones consecutivas (Varnero, 2011):

- $2\text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{S} + 2\text{H}_2\text{O}$
- $2\text{S} + 2\text{H}_2\text{O} + 3\text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$

Sin embargo, la reacción directa de H<sub>2</sub>S a sulfato también es posible, y ocurre según la siguiente ecuación (Varnero, 2011):

- $\text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_4$

Es fundamental para que las reacciones puedan ocurrir, satisfacer los requerimientos de los microorganismos en cuanto a nutrientes, como carbono y sales inorgánicas (N, P, K), al igual que elementos traza (Fe, Co, Ni). Estos nutrientes deben estar presentes en el sustrato en cantidades adecuadas (Varnero, 2011).

Existen diversas formas de aplicar la desulfuración biológica. Una de ellas es el uso de bacterias fotosintéticas que oxidan el H<sub>2</sub>S de acuerdo con la siguiente ecuación (Montalvo & Guerrero, 2003):

- $17\text{H}_2\text{S} + 8\text{CO}_2 \rightarrow 2\text{C}_4\text{H}_7\text{O}_3 + 17\text{S} + 10\text{H}_2\text{O}$

Algunos de los microorganismos utilizados para este fin son *Thiobacillus denitrificans* o *Thiobacillus thiooxidans* (Montalvo & Guerrero, 2003).

Otra forma de utilizar la remoción biológica del H<sub>2</sub>S consiste en hacer pasar el gas por un filtro relleno de algún material que sirva de soporte para los microorganismos, como por ejemplo lechos de carbón activado, tierra o compost. Utilizando un lecho de compost se puede eliminar entre el 40 y 100% de las impurezas del biogás, como amoníaco y sulfuro de hidrógeno. Estos filtros operan mejor en bajas concentraciones de H<sub>2</sub>S, en 200 ppm se puede obtener un 99% de remoción (Montalvo & Guerrero, 2003).

#### 4.2.7.2 Precipitación de sulfuros

El principio de este método de purificación de biogás consiste básicamente en que los iones Fe<sub>2</sub><sup>+</sup> en la forma de cloruro de hierro (II) (FeCl<sub>2</sub>) o los iones Fe<sub>3</sub><sup>+</sup> en las formas de cloruro de hierro (III) o sulfato de hierro (II) permiten la precipitación de azufre a una forma estable que permanece en el residuo, siguiendo la reacción:

- $Fe_2^+ + S_2 \rightarrow FeS$
- $2FeCl_3 + 3H_2S \rightarrow 2FeS + S + 6HCl$

Para llevar a cabo este método, sólo se requiere un tanque de mezclado adicional y una bomba de dosificación.

#### 4.2.7.3 Absorción en una solución férrica quelante

Los métodos de purificación por absorción se utilizan ampliamente, debido a la eficiencia y reactividad del sulfuro con una gran variedad metales (Horikawa, 2004).

Según Varnero, en soluciones férricas quelantes, los iones de hierro (III) (Fe<sup>3+</sup>) se reducen a iones Fe<sup>2+</sup>, proceso en el cual, el sulfuro de hidrógeno se oxida a azufre elemental.

- $2 Fe_3^+ + H_2 \rightarrow S 2Fe_2^+ + S + 2H^+$

El equipo que lleva a cabo este proceso consta de un recipiente que contiene la solución de los agentes quelantes o ligandos con hierro (III) a una concentración de 0,01 a 0,05% en peso, en el cual se inyectan el biogás y el aire. Si el biogás que se quiere purificar de sulfuro de azufre además contiene como contaminante bajos niveles de oxígeno (del orden de 100ppm), sólo se requiere un contenedor para la regeneración de los iones Fe<sup>3+</sup>. En el caso, que el biogás que se quiere purificar, está libre de oxígeno, se requiere un segundo contenedor a través del cual circule la solución. En el primer contenedor, el biogás es desulfurado. En el segundo contenedor, la solución de iones Fe<sup>3+</sup> es regenerada mediante

el aire inyectado. El azufre elemental se concentra en el fondo del contenedor, por lo que debe ser removido con cierta frecuencia.

#### 4.2.7.4 Adsorción en compuestos de hierro

En este procedimiento se remueve el sulfuro de hidrógeno presente en el biogás adsorbiéndolo en hidróxido de hierro (III) y/o óxido de hierro (III). Estos procesos corresponden a una desulfuración seca (Varnero, 2011).

- $2\text{Fe}(\text{OH})_3 + 3\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{Fe}_2\text{S}_3 + 6\text{H}_2\text{O}$
- $\text{Fe}_2\text{O}_3 + 3\text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{Fe}_2\text{S}_3 + 3\text{H}_2\text{O}$

Generalmente las masas de óxido o hidróxido de hierro quedan aglomeradas capa por capa en una torre desulfuradora, impregnados en lana de acero, chips de madera o pellets de madera (Varnero, 2011).

#### 4.2.7.5 Adsorción en carbón activado

Si se tiene una producción de biogás libre de oxígeno y con concentraciones medias a altas de  $\text{H}_2\text{S}$ , el sulfuro de hidrógeno molecular puede ser adsorbido en la superficie de carbón activado. Sin embargo, generalmente la eficiencia de la descontaminación no es suficiente. Es por esto que el carbón activado a utilizar se impregna con catalizadores, aumentando de esta forma la velocidad de reacción de oxidación del  $\text{H}_2\text{S}$  a azufre elemental. Para lograr esto existen diversos agentes catalizadores, por ejemplo, el yoduro de potasio (KI) a una concentración de 1-5% en peso solamente en presencia de oxígeno y agua. El  $\text{H}_2\text{S}$  se disuelve en la capa de agua sobre el carbón activado y no reacciona con el oxígeno a bajas temperaturas (50 - 70°C) y una presión de operación de 7 – 8 bar. La reacción que se produce se presenta en la siguiente ecuación (Varnero, 2011)

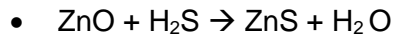
- $2\text{H}_2\text{S} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{S} + 2\text{H}_2\text{O}$

También existen otros agentes que se utilizan como catalizadores en el carbón activado como el carbonato de potasio ( $\text{K}_2\text{CO}_3$ ) y permanganato de potasio ( $\text{KMnO}_4$ ) (Varnero, 2011).

#### 4.2.7.6 Enlace químico con zinc

Según Varnero, en plantas agrícolas pequeñas, generalmente el procedimiento que se utiliza para obtener un biogás con bajas concentraciones de sulfuro de hidrógeno, consiste

en hacer pasar el biogás a través de un cartucho de óxido de zinc (ZnO), obteniendo la reacción:



El azufre queda retenido formando un enlace químico dentro del cartucho, el cual debe ser reemplazado al cabo de un tiempo (Varnero, 2011).

### 4.3 Antecedentes de la industria cervecera

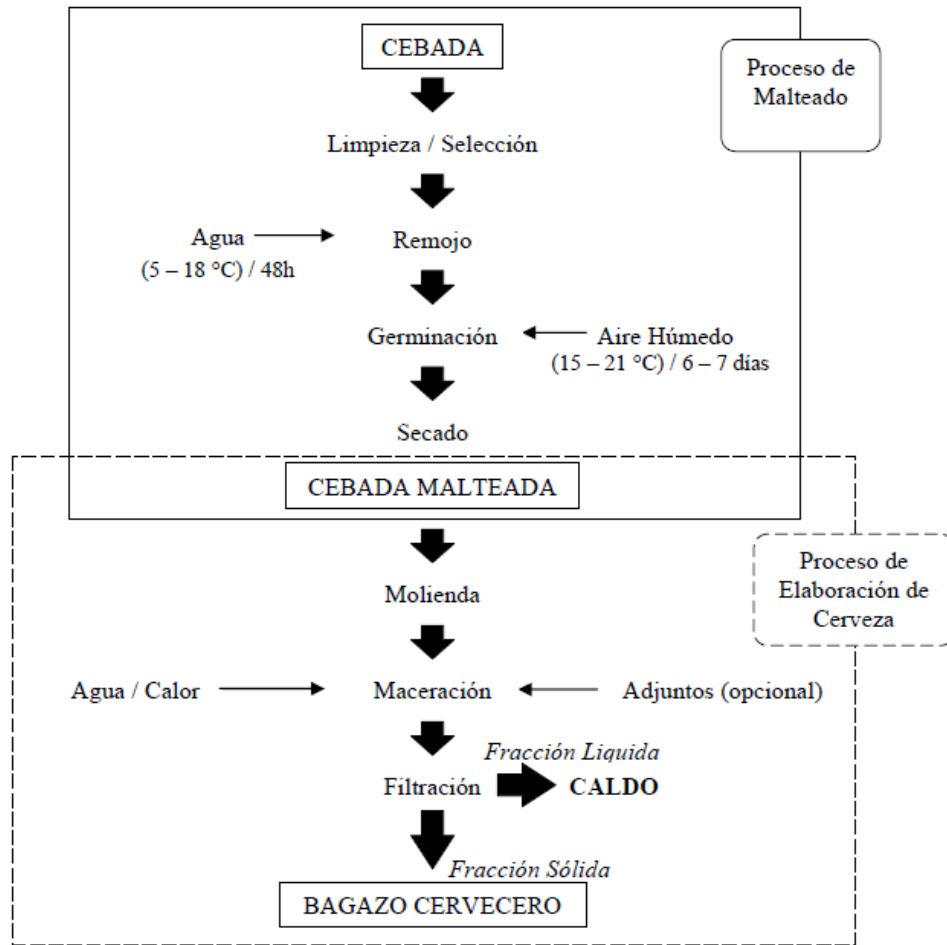
#### 4.3.1 La industria cervecera en Chile

La cerveza es una de las bebidas alcohólicas con mayor consumo en el país, representando un 15,7% del consumo per cápita de la canasta de productos de la industria de bebestibles. El crecimiento en las ventas del mercado de la cerveza en Chile es considerable. Solo entre 2006 y 2007 hubo un aumento en el volumen de ventas de 5.484.000 a 5.727.000 mil hectolitros incluyendo todas las categorías de cerveza (Asociación de productores de cerveza en Chile, 2007), y en la actualidad el volumen de producción total es cercana a los 6.8 millones de hectolitros anuales (ACECHI, 2016).

Aunque dentro de este contexto, el porcentaje correspondiente a la producción de cerveza artesanal se aproxima al 1% del total de cerveza producida en Chile, este sector ha tenido un auge importante. En los últimos años el consumo de cervezas Premium ha aumentado y a la vez se ha sumado una gran cantidad de cervecías artesanales al segmento (Asociación de productores de cerveza en Chile, 2007).

#### 4.3.2 Bagazo cervecero

El bagazo cervecero es el principal residuo que se obtiene en el proceso productivo de la cerveza, con un volumen de producción 85% en relación al total de residuos generados y se obtiene luego de las etapas de maceración y filtración, como se representa en la Figura 8.



8

Diagrama del proceso obtención de bagazo de cerveza, adaptado de Mussatto et al., 2006.

Figura

El bagazo cervecero corresponde a la fracción sólida del residuo que queda (Musatto et al., 2004). De acuerdo a Townsley (1979), en el proceso de elaboración de cerveza se remueven solo aquellos nutrientes de interés para la elaboración de cerveza, dejando en el bagazo, proteínas insolubles en agua, como también los residuos de paredes celulares de la cascara, pericarpio y restos de semillas.

El bagazo cervecero se compone principalmente de la cascara, pericarpio y cubiertas de la semilla de cebada. Dependiendo de la uniformidad del malteado, pueden quedar en mayor o menor cantidad restos de almidón en el endospermo y restos de pared celular. Aun así, el contenido de almidón es insignificante comparado a los compuestos de las paredes celulares de la cascara, pericarpio y cubiertas de la semilla, las cuales son abundantes en polisacáridos de celulosa y hemicelulosa, lignina, algunas proteínas y lípidos. La cascara a su vez presenta altos contenidos en silicio y polifenoles (Musatto et al., 2006).

Santos et al. (2003), explica que la composición química del bagazo varía de acuerdo a las variedades de cebada utilizada, las condiciones de cosecha, malteado y maceración, como también, la calidad y cantidad de adjuntos agregados al momento de la elaboración. Conforme a su composición química se puede considerar el bagazo cervecero como un material lignocelulósico rico en proteínas y fibra.

### 4.3.3 Digestión anaeróbica en el bagazo cervecero

El alto contenido orgánico que posee el bagazo cervecero, brinda a las cervecerías la oportunidad de utilizar la digestión anaeróbica para el tratamiento de este residuo y además cubrir en parte su demanda de energía con el metano generado. Sin embargo, Los largos tiempos de retención necesarios para tratar el orujo de los granos mediante digestión anaeróbica hacen esta tecnología económicamente no atractiva. Este largo tiempo de retención es causado por la lenta conversión biológica de celulosa y hemicelulosa (Bochmann et al., 2015).

Sin embargo, se han realizado ensayos en donde el potencial de producción ha alcanzado los 386,5 litros de CH<sub>4</sub> por kilogramos de bagazo (Bochmann et al., 2015)).

## 4.4 Evaluación de proyectos

La evaluación de un proyecto, considera criterios que comparan flujos de beneficios y costos, y permite determinar si es que es conveniente llevarlo a cabo; es decir, si es o no rentable para los inversionistas. Los estudios técnicos y económicos, entregan información necesaria para estimar los flujos esperados de ingresos y costos que se producirán durante la vida útil del proyecto. La evaluación solo considera los flujos de beneficios y costos atribuibles al proyecto expresados en monedas de un mismo momento (MIDEPLAN, 1998).

En el marco de la valuación de un proyecto, un flujo de fondos nos muestra el comportamiento de los ingresos, gastos, impuestos y utilidad del proyecto. No obstante el resultado final no nos permite determinar con seguridad si vale la pena realizar el proyecto o inversión inicial, y a su vez cumplir con las premisas de cualquier proyecto que básicamente consiste en recuperar en forma íntegra la inversión y generar una ganancia adicional o valor agregado para el inversionista o quién toma la decisión de realizar dicho proyecto. (Servicios Profesionales en Web, 2016)

El método usado por la mayoría organizaciones y compañías para evaluar proyectos de inversión se conoce como valor actual neto. Este indicador establece un rendimiento sobre el dinero que es aportado o desembolsado, de modo que una compañía debe efectuar una inversión solo si el valor presente del flujo de efectivo que genera la inversión rebasa el costo de la inversión realizada en primer lugar. El método del VAN descuenta los flujos de efectivo de la empresa del costo de capital (Gitman & Zutter, 2012).

El VAN representa el valor del dinero actual que reportará el proyecto en el futuro, a una tasa de descuento y un periodo determinado. La tasa de descuento es aquella medida de rentabilidad mínima exigida por el proyecto y que permite recuperar la Inversión inicial, cubrir los costos efectivos de producción y obtener beneficios. La tasa de descuento representa la tasa de interés a la cual los valores futuros se actualizan al presente.

Si el VAN es mayor que \$0, la empresa ganará un rendimiento mayor que su costo de capital en caso de realizar el proyecto (Gitman & Zutter, 2012).

## CAPITULO 5. METODOLOGÍA

El procedimiento utilizado para llevar a cabo el presente estudio de potencial metanogénico y evaluación de la implementación de la digestión anaeróbica como tratamiento para el bagazo cervecero generado en una cervecería artesanal, se llevó a cabo de acuerdo al itinerario de actividades principales que se presentan cronológicamente en el esquema de la figura 9.

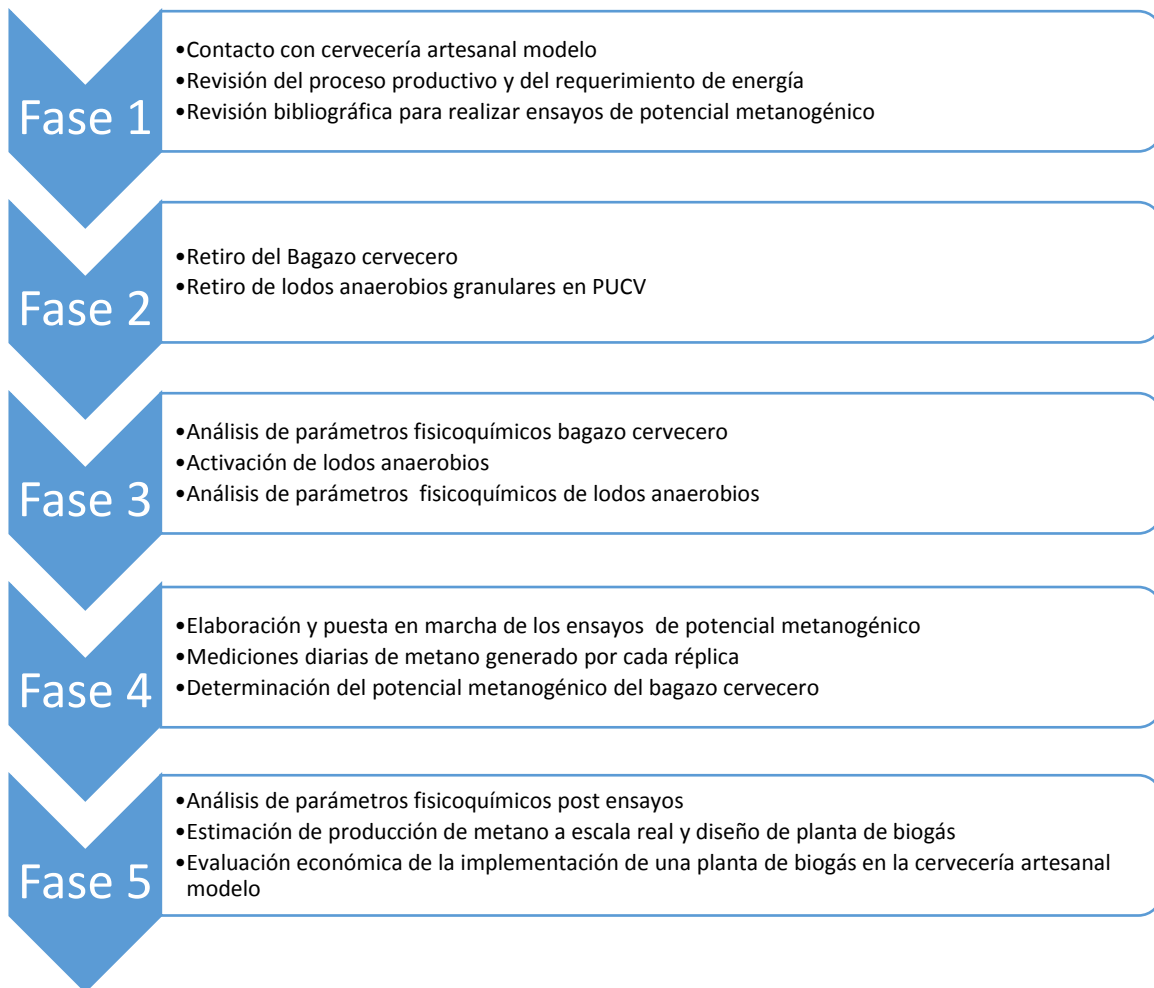


Figura 9 Actividades realizadas en el estudio de potencial metanogénico del bagazo cervecero

## 5.1 Metodología analítica

La metodología analítica contempla los procedimientos y ensayos llevados a cabo en laboratorio, los cuales están basados en métodos que se encuentran en la literatura. Sin embargo, algunos procedimientos fueron adaptados a las condiciones e implementos disponibles en laboratorio.

### 5.1.1 Caracterización del Inóculo

El inóculo proporcionó los microorganismos necesarios para la digestión anaeróbica del bagazo, por lo que se mantuvo las condiciones óptimas para la actividad de las bacterias. Se determinaron experimentalmente parámetros físicos y químicos del inóculo, con el fin de obtener una caracterización de este.

#### 5.1.1.1 Determinación de sólidos totales

Se determinó la concentración de sólidos totales, presentes en una muestra del lodo anaerobio que se utilizó en los ensayos de potencial metanogénico. Básicamente los sólidos totales equivalen al residuo que queda después de someter a dicha muestra a un proceso de evaporación a 105°C. Para esto se utilizó el método adaptado del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA 1995.

#### **Materiales**

- Crisoles
- Balanza de precisión
- Pipetas
- Propipetas
- Estufa de secado a 105°C
- Secadora

### Procedimiento

- Se secó el crisol en una estufa a 105°C por una hora y luego se pesó en una balanza de precisión
- Se tomaron 10 ml de lodo y se depositaron en el crisol
- El crisol con la muestra se llevó a la estufa a 105°C, hasta peso constante (aproximadamente 12 horas).
- Se pesó nuevamente el crisol con la muestra seca

El cálculo se realizó de acuerdo a la ecuación:

$$ST = \frac{P_{msc} - P_c}{V} \times 1000$$

Donde:

P<sub>msc</sub>: peso de la muestra seca incluyendo el crisol (g)

P<sub>c</sub>: peso crisol seco (g)

V: volumen de la muestra (ml)

#### 5.1.1.2 Determinación de sólidos volátiles

Se determinó la concentración de sólidos volátiles para la muestra de lodo anaerobio, la cual representa la cantidad de materia orgánica existente en esta. El principio de este procedimiento consiste en que los SV se oxidan transformándose en gas a una temperatura de 550 °C. Se utilizó el método adaptado del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA 1995.

### Materiales

- Balanza de precisión
- Mufla a 550°C
- Crisol
- Pinzas metálicas
- Secadora

### Procedimiento

- Se llevó el crisol con la muestra seca obtenida en la determinación de los ST a la mufla a 550 °C por aproximadamente tres horas.
- Luego se llevaron los crisoles con las muestras calcinadas a la secadora, y una vez enfriados se pesaron.

El cálculo se realizó de acuerdo a la ecuación:

$$SV = \frac{P_{msc} - P_{mcc}}{V} \times 1000$$

Donde:

$P_{msc}$ : peso muestra seca más crisol (g)

$P_{mcc}$ : peso muestra calcinada más crisol (g)

V : volumen de la muestra (ml)

#### 5.1.1.3 Determinación de los Sólidos Suspendedos Totales (SST)

Se determinó la concentración de sólidos suspendidos totales de los lodos anaerobios granulares. Estos corresponden a la suma de los sólidos suspendidos volátiles y fijos, y se determinan a través de una diferencia de peso después llevar la muestra previamente filtrada, a una temperatura de 105 °C hasta obtener un peso constante. El procedimiento fue realizado según el método adaptado del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA 1995.

### Materiales

- Filtro de fibra de vidrio 70 mm
- Embudo Büchner
- Pipeta
- Propipeta
- Estufa a 105 °C
- Balanza de precisión
- Secadora

### Procedimiento

- Se mojó el filtro de fibra de vidrio con agua destilada, y se llevó a la estufa a 105 °C por una hora.
- Se pesó el filtro en una balanza de precisión.
- Se tomó un volumen conocido de muestra (3 ml) y se filtró en un embudo de büchner
- La muestra filtrada se pesó y se llevó a estufa a 105 °C hasta peso constante (8 horas aproximadamente)
- El filtro con la muestra seca se llevó a la secadora y finalmente se pesó nuevamente.

El cálculo se realizó de acuerdo a la ecuación:

$$SST = \frac{Pmsf - pf}{V} \times 1000$$

Donde:

Pmsf: peso muestra seca más el filtro (g)

Pf: peso del filtro seco (g)

V: volumen de la muestra (ml)

#### 5.1.1.4 Determinación de los Sólidos Suspendedos Volátiles (SSV)

Se determinó la concentración de sólidos suspendidos volátiles de una muestra de lodo anaerobio, lo que corresponde a la parte no soluble de los sólidos volátiles de esta. Para el caso del lodo anaerobio se asume que los SSV corresponden a la población bacteriana presente.

El contenido de SSV corresponde a la diferencia de peso entre la muestra seca y la muestra al ser calcinada a 550 °C. El procedimiento fue realizado según el método adaptado del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA 1995.

### Materiales

- Balanza de precisión
- Mufla a 550 °C
- Crisol
- Pinzas metálicas
- Secadora

### Procedimiento

- El filtro con la muestra seca obtenida en la determinación de los SST se llevó a la mufla para ser calcinada a 550 °C por aproximadamente tres horas.
- Luego se llevó a la secadora y una vez enfriado se pesó nuevamente en la balanza de precisión.

El cálculo se realizó de acuerdo a la ecuación:

$$SSV = \frac{Pmsf - pmcf}{V}$$

Donde:

Pms: peso muestra seca más filtro (g)

Pmc: peso muestra calcinada más filtro (g)

V: volumen de la muestra (ml)

#### 5.1.1.5 Determinación de AGV

El contenido de ácidos grasos volátiles presentes en una muestra, guarda cierta proporcionalidad con la cantidad de ácido que se debe utilizar en su titulación para bajar el pH desde 5 a 4. El principio considera que entre pH 5,0 y pH 4,0 usualmente no hay un subsistema ácido/base débil que tenga fuertes efectos en el consumo de ácido, aparte del subsistema acetato.

Se determinó la concentración de ácidos grasos volátiles mediante el procedimiento adaptado del método de Kapp 1984 (Buchauer, 1998).

### Materiales

- Vaso precipitado de 50 ml
- Agitador magnético
- Barras magnéticas
- Filtro de fibra de vidrio 0,45 µm
- Embudo Büchner
- pH metro
- Bureta

### Procedimiento

- La muestra se filtró a través de un filtro de 0,45 µm.
- Una muestra filtrada de 20 ml se colocó en un vaso de titulación, asegurando que electrodo de pH quede totalmente inmerso.
- Se introdujo una barra magnética y se colocó el vaso sobre el agitador magnético manteniendo una agitación suave
- Se midió el pH inicial
- La muestra fue titulada lentamente con ácido clorhídrico 0,1 M hasta alcanzar el pH 5,0. Se anotó el volumen de ácido utilizado
- Más ácido fue agregado lentamente hasta alcanzar pH 4,3, el volumen utilizado se anotó nuevamente
- Se continuó con la titulación hasta alcanzar el pH 4,0, anotando una vez más el volumen utilizado
- Un mezclado constante entre la muestra y el líquido de titulación se debe realizar desde el inicio para minimizar el intercambio de CO<sub>2</sub> con la atmósfera

El cálculo se realizó de acuerdo a la ecuación:

$$[AGV] = \frac{131340 \times N_{Ac} \times V_{5-4}}{V_{muestra}} - (0,061 \times A_T) - 10,9$$

Donde:

[AGV]: Concentración de ácidos grasos volátiles (mg H<sub>Ac</sub>/l)

N<sub>Ac</sub>: Molaridad del ácido (0,1 M)

V<sub>5-4</sub>: Volumen de ácido gastado entre pH 5,0 y pH 4,0 (ml)

$V_{\text{muestra}}$ : volumen de muestra

### 5.1.1.6 Determinación de alcalinidad

#### Materiales

- Vaso precipitado de 50 ml
- Agitador magnético
- Barras magnéticas
- pH metro
- Bureta

#### Reactivos

- Ácido clorhídrico 0,1 M

#### Procedimiento

- Se dispusieron 25 ml de muestra homogénea en un vaso precipitado de 50 ml
- Se introdujo una barra magnética y colocó sobre el agitador magnético manteniendo una agitación suave
- Se introdujo en la muestra el electrodo del pH metro, asegurando que la punta del quede totalmente inmersa
- Se midió el pH inicial de la muestra
- La muestra se tituló lentamente con ácido clorhídrico 0,1 M hasta alcanzar el pH 4,3 y se anotó el volumen gastado.

El cálculo se realizó de acuerdo a la ecuación:

$$\text{Alcalinidad total (AT)} = \frac{V_{Ac(4,3)} \cdot N_{Ac} \cdot 50000}{V_{\text{Muestra}}}$$

Donde:

$V_{Ac(4,3)}$ : Volumen de ácido utilizado para llevar el pH desde el pH de la muestra hasta pH 4,3

$N_{Ac}$ : Molaridad del ácido clorhídrico (0,1 M)

$V_{\text{Muestra}}$ : Volumen de muestra (25 ml)

### 5.1.2 Preparación del inóculo

Los lodos anaerobios utilizados corresponden a lodos anaerobios granulares purgados desde un reactor UASB. Debido a que estos se encontraban inactivos, se realizó la activación de estos, para luego efectuar la determinación de su AME según el método descrito por Field (Field *et al*, 1988). Con el fin de favorecer el proceso de digestión anaerobia y el crecimiento de las poblaciones de bacterias, se debe preparar un medio y condiciones de cultivo adecuadas.

#### Materiales

- Baño termostático a 37 °C
- Botellas de 100 ml con tapón de goma y sello
- Mangueras de goma impermeables al metano
- Agujas de jeringa
- Probetas de 50 ml
- Pipetas y Micropipetas
- pH metro calibrado en el rango 4-7
- Agitador magnético
- Matraz de aforo
- Vaso precipitado
- Balón de gas nitrógeno

#### Reactivos

- Solución de Macronutrientes; se preparó 100ml de solución utilizando los componentes expuestos en la tabla N°2.
- Solución de Micronutrientes; se preparó 100ml de solución utilizando los componentes expuestos en la tabla N°3.

*Tabla 2 Concentración de macronutrientes del medio de cultivo para la medición de la actividad metanogénica (Field et al, 1988).*

| Macronutrientes                      |                     |
|--------------------------------------|---------------------|
| Compuesto                            | Concentración (g/L) |
| NH <sub>4</sub> Cl                   | 100                 |
| NaCl                                 | 10                  |
| MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O | 10                  |

|  |     |
|--|-----|
| CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O               | 5   |
| K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·3H <sub>2</sub> O | 200 |
| NaHCO <sub>3</sub>                                 | 2,6 |

Tabla 3 Concentración de micronutrientes del medio de cultivo para la medición de la actividad metanogénica (Field et al, 1988).

| Micronutrientes  |                     |
|--|---------------------|
| Compuesto  | Concentración (g/L) |
| FeCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O   | 2                   |
| H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>   | 0.05                |
| ZnCl <sub>2</sub>  | 0.05                |
| CuCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O   | 0.038               |
| MnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O   | 0.05                |
| (NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> Mo <sub>7</sub> O <sub>24</sub> ·4H <sub>2</sub> O | 0.05                |
| CoCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O   | 0.05                |
| NiCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O   | 0.092               |
| EDTA   | 0.5                 |
| HCL 36%  | 1(mL)               |
| Na <sub>2</sub> SeO <sub>3</sub> ·5H <sub>2</sub> O                                | 0.1                 |
| Resazurin  | 0.5                 |

Se agregó 1 ml de micro y macronutrientes por litro de ensayo.

- Solución de Sulfuro; en un vaso precipitado se pesó 10 g de Na<sub>2</sub>S·9H<sub>2</sub>O, se añadió agua destilada y se agitó. La solución fue trasvasijada y aforada a 50 ml. La solución de sulfuro fue preparada fresca antes de ser utilizada; Se agregó 0,1 ml de solución de sulfuro por litro de medio de ensayo.

-Solución de Ácidos Grasos Volátiles (AGV); para la preparación de esta solución se llevó a cabo el procedimiento que consiste en: añadir en un vaso precipitado 6,35 ml de ácido acético, 1,68 ml de ácido propiónico y 1,74 ml de ácido butírico, aportando una DQO de 153,153 gO<sub>2</sub>/l. Colocar el vaso en el agitador y agregar 20 a 30 ml de agua destilada. Con agitación constante medir el pH, agregar NaOH y neutralizar hasta pH 7,0. Transferir el contenido del vaso al matraz de aforo lavando 2 a 3 veces con agua destilada para traspasar

toda la solución. Aforar a 100 ml y homogenizar la mezcla. Se agrega una concentración de 3,5 a 4,5 g DQO<sub>AGV</sub> por litro de medio de ensayo.

- Extracto de Levadura; se añadió 0,2 g de extracto de levadura por litro de medio de ensayo
- Lodo Anaerobio; se agregó un volumen logrando una concentración entre 1,0 y 1,5 gSSV/l en cada botella

### Procedimiento

Realizar mediciones diarias para cada botella, y registrar los volúmenes generados de metano, hasta alcanzar la estabilización de la producción.

El cálculo se realizó de acuerdo a la ecuación:

$$AME = \frac{P}{SSV \times V \times FC} \left[ \frac{gDQO_{CH_4}}{gSSV \cdot d} \right]$$

Donde:

AME: actividad metanogénica específica

P: pendiente máxima de la producción de metano (ml CH<sub>4</sub>/d)

FC: factor de conversión en ml CH<sub>4</sub>/g DQO<sub>CH<sub>4</sub></sub> (397 a 37 °C)

SSV: concentración de lodo en el digestor (g SSV/l)

V: volumen efectivo de líquido en el digestor en litros

## 5.1.3 Caracterización del sustrato

### 5.1.3.1 Determinación de la DQO

Se determinó el contenido materia orgánica (mediante su DQO) de el bagazo cervecero suministrado por la microcervecería por medio del método de Carbono Orgánico Total.

El principio para medir DQO en muestras sólidas consiste en que esta se determina de manera indirecta a través de la medición del contenido de carbono orgánico. Para

determinar la DQO correspondiente al bagazo cervecero, primero se llevó a cabo la determinación del carbono orgánico presente.

El cálculo se realizó de acuerdo a la ecuación:

$$DQO_{Solidos} = \frac{P_{Carbono} \cdot 32 \cdot 1000}{12} \left[ \frac{mgO_2}{g_{masa}} \right]$$

Donde:

$P_{Carbono}$ : masa de carbono presente en un gramo de muestra seca

12: peso atómico del carbono

32: peso molecular del oxígeno gaseoso

1000: factor de conversión de gramos a miligramos

### 5.1.3.2 Determinación de Carbono Orgánico

La materia orgánica presente en una muestra sólida es oxidada por una mezcla de ácido crómico y ácido sulfúrico. Después de la digestión el dicromato no reducido es titulado con sulfato ferroso amoniacal.

#### Materiales

- Balanza de precisión
- Balón de vidrio esmerilado de 250 ml
- Columna de enfriamiento
- Manta calefactora
- Algodón hidrófobo
- Vaselina
- Matraz aforado de 250 ml
- Matraz Erlenmeyer

### Reactivos

- Ácido Crómico 0,4 N; Se disolvió 39,232 g secos de  $K_2Cr_2O_7$  en un litro de agua destilada. Se adicionó cuidadosamente un litro de ácido sulfúrico concentrado y se mantuvo en un baño de hielo para evitar un aumento excesivo de la temperatura y se deja enfriar.
- Solución de Sulfato Ferroso Amoniacal (FAS) 0,2 N; Se disolvió 80 g de sulfato ferroso amoniacal ( $Fe(NH_4SO_4) \cdot 6H_2O$ ) en un litro de agua destilada que contenía 20 ml de ácido sulfúrico concentrado.
- Indicador de Ortofenantrolina; Se disolvió 1,485 g de Ortofenantrolina y 0,695 g de sulfato ferroso amoniacal en 100 ml de agua destilada.

### Procedimiento

- Se pesó 0,05 g de una muestra seca, y previamente molida transferir a un balón de vidrio esmerilado de 250 ml
  - Se adicionó 50 ml de ácido crómico 0,4 N, agitando suavemente para mantener la suspensión
  - El matraz se conectó a un sistema de condensación. Se calentó en la manta y se dejó bullir moderadamente durante 15 minutos y posteriormente se dejó enfriar.
  - Se transfirió el contenido a un matraz de 250 ml, el balón fue lavado con agua destilada para asegurarse que toda la solución fue trasvasijada al matraz. Posteriormente se aforó con agua destilada hasta su volumen útil
  - Se adicionó 3 gotas de solución de Ortofenantrolina
  - Se tituló con una solución de FAS estándar hasta el punto final, el cual es marcado por un color verde brillante seguido de un café rojizo
- En forma paralela preparó un blanco, que consistió en una solución de ácido crómico sin muestra, y al cual se le realizó el mismo procedimiento sin el paso de la ebullición en el sistema de condensación.

El cálculo se realizó de acuerdo a la ecuación:

$$\%C = \frac{(V_{Blanco} - V_{Muestra}) \cdot C \cdot N_{AC} \cdot 0,003}{V_{Blanco} \cdot P} \cdot 100$$

$V_{\text{Muestra}}$ : volumen de FAS gastado en la titulación de la muestra

$V_{\text{Blanco}}$ : volumen de FAS gastado en la titulación del blanco

C: volumen de ácido crómico (50 ml)

$N_{\text{AC}}$ : normalidad del ácido crómico (0,4 N)

0,003: m.e. peso del carbono

P: peso de la muestra

### 5.1.3.3 Determinación de los Sólidos totales (ST)

Es fundamental saber el contenido de sólidos de la muestra para la preparación de los ensayos de potencial metanogénico. Si la muestra está muy diluida, no hay carbono suficiente para la formación de metano. Por el contrario, si la muestra presenta una concentración elevada de sólidos, éstos actúan como inhibidores, haciendo el proceso menos eficiente y por lo tanto produciendo menos biogás.

Se determinó la cantidad de Sólidos Totales presentes en la muestra de bagazo sometiéndola a una temperatura de 105°C, según "Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA (2012).

#### **Materiales**

- Vasos precipitados
- Balanza de precisión
- Pinzas y estufa de secado a 105°C.
- Crisol
- Desecadora.

#### **Procedimiento**

Se llevó un crisol a la estufa a una temperatura de 105°C por 4 horas, registrándose el peso (PC) en una balanza de precisión. Se depositaron 10g de la muestra en el crisol; se registró el peso como PMC. El vaso con la muestra se llevó nuevamente a la estufa a 105°C por 48 horas y se registró como PMSC.

El cálculo se realizó de acuerdo a la ecuación:

$$ST\% = \frac{PMC - PMSC}{PC - PMSC} \times 100$$

Donde:

PMC = masa en g de la muestra tal como se recibió + recipiente

PMSC= masa en g del lodo seco a 105°C±5°C + recipiente

PC = masa en g del recipiente

%ST= Porcentaje de Sólidos totales en la muestra (p/p).

#### **5.1.3.4 Determinación de los Sólidos Volátiles (SV)**

Fue necesario determinar la cantidad de Sólidos Volátiles presentes en la muestra, pues estos representan la carga orgánica disponible para la digestión.

El principio para la determinación de los Sólidos Volátiles es el siguiente, estos corresponden a la cantidad de materia orgánica que existe en una muestra, la cual se oxida y transforma en gas a una temperatura de 550°C.

#### **Materiales**

- Balanza de precisión
- Estufa
- Mufla a 550°C
- Crisol
- Pinzas metálicas
- Desecadora.

#### **Procedimiento**

Se llevaron los crisoles a la estufa por 4 horas, luego se dejaron enfriar en la desecadora y se pesaron en la balanza de precisión. Se tomaron las muestras secas y se traspasan a los crisoles, registrando la masa del conjunto. Luego se llevaron los crisoles con la muestras a la mufla para su calcinación a 550°C por un periodo de dos horas. Se dejaron enfriar en la desecadora y se registró el peso (Rios & Paula, 2015)

Para el cálculo de los Sólidos Volátiles se empleó la siguiente ecuación:

$$SV\% = \frac{A - B}{A - C} \times ST$$

Donde:

SV: Sólidos Volátiles

B: Peso muestra calcinada más la del crisol (g)

A: Peso muestra seca más la del crisol (g)

C: Peso crisol seco (g)

ST: Sólidos totales (g)

## 5.2 Metodología Experimental

### 5.2.1 Ensayos de potencial metanogénico

Para determinar el potencial metanogénico se evaluaron tres alternativas, en las cuales varía la proporción entre sustrato e inóculo de acuerdo a la concentración de sólidos volátiles que ambos elementos poseen. La mezcla de sustrato/inóculo fue dispuesta en los reactores utilizando las razones S/I 0,5, 1,0 y 2,0 [gSV<sub>bagazo</sub>/gSV<sub>inoculo</sub>]. Cada ensayo se realizó por triplicado, más un blanco de bagazo y un blanco de lodo.

Se calcularon las cantidades de bagazo e inóculo a utilizar en cada ensayo necesarias para obtener la relación sustrato/inoculo respectiva y una concentración de sólidos totales de 5%.

#### **Materiales**

- Balanza de precisión
- Micropipetas
- Botellas de 100 ml con tapón de goma y sello
- Balón de gas nitrógeno

#### **Reactivos**

- Solución de macronutrientes
- Solución de micronutrientes
- Solución de Sulfuro
- Extracto de Levadura

**Procedimiento**

Las botellas de 100 ml funcionaron como reactores anaeróbicos.

Además del bagazo y el lodo anaerobio, a cada ensayo se suministró las soluciones que componen el medio de cultivo. Las cantidades agregadas se presentan en la tabla 4. Luego se adicionó agua destilada hasta completar un volumen útil de 70 ml.

*Tabla 4 Composición de los ensayos de potencial metanogénico*

| S/l | Masa Bagazo Seco (g) | Masa Lodo (g) | Volumen Bagazo (ml) | Volumen lodo (ml) | Sol. Macro (ml) | Sol. Micro (ml) | Sol. Sulfuro (ml) | Leva-dura (ml) | Agua (ml) |
|-----|----------------------|---------------|---------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-------------------|----------------|-----------|
| 2   | 2,37                 | 26,06         | 8,77                | 26,06             | 0,1             | 0,1             | 0,005             | 0,010          | 33,50     |
| 1   | 1,72                 | 37,94         | 6,38                | 37,94             | 0,1             | 0,1             | 0,005             | 0,010          | 24,39     |
| 0,5 | 1,12                 | 49,15         | 4,13                | 49,15             | 0,1             | 0,1             | 0,005             | 0,010          | 145,81    |

Además se agregó a cada botella 1 g de bicarbonato de sodio (buffer) por cada gramo de DQO aportada por el bagazo en el reactor con el fin de evitar la acidificación de los sistemas anaeróbicos.

Los reactores se sumergieron en un baño termostatzado a 37°C como se muestra en la imagen de la figura 10.

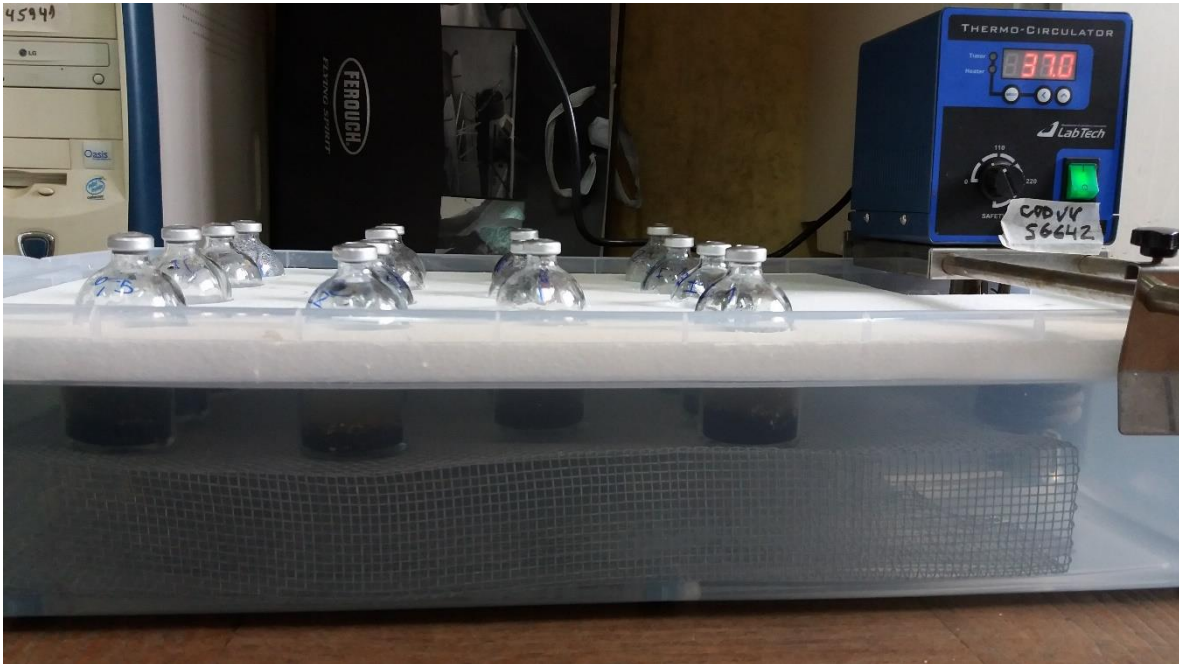


Figura 10 Ensayos de potencial metanogénico para el bagazo cervecero.

### 5.2.1 Medición de la producción de metano

Según (Field) el volumen de gas metano producido en experimentos de laboratorio puede medirse por desplazamiento de un líquido. El método más común es el que utiliza la “botella de Mariotte”, aunque también se puede utilizar otros implementos que se tengan a disposición, como por ejemplo botellas de suero, como se muestra en la figura 11.

El líquido utilizado es una solución de NaOH con una concentración de 20 g/L, y el principio de este método consiste en que a medida que el biogás atraviesa esta solución, el CO<sub>2</sub> contenido reacciona y queda retenido formando carbonato.

Por lo tanto solo el metano pasa a través de la solución y un volumen equivalente es impulsado desde la botella invertida. Luego el líquido desplazado puede pesarse, y sabiendo su densidad se puede calcular el volumen expulsado por el gas.

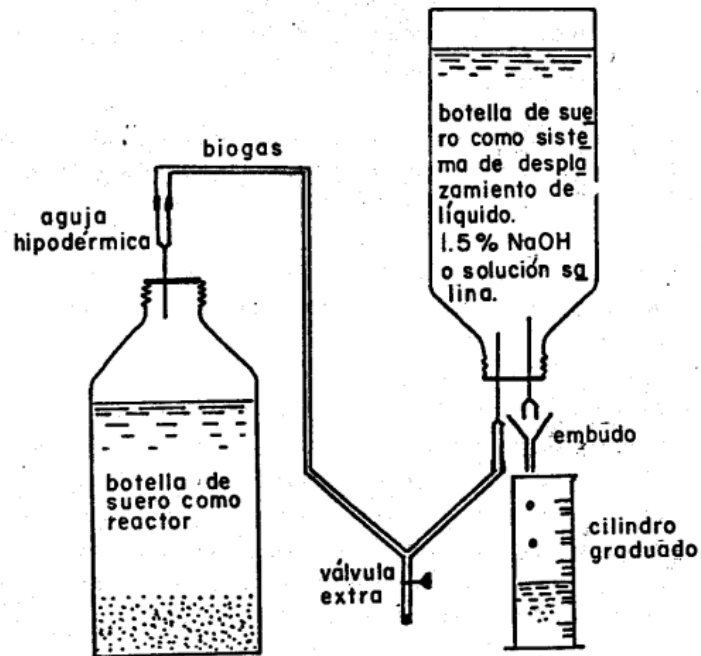


Figura 11 Esquema del método de medición de metano por desplazamiento de líquido

### Materiales

- Botellas de 100 ml con tapón de goma
- Mangueras de goma impermeables al metano
- Agujas de jeringa

### Procedimiento

- Se mantuvieron las botellas en el baño termostático a 37 °C
- Diariamente se conectaron las botellas al sistema de medición de metano (botellas invertidas con solución de NaOH a 20 g/l).
- Se pesó el líquido desplazado y se registró.

Las mediciones se realizaron cada 24 horas, hasta que la producción acumulada de metano en el reactor alcanzara la estabilización o hasta que el metano generado diariamente representara menos del 1% del metano acumulado.

### 5.2.2 Descripción el proceso de producción de cerveza

Mediante salidas a terreno (visitas a la microcervecería) y consultas al director de la cerveceria artesanal modelo, se recopiló la información necesaria sobre el proceso productivo de la cervecería artesanal.

Conocer la tasa de producción de cerveza en la cervecería artesanal modelo y el índice de generación de bagazo por cada lote de producción es fundamental para estimar la cantidad de bagazo que se tendrá disponible para tratar mediante digestión anaeróbica, y luego para el diseño y dimensionamiento de la potencial planta de biogas a implementar en la microcervecería. Con la información obtenida se pudo llevar a cabo los balances de materia y energía.

También mediante el reconocimiento de las inmediaciones se identificaron las etapas del proceso productivo de la cerveceria en donde se podría utilizar eventualmente el biogas generado.

### 5.2.3 Balances de materia y energía

Una vez obtenidos los resultados de los ensayos de potencial metanogénico, se realizaron los balances de materia y de energía global para el proyecto.

Primero se estimó la energía calórica que se utiliza por cantidad de lotes de producción, de acuerdo al registro de consumo de gas licuado que se tiene actualmente en la cervecería artesanal modelo. Luego, de acuerdo al potencial metanogénico del bagazo obtenido experimentalmente, se determinó el porcentaje de energía que es posible abastecer mediante la generación de biogás a partir de la digestión anaeróbica del bagazo cervecero. Cabe mencionar que se utilizaron datos reales de producción que presenta la cervecería artesanal para la cual se diseñó la planta piloto de biogás.

### 5.2.4 Diseño, estimación y selección de equipos

De acuerdo a los balances de materia y energía obtenidos se dimensionaron los equipos que serán necesarios para la construcción de la planta piloto de biogás. De acuerdo a los flujos estimados se seleccionaron los equipos principales y comercialmente disponibles.

Se determinó el tipo de biodigestor y volumen necesario, el tipo de agitación y la alternativa para almacenar el biogás. También se determinó la alternativa para purificar el potencial de biogás a producir y la bomba que se utilizaría para la circulación de este.

### 5.2.4.1 Volumen del biodigestor

El digestor piloto considerado para la prefactibilidad técnica de la planta de biogás recrearía las condiciones del reactor batch del ensayo de relación S/I con mayor potencial metanogénico, excepto la adición de nutrientes que componen el medio de cultivo.

Para el cálculo del volumen se consideró la ecuación:

$$\text{Volumen Digestor} = \text{Volumen Lodo} + \text{Volumen Sustrato} + \text{Agua} + \text{Factor Seguridad}$$

En este caso el factor de seguridad corresponde a un 30% de volumen libre en el biodigestor, ya que este es el porcentaje de espacio libre que fue usado en las botellas que funcionaron como reactores en los ensayos.

### 5.2.4.2 Volumen gasómetro

Para el cálculo del gasómetro se consideró la producción diaria potencial de biogás estimada para la planta piloto y el consumo de este de acuerdo a los lotes de cerveza producidos semanalmente y el gasto energético (gas) que esto conlleva.

Se consideró un margen operacional de una semana de producción de biogás, por lo tanto, el volumen del gasómetro debe ser suficiente para almacenar el biogás producido en dos semanas de operación normal del biodigestor.

$$\text{Volumen Gasómetro} = (\text{Vol. Biogas Generado}) + (\text{Vol. Margen operacional})$$

## 5.2.5 Evaluación económica

Se calculó el VAN del proyecto de la planta de biogás y el VAN de la situación actual de la cervecería artesanal modelo respecto al gasto en energía, mediante los métodos establecidos por Giltman y Zutter (2012).

### 5.2.5.1 Valor Actual Neto VAN

El VAN se determinó a partir de la ecuación:

$$VAN = -I_0 + \sum_{k=1}^{k=n} \frac{B_k - C_k}{(1+i)^k}$$

Donde

$I_0$  : Inversión inicial

$B_k$  : Beneficio o ingresos netos del periodo k (año k)

$C_k$  : Costos netos del periodo K

$i$  : Tasa de interés (llamada tasa de descuento)

$n$  : Años de duración del Proyecto

Luego los criterios para la toma de decisiones son:

$VAN > 0$ , el proyecto es rentable

$VAN = 0$ , es indiferente realizar

$VAN < 0$ , el proyecto no es rentable

## CAPITULO 6. RESULTADOS

### 6.1 Caracterización del inoculo

La caracterización experimental del inoculo (Lodos anaerobios) utilizado para llevar a cabo los ensayos de potencial metanogénico, y los resultados se muestran en la Tabla 5.

*Tabla 5 Parámetros físicos del lodo anaerobio*

| Parámetros | Unidad | Magnitud |
|------------|--------|----------|
| ST         | g/kg   | 5,017    |
| SV         | g/kg   | 4,047    |

### 6.2 Caracterización del sustrato

Se realizó también la caracterización experimental del sustrato (bagazo cervecero) para los distintos parámetros se presenta en la Tabla 6

*Tabla 6 Características físicas y químicas del bagazo cervecero*

| Parámetro | Unidad              | Magnitud |
|-----------|---------------------|----------|
| DQO       | gO <sub>2</sub> /kg | 1354,77  |
| ST        | %                   | 27,89    |
| SV        | %                   | 26,83    |
| %Humedad  | g/100g              | 72,11    |
| Carbono   | g/100g              | 50,80    |
| C/N       |                     | 25,9     |

## 6.3 Ensayos de potencial metanogénico

Los ensayos tuvieron una duración de 47 días. La finalización de estos se determinó debido a que el total de los ensayos alcanzó la estabilización de la producción acumulada de metano.

### 6.3.1 Ensayo S/I 0,5

El día 1 se obtuvo la mayor producción de metano tanto en las réplicas como en los blancos como se aprecia en el gráfico de la figura 12, luego existió un periodo en que la producción se mantuvo en el rango de los 30 y 40 ml por día para las réplicas 1 y 3, en tanto la réplica 2 tuvo un comportamiento distinto, ya que la producción de metano para esta réplica cayó considerablemente a 17,64 ml en el día 4, y luego aumentó sostenidamente entre el día 5 y el 14. Para las tres réplicas la generación de metano se estabilizó en valores muy similares a los producidos en el blanco luego del día 22.

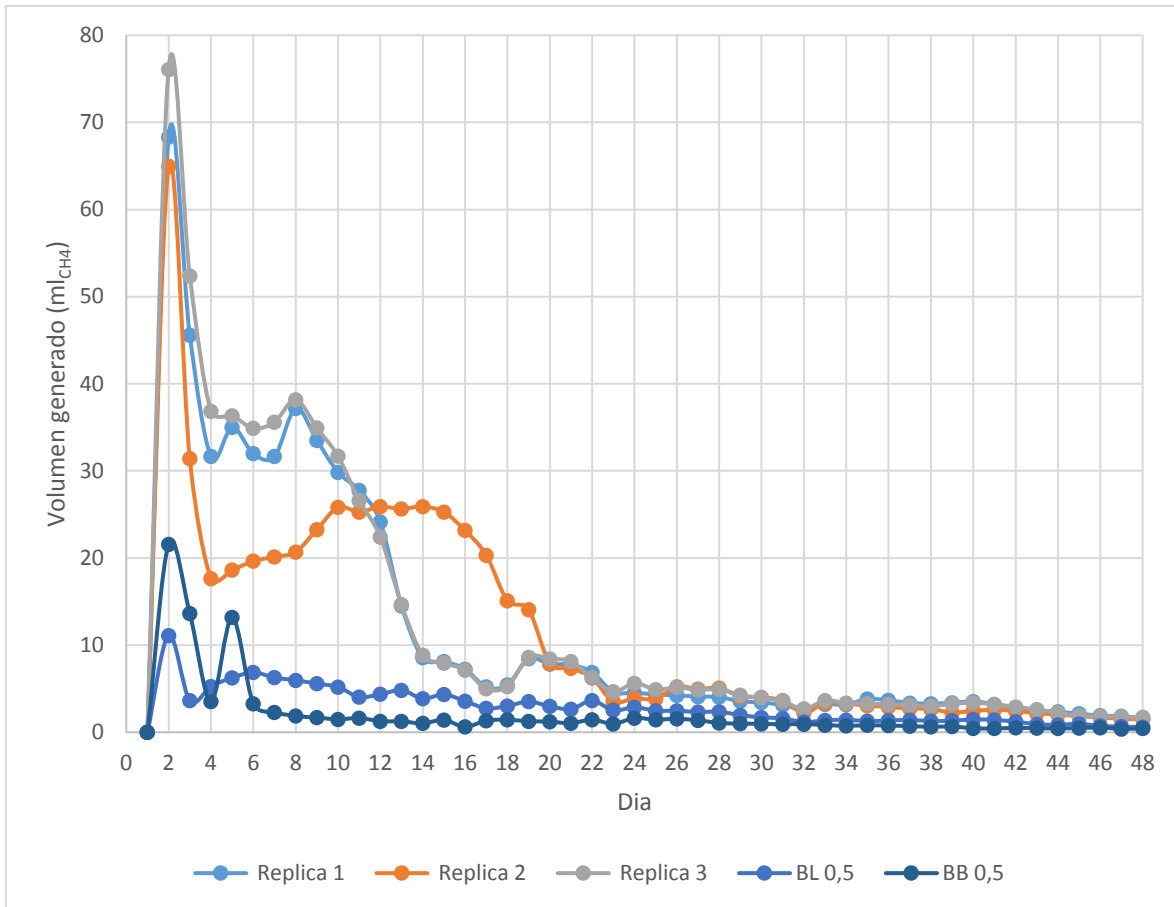


Figura 12 Medición diaria del volumen de metano generado en los ensayos S/I 0,5

### 6.3.2 Ensayo S/I 1

El día 1 se tuvo la mayor producción de metano en las tres réplicas y luego esta se redujo hasta alrededor de los 10 ml en el día 4 como se aprecia en el gráfico de la figura 13. El comportamiento de las réplicas fue similar durante los 47 días, la producción aumentó entre el día 5 y el día 21, y luego disminuyó sostenidamente. A partir del día 43 la producción en las réplicas fue muy poco superior a la producción en el blanco.

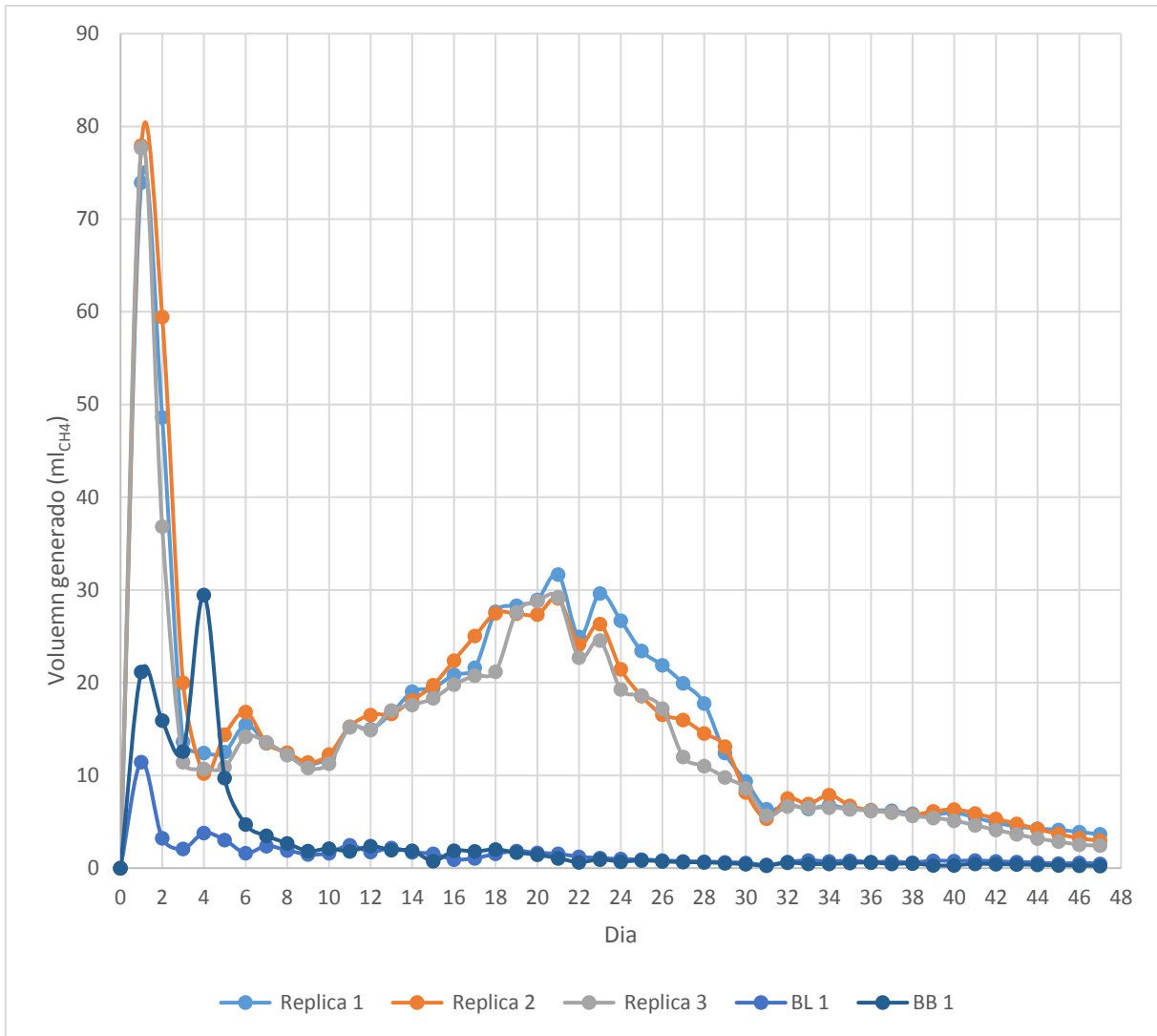


Figura 13 Medición diaria del volumen de metano generado en los ensayos S/I 1

### 6.3.3 Ensayo S/I 2

El día 1 se tuvo la mayor producción de metano en las tres réplicas y luego esta se redujo hasta alrededor de los 8 ml en el día 5 como se aprecia en el gráfico de la figura 14. El comportamiento de las réplicas fue similar durante el tiempo que duro el ensayo. El volumen de metano generado en las réplicas aumentó entre el día 6 y 23 y luego disminuyó sostenidamente.

En el día 46 y 47 los volúmenes de metano generado son muy poco superiores a los generados en el blanco

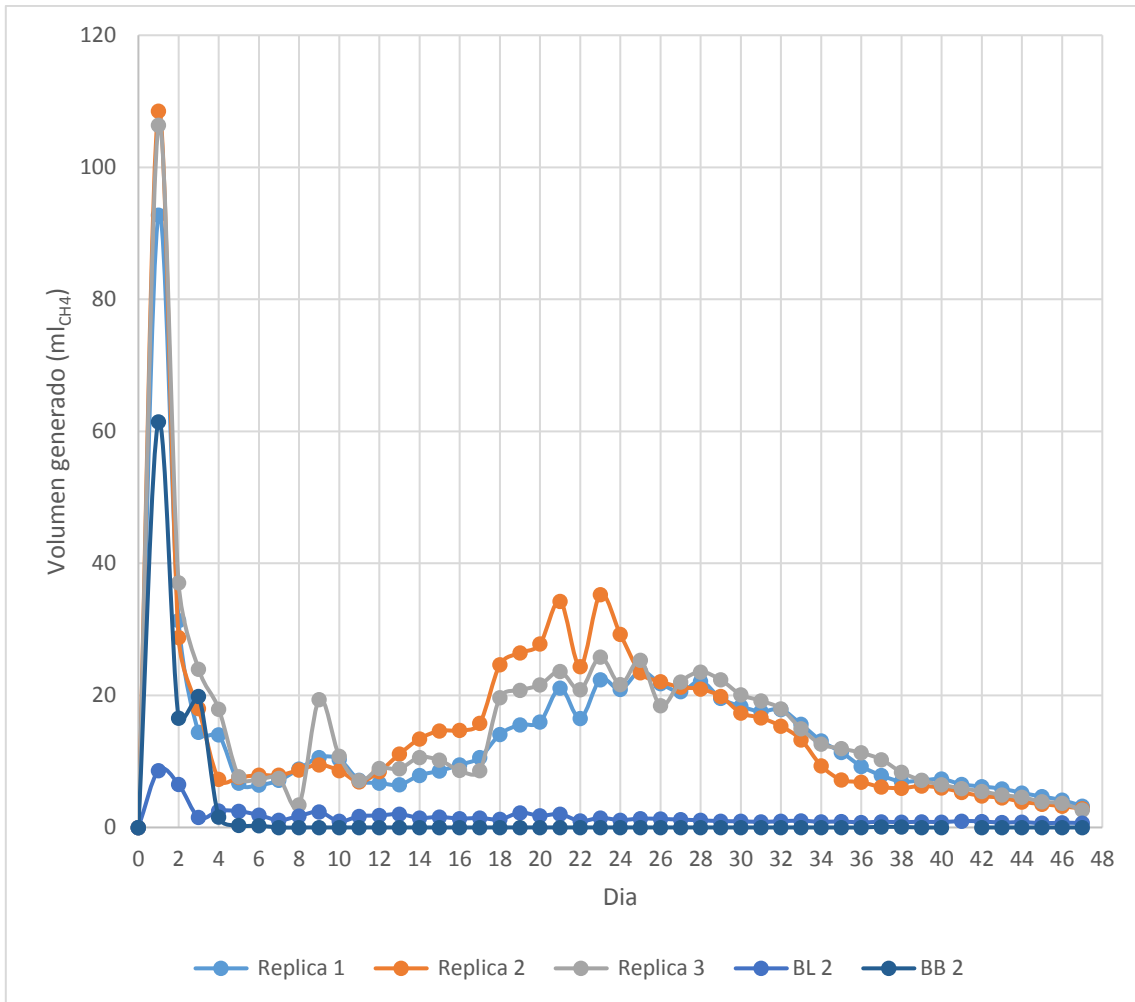


Figura 14 Medición diaria del volumen de metano generado en los ensayos S/I 2

## 6.4 Potencial metanogénico del bagazo cervecero

### 6.4.1 Metano acumulado para las distintas relaciones S/I

En la figura 15 se muestra el grafico en donde se representa el volumen de metano acumulado promedio generado durante el tiempo total de duración que tuvieron los ensayos para las relaciones S/I de 0,5, 1 y 2.

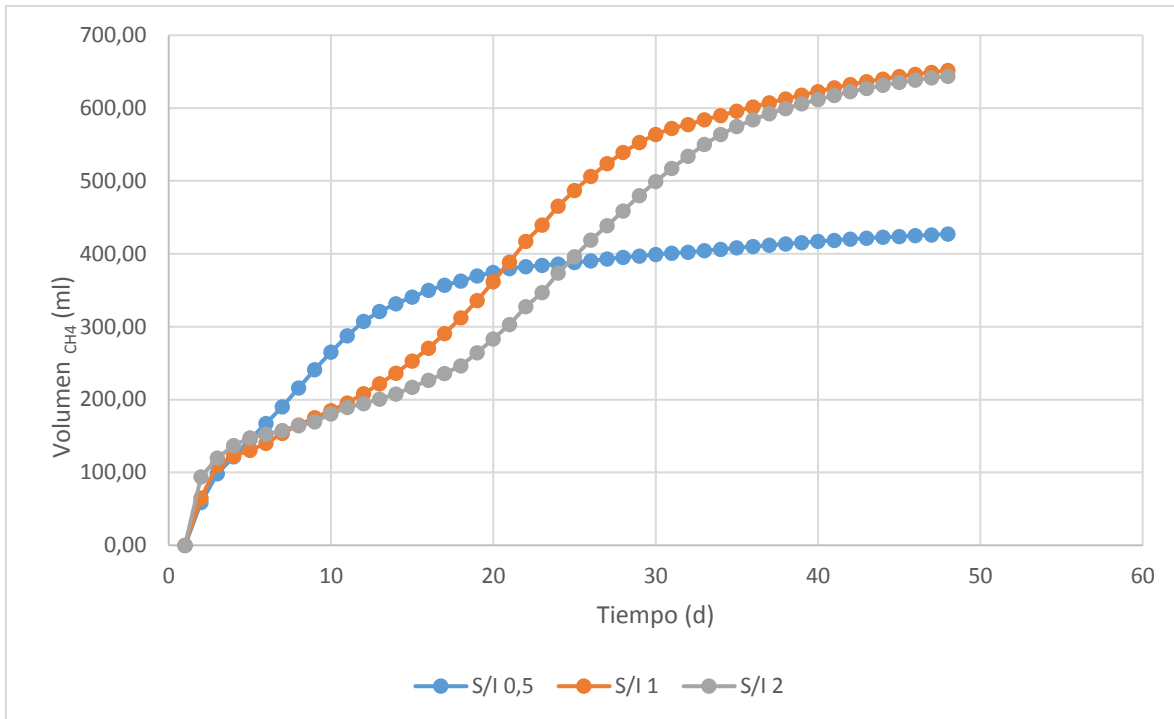


Figura 15 Volumen de metano acumulado para los ensayos de relaciones S/I 0,5, 1 y 2.

En cada serie de ensayos, se utilizó un una concentración de un 5% de solidos totales en cada reactor. El metano acumulado para cada relación sustrato/inoculo, corresponde al promedio entre las tres réplicas de cada ensayo menos el metano acumulado en el blanco de inoculo correspondiente.

La relación S/I 0,5 alcanzó un acumulado de 427,17 ml de metano, de los cuales la mayor cantidad fue producida durante los primeros 20 días. La relación S/I 1 alcanzó un acumulado final de 651,59 ml de metano, mientras que el acumulado de la relación S/I 2 llegó a los 643,87 ml. Ambos ensayos presentaron una atenuación en la generación de metano luego de los primeros dos días, pero los sistemas lograron recuperarse luego de los 15 y 20 días respectivamente.

#### 6.4.2 Metano acumulado respecto a los sólidos volátiles aportados por el bagazo de cerveza

En el gráfico de la figura 16 se presenta el promedio del volumen acumulado de CH<sub>4</sub> para cada ensayo por gramo de solido volátil aportado por el bagazo en el reactor.

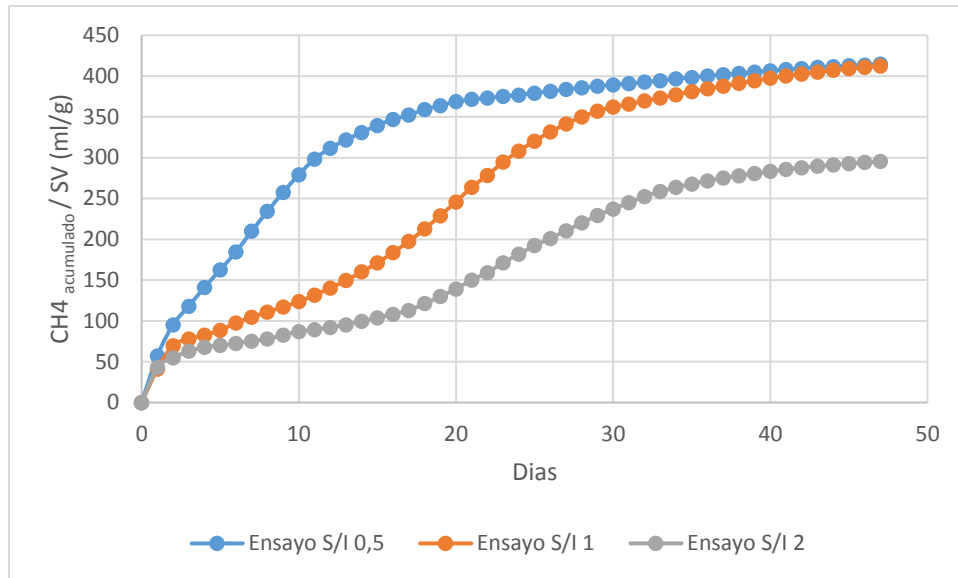


Figura 16 Volumen acumulado de metano por gramo de sólido volátil aportado por el bagazo cervecero.

El comportamiento que tuvieron los ensayos de las diferentes relaciones es el explicado anteriormente, pero se aprecia que los ensayos de relación S/I 0,5 y 1 lograron una generación de metano considerablemente superior al ensayo relación S/I 2 respecto a la materia orgánica disponible en los reactores. La producción acumulada de metano por gramo de sólido volátil aportado por el bagazo en los ensayos de relaciones S/I 0,5, 1 y 2, alcanzó de 414,72, 412,40 y 295,35 ml respectivamente al cabo de los 47 días.

### 6.4.3 Tiempo de residencia

Debido a que los ensayos lograron estabilizarse antes de los 47 días, para el cálculo del potencial metanogénico se tomó en cuenta como tiempo de residencia el periodo de tiempo en que la producción tuvo un aporte superior al 1% del acumulado de metano de cada ensayo, como se representa en el gráfico de la figura 17.

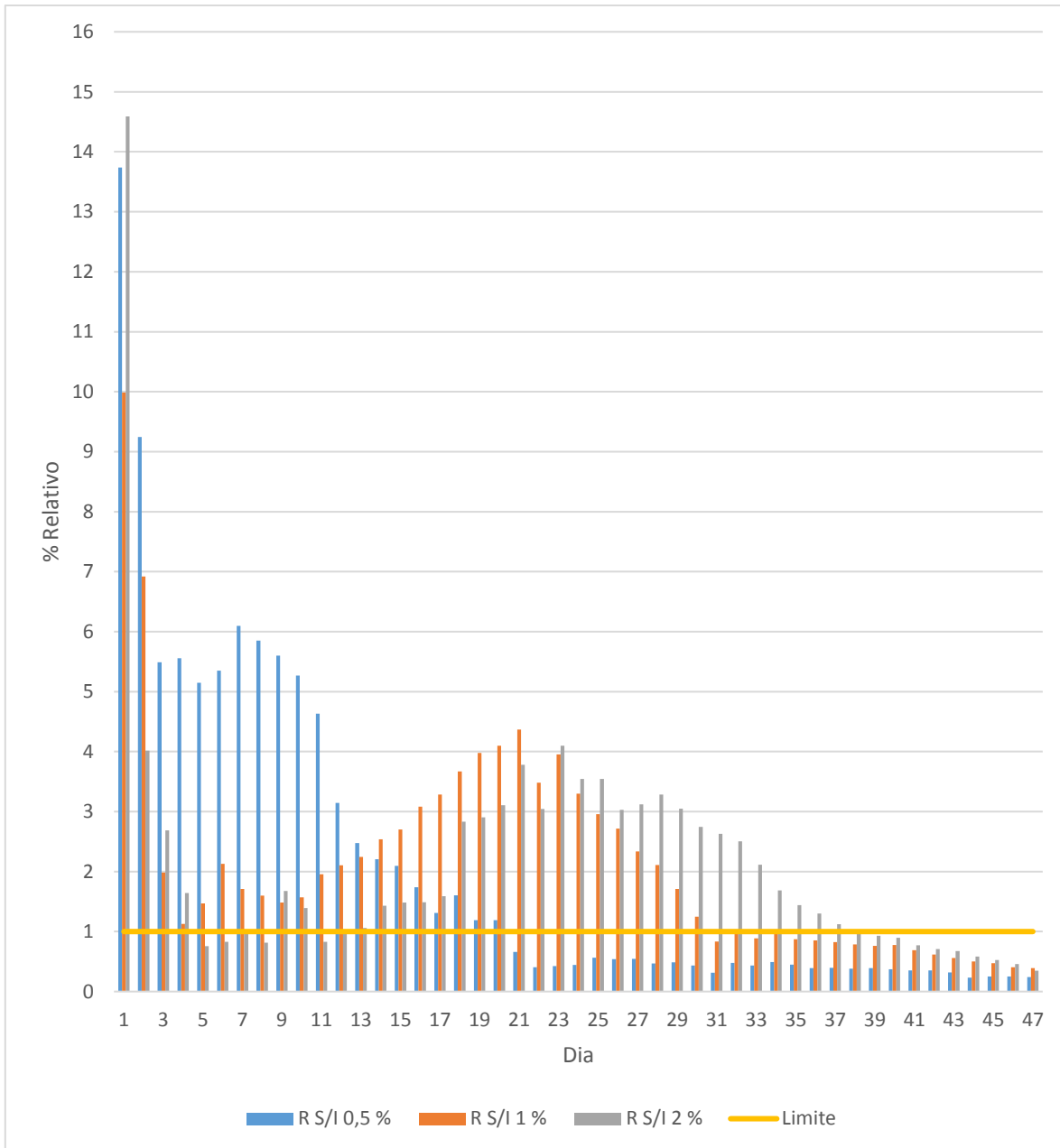


Figura 17 Producción diaria de metano respecto al total acumulado (Ensayos de relaciones S/I 0,5, 1 y 2)

Los ensayos S/I 0,5, 1 y 2 presentaron una generación de metano considerable hasta los días 20, 30 y 37 respectivamente. Este es el tiempo de residencia determinado para efectos de cálculo del potencial metanogénico para las tres alternativas. El volumen de metano que se considera es el promedio del volumen producido por las réplicas en los respectivos periodos.

### 6.4.4 Productividad

Se determinaron los índices de producción de metano para los ensayos S/I 0,5, 1 y 2, respecto tanto a la cantidad de sustrato como al tiempo requerido para producir la cantidad de metano correspondiente, respecto a los tiempos de residencia establecidos respectivamente (figura 18).

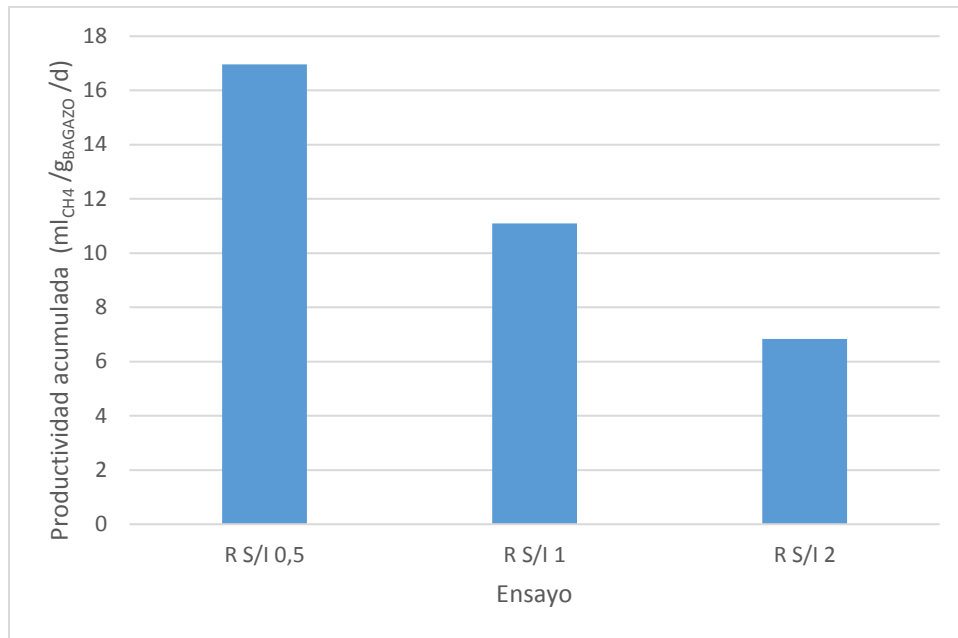


Figura 18 Producción acumulada de metano en los tiempos de residencia establecidos

El ensayo de relación S/I 0,5 obtuvo el mayor índice de producción diaria con 16,96 ml de CH<sub>4</sub> por gramo de bagazo seco por día.

### 6.4.5 Potencial metanogénico

El potencial metanogénico del bagazo cervecero en las distintas condiciones alcanzó los 339,16, 332,70 y 252,99 ml de CH<sub>4</sub> por gramo de bagazo seco para los ensayos de S/I 0,5, 1 y 2 respectivamente, como se muestra en el gráfico de la figura 19. Por lo tanto la opción que permite generar el mayor volumen de metano es la relación S/I 0,5. Y debido a esto, el potencial metanogénico que se consideró, es el obtenido en el ensayo S/I 0,5.

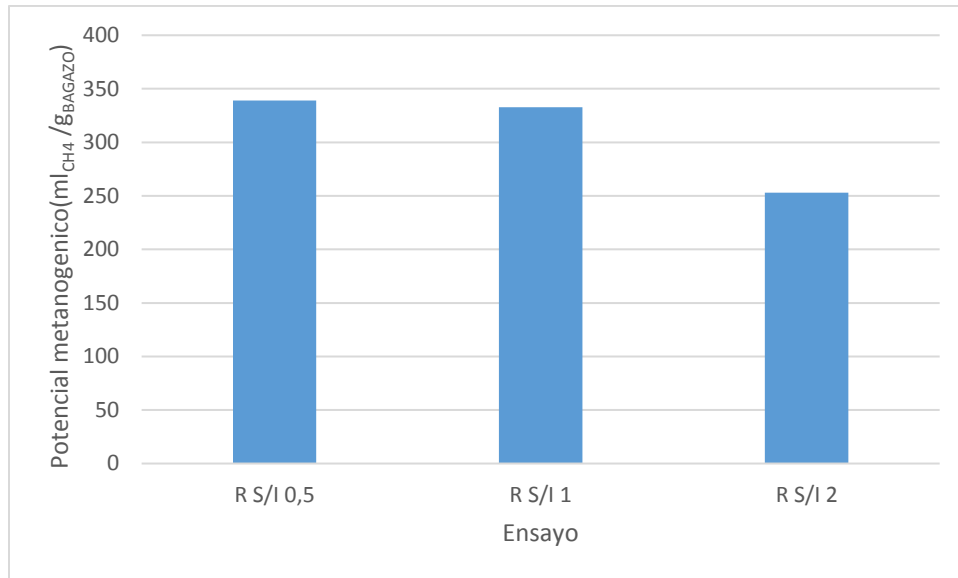


Figura 19 Potencial metanogénico determinado para los ensayos de relaciones S/I 0,5, 1 y 2.

De acuerdo a la caracterización del sustrato se tiene que este posee un 27,89% de sólidos totales, por lo tanto el potencial metanogénico del bagazo cervecero húmedo es 102,19 ml<sub>CH4</sub>/g<sub>Bagazo</sub> de acuerdo a la producción obtenida en el ensayo de relación S/I 0,5.

## 6.5 Requerimientos energéticos de la Cervecería artesanal modelo

### 6.5.1 Cervecería artesanal modelo

Como se representa en el esquema de la figura 20, la cervecería artesanal modelo consta de un calefont, encargado de calentar el agua para el proceso de maceración, y un quemador de alta presión encargado de llevar el mosto a temperatura de ebullición en la etapa de cocción, cuatro fermentadores de 200 litros disponibles para llevar a cabo la fermentación (durante 7 días) de 4 lotes de 200 litros de cerveza. Luego de la fermentación cada lote se lleva a una fermentación secundaria en barriles de plástico de 200 litros por una semana. El proceso culmina con el llenado de los barriles de aluminio de 50 litros en donde la cerveza alcanza la maduración y posteriormente es trasladada al punto de venta.

Actualmente el gasto energético del proceso productivo en la cervecería artesanal modelo es abastecido con gas licuado.

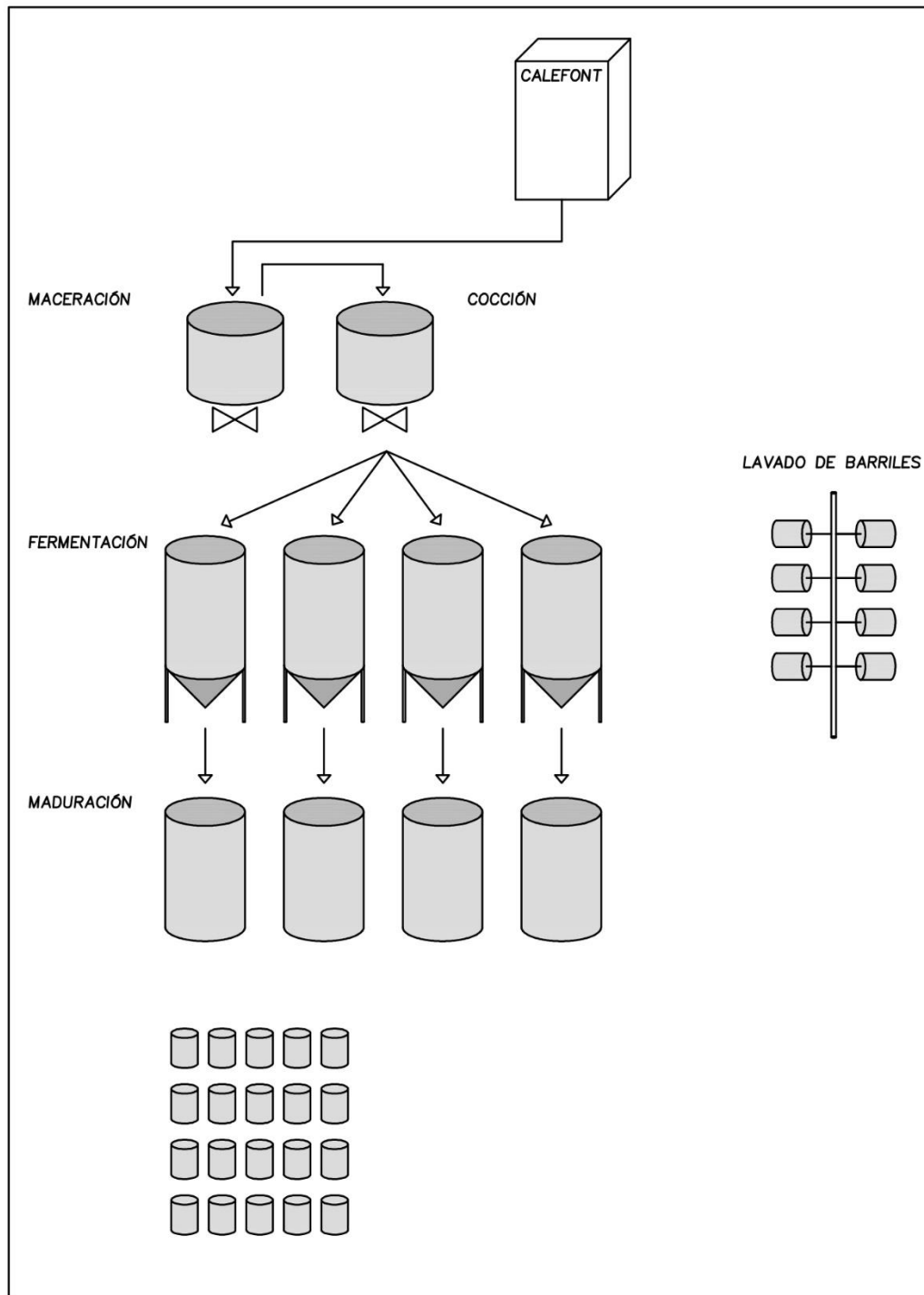


Figura 20 Esquema de planta de la cervecería artesanal modelo

### 6.5.2 Análisis de los procesos unitarios que requieren energía

Según lo indicado por el Director de la cervecería artesanal modelo, actualmente se elaboran 4 lotes semanales de cerveza, que corresponden a 200 litros de cerveza en total, y cuyo requerimiento energético asociado es abastecido mediante dos balones de gas licuado de 15 kg.

Los procesos que se consideran en el gasto energético son principalmente la maceración de los granos de cebada y la cocción del mosto, sin embargo también existe un gasto energético inferior en el lavado de equipos.

#### **Maceración**

En esta etapa se debe calentar 200L de agua mediante un “Calefont”, la cual es vertida en un recipiente (olla) que contiene aproximadamente 50 kg de malta. Luego en un quemador se debe llevar el contenido de 60 a 70°C. Se macera el grano por 1 hora y posteriormente se retira el líquido resultante (mosto), el cual se lleva a cocción.

Además el proceso de maceración contempla un lavado del grano para retirar los azúcares que quedan adheridos a estos luego de retirar el mosto. Se utiliza 1 litro de agua caliente por cada kilogramo de bagazo, es decir 50 litros de agua a una temperatura de 70°C, los cuales son calentados en el Calefont.

#### **Cocción**

En esta operación, se utiliza un quemador de alta presión para llevar el producto de la maceración (mosto) de 65°C a 100°C, y luego para mantener el mosto a esta temperatura por una hora aproximadamente.

#### **Limpieza de equipos**

En este procedimiento se utilizan 30 litros de agua a 80°C para limpiar cada uno de los 4 fermentadores en donde se mantuvo cada lote de cerveza durante una semana. Además para el transporte de la cerveza a su local de venta se utilizan 4 barriles de aluminio de 50 litros por cada lote, los que luego de ser utilizados cada uno es lavado con 10 litros de agua a 80°C.

### 6.5.3 Balance energético

De acuerdo al poder calorífico del gas licuado y al consumo semanal de este, se calculó el gasto energético actual de la cervecería para su producción mensual, como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7 Gasto energético diario y mensual en la cervecería artesanal modelo

| kcal/kgGLP | Producción semanal |                 | Gas diario kg | Gas mensual kg | kcal/mensual |
|------------|--------------------|-----------------|---------------|----------------|--------------|
|            | Lotes              | Balón 15kg/Lote |               |                |              |
| 12100      | 4                  | 2               | 4,286         | 128,6          | 1555714,3    |

Se requiere aproximadamente 1555714,3 kcal mensualmente para abastecer el proceso productivo de la cervecería artesanal modelo.

### 6.5.4 Generación de metano en planta de biogás

Se estimó la cantidad de metano que se podría producir si la cervecería implementara la planta de biogás, utilizando el potencial metanogénico determinado experimentalmente, y los volúmenes reales de producción de bagazo cervecero en la cervecería artesanal modelo.

La cervecería produce semanalmente 4 lotes de 200 litros de cerveza, y en cada uno se obtiene aproximadamente 50 kg de bagazo. En la tabla 8 se muestra el cálculo de la producción mensual estimada de bagazo para la línea de proceso operativa en la cervecería.

Tabla 8 Bagazo producido mensualmente en la cervecería artesanal modelo

| kg Bagazo/Lote | Lotes semanales | kg Bagazo/mes |
|----------------|-----------------|---------------|
| 50             | 4               | 857,14        |

Luego el metano que potencialmente se produciría durante un mes normal de operación normal se calculó de la siguiente manera:

$$Volumen\ metano\ mensual = 857,14 \frac{kg\ Bagazo}{mes} \times 102,19 \frac{ml\ Metano}{g\ Bagazo} * \frac{1}{1000}$$

$$\text{Volumen metano mensual} = 81,08 \frac{m^3}{mes}$$

### 6.5.5 Energía producida en planta de biogás

Se determinó la cantidad de energía que se aportaría mediante la producción de biogás, multiplicando el poder calorífico inferior del metano, que es aproximadamente 8006,93 kcal/m<sup>3</sup> según ICYTAL, por el volumen de metano que se generaría mensualmente.

$$\text{Energía} = 81,08 \left( \frac{m^3}{mes} \right) \times 8006,93 \left( \frac{kcal}{m^3} \right)$$

$$\text{Energía} = 649197,90 \left( \frac{kcal}{mes} \right)$$

Esta energía se utilizaría para abastecer la energía que se utiliza en el proceso productivo de cerveza.

Con una energía mensualmente producida de 694.851,34 kcal mediante la generación de biogás, es posible abastecer el 41,73% de la energía requerida para la producción mensual de cerveza en la planta.

## 6.6 Materia orgánica removida

Para calcular el porcentaje de DQO removida en los reactores anaerobios se llevó a cabo la medición de DQO en los ensayos tanto al comienzo como al término de estos.

Al comienzo, cada ensayo tiene una DQO total que corresponde a la suma de la DQO aportada por el bagazo cervecero y la DQO aportada por el inculo. Parte de la DQO aportada por el bagazo fue transformada a CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>. También una pequeña parte es utilizada en la reproducción celular de los microorganismos presentes en el inculo. El restante es DQO que no pudo ser removida.

### 6.6.1 DQO removida por método analítico

La DQO removida en la digestión anaeróbica determinada experimentalmente corresponde a la diferencia entre la DQO total inicial de cada ensayo y la DQO total final respectiva. Según el cálculo, los porcentajes de DQO removida correspondiente a los ensayos de relaciones S/I 0,5, 1 y 2 son los expuestos en la tabla N°9

Tabla 9 Valores de DQO obtenidos a partir de la determinación del porcentaje de Carbono orgánico

| Ensayo  | %C orgánico | DQO <sub>final</sub> (mg) | DQO <sub>inicial</sub> (mg) | %DQO <sub>Removida</sub> |
|---------|-------------|---------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| S/I 0,5 | 24,06       | 2008,59                   | 4468,44                     | 55,05±1,1                |
| S/I 1   | 26,38       | 2376,16                   | 4622,19                     | 48,59±2,9                |
| S/I 2   | 35,36       | 2587,58                   | 4785,22                     | 45,93±1,8                |

### 6.6.2 DQO removida por método teórico

Según la producción de metano alcanzada por los ensayos en los correspondientes tiempos de residencia fijados, se calculó la DQO teórica necesaria para generar el respectivo volumen de metano, contemplando las siguientes condiciones para el gas: presión de 1 atm, Temperatura de 25°C y comportamiento similar a un gas ideal (tabla 10).

Tabla 10 Valores de DQO removida teórica en la formación de metano

| Ensayo  | Volumen CH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> ) | Moles CH <sub>4</sub> | DQO <sub>Removida</sub> (mg) | DQO <sub>(bagazo)</sub> (mg) | %DQO <sub>Removida</sub> |
|---------|---|-----------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------|
| S/I 0,5 | 0,3799                                    | 0,01552               | 993,23                       | 1519,19                      | 65,38                    |
| S/I 1   | 0,5722                                    | 0,02338               | 1496,24                      | 2345,50                      | 63,79                    |
| S/I 2   | 0,5996                                    | 0,02450               | 1567,77                      | 3221,65                      | 48,66                    |

Los resultados indican que en el ensayo de relación S/I 0,5 se obtuvo una mayor remoción de DQO.

## 6.7 Diseño y selección de equipos

El diseño de la planta de biogás que se implementaría en la cervecería artesanal corresponde a un escalamiento a nivel real de los ensayos de potencial metanogénico de relación S/I 0,5, ya que esta alternativa de proporción entre sustrato e inóculo es la que

presentaría la mayor índice de producción de metano. Para esto se considera la tasa producción de bagazo semanal establecida, el tiempo de residencia determinado y que el lodo anaerobio a utilizar presentaría características similares al utilizado en laboratorio.

### 6.7.1 Acopio y almacenamiento del bagazo

La materia prima corresponde al bagazo cervecero generado en la microcervecería. Debido a que la planta de biogás se ubicaría aledaña a la planta cervecera o dentro de sus inmediaciones, no se requiere un medio de transporte para llevarla al biodigestor.

La materia prima se almacenaría en un estanque con capacidad suficiente para almacenar 100 kg de bagazo, lo que corresponde a la producción de 2 lotes de 200 litros de cerveza. La densidad del bagazo es  $1,115 \text{ g/cm}^3$  por lo tanto el volumen correspondiente requerido para soportar 100 kg es 111,500 L ( $0,1115 \text{ m}^3$ ).

### 6.7.2 Biodigestor

Se debe mantener un buen mezclamiento para evitar las posibles inhibiciones de los distintos grupos de microorganismos presentes, por ello la alternativa elegida es el biodigestor de mezclamiento vertical, ya que además permite una mayor eficiencia en la utilización de la materia prima disponible.

Se consideró un biodigestor construido de hormigón armado. Debe ser impermeable a fugas de agua y gas, además las paredes internas deben ser recubiertas con material anticorrosivo. Tanto para aumentar su vida útil como para evitar las pérdidas de calor en el reactor este debe contar con una capa de aislante como la lana mineral.

Las condiciones de operación del biodigestor deben ser las mismas utilizadas en los ensayos S/I 0,5 realizadas en laboratorio. Las proporciones de los elementos dentro del reactor también deben ser las mismas.

El volumen total que debe tener el reactor es  $15,157 \text{ m}^3$ , y con esto se espera tratar 200 kg semanales de bagazo, utilizando un tiempo de residencia de 20 días. Con esto se estima una producción de  $87,59 \text{ m}^3$  de metano mensualmente.

Para mantener una buena digestión es esencial un buen mezclamiento dentro del reactor, ya que permite a los microorganismos presentes utilizar la mayoría de la materia orgánica

disponible presente en la alimentación. A la vez asegura homogeneidad en la temperatura, pH y alcalinidad, evitando de esta forma las posibles inhibiciones de los microorganismos. El mezclamiento en el biodigestor se realizaría mediante agitación neumática a través de la inyección de biogás, ya que dentro del reactor existirá una mezcla lo suficientemente diluida para aplicar este sistema.

Para ello se utilizara un circuito de cañerías que permita en ingreso del biogás al reactor por el fondo de este, y una bomba que regulará el flujo del biogás.

### 6.7.3 Almacenamiento del biogás en gasómetro de bolsa

El gas será almacenado en un gasómetro de membrana, cuyo volumen calculado es el necesario para almacenar el biogás generado en 2 semanas de operación del sistema de biogás. Se consideran 2 semanas, ya que estas corresponden al biogás generado durante una semana que se dispondrá a modo de reserva y el biogás generado durante una semana de operación que se destinará para su uso en el proceso productivo.

Se estima un volumen de biogás generado mensualmente de 179,13 m<sup>3</sup> y semanalmente de 41,80 m<sup>3</sup>.

De acuerdo al volumen de producción de la planta, existen disponibles en el mercado gasómetros de bolsa de 20 y 50 m<sup>3</sup>.

Debido a que antes de que el biogás sea almacenado este debe pasar por el purificador, se considera que solo el 97% del biogás (correspondiente a la fracción de CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub>, cuyos porcentajes son presentados en la Tabla 11) llegará al gasómetro.

Tabla 11 Composición del biogás producido a partir de bagazo cervecero

| %CH <sub>4</sub> | %CO <sub>2</sub> | %N <sub>2</sub> | %H  | %O <sub>2</sub> | %H <sub>2</sub> S |
|------------------|------------------|-----------------|-----|-----------------|-------------------|
| 48,89874513      | 48,1012549       | 0-3             | 0-1 | 0-1             | 0-0,1             |

La configuración elegida para el almacenamiento, será la utilización de 2 bolsas de 50 m<sup>3</sup> de capacidad, con lo que se podrá cubrir el volumen estimado de biogás correspondiente a 2 semanas de producción, y además mantener un margen de seguridad de un 23,32% de capacidad volumétrica disponible para periodos en que disminuya la producción de cerveza.

Tanto para el resguardo del material de la bolsa, como para la optimización en el uso de espacio se debería mantener ambas bolsas en profundidad.

### 6.7.4 Purificación del biogás

La purificación del biogás se llevara a cabo en un tanque de desulfurización y deshidratación, cuyo funcionamiento se basa en la adsorción del H<sub>2</sub>S con la utilización de óxido de hierro.

El tanque disponible en el mercado para un sistema de biogás de esta envergadura tiene un volumen de 300 litros. El recambio del material adsorbente se debe realizar según las indicaciones del fabricante

### 6.7.5 Bombeo del biogás

Para la circulación del biogás hacia el almacenamiento se te utilizaría una bomba MA-180W Bas Push Pump. Correspondiente a la alternativa entregada por la empresa VENICETON para el sistema de biogás cotizado.

Esta bomba presenta las siguientes características de operación:

- Potencia nominal: 180W
- Tensión nominal: 220V/380V/50Hz
- Presión máxima: 9KPa
- Salida máxima: 18m<sup>3</sup>/h

### 6.7.6 Planta de Biogás

El sistema de generación de biogás a implementar en la cervecería artesanal modelo sería construido junto a la cervecería artesanal y utilizaría un área aproximada de 72 m<sup>2</sup>. La disposición de los equipos sería similar a como se muestra en la figura 21.

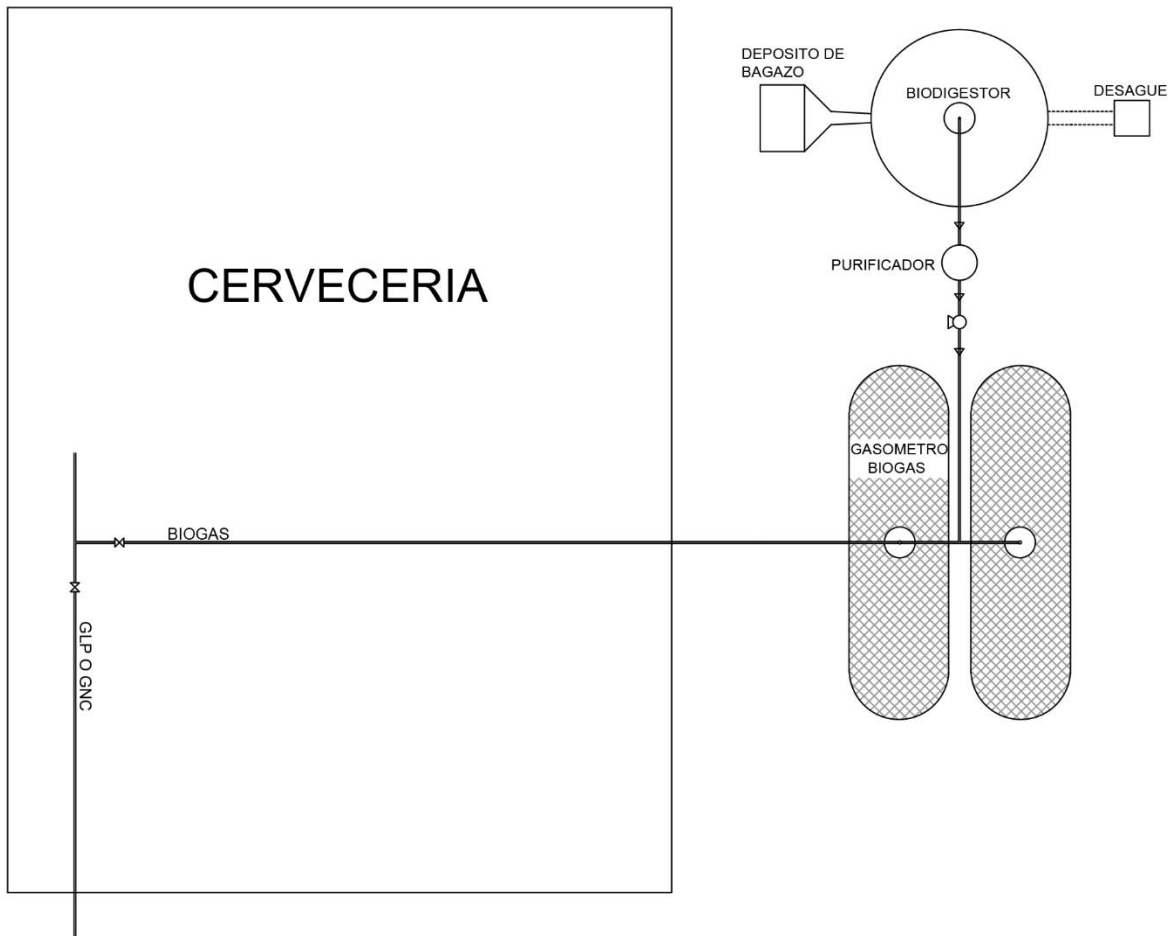


Figura 21 Sistema de biogás a implementar en la cervecería artesanal modelo, vista planta.

## 6.8 Factibilidad económica

### 6.8.1 Costos

#### 6.8.1.1 Costo de equipos

El costo de la mayor parte de los equipos es el estimado de acuerdo a una cotización entregada por la empresa extranjera VENICETON, la cual se muestra en el ANEXO 5. Debido a que los valores están designados en dólares, se tomara en cuenta un valor de dólar de 656 pesos chilenos.

En la tabla N°12 se muestra el costo de los principales equipos necesarios para instalar el sistema de biogás según la empresa VENICETON.

Tabla 12 Costo de equipos para la planta de biogás

| Equipo          | Unidades | Valor unitario (US\$) | Total (US\$) | Total (pesos) |
|-----------------|----------|-----------------------|--------------|---------------|
| Gasómetro Bolsa | 2        | 1.617                 | 3.234        | \$2.121.504   |
| Bomba           | 1        | 250                   | 250          | \$164.000     |
| Purificador     | 1        | 530                   | 530          | \$347.680     |
|                 |          |                       | Total        | \$2.633.184   |

Además, se estima que la red de cañerías y conexiones tendría un costo aproximado de un 25% del valor total de los equipos, lo que equivale a \$263.318 pesos. Mientras que la mano de obra para la instalación de los equipos y red de tuberías, representaría un valor aproximado de un 40% del valor total entre la suma del costo de los equipos y cañerías, lo que equivale a \$1.158.600 pesos.

#### 6.8.1.2 Costo de construcción del biodigestor

El costo de la construcción de la estructura del biodigestor, fue consultada a una empresa constructora. Este costo es un valor aproximado que tendría la obra terminada, incluyendo la excavación, materiales y construcción del biodigestor, utilizando hormigón armado y lana mineral como aislante. El valor asciende a \$3.973.124 pesos.

#### 6.8.2 Flujo de caja

Para realizar la evaluación económica se elaboraron dos flujos de caja, los cuales se presentan en las Tablas 21 y 22 del Anexo 6, uno presenta el gasto en gas licuado actual de la cervecería artesanal modelo, mientras que el otro muestra la inversión del proyecto de la planta de biogás propuesta y el gasto en gas licuado aplicándole el ahorro que se tendría mediante el aporte de metano al suministro, y teniendo en cuenta que el proyecto de la planta de biogás sería financiado mediante un préstamo bancario con una tasa de interés de 10% anual.

La cervecería artesanal muestra utilidades anuales de \$0 pesos, es por esto que no se consideran ingresos ni egresos por parte de esta que afecten en la evaluación económica del proyecto.

No se consideró personal a cargo de la planta de biogás, ya que el traslado del bagazo al estanque de acopio sería llevado a cabo por las mismas personas que trabajan en la elaboración de cerveza.

**6.8.2.1 Depreciación**

Se consideró una depreciación lineal de los equipos y el biodigestor, considerando una vida útil de 15 años y un valor residual de 0%, como se muestra en la Tabla 13.

*Tabla 13 Vida útil, Valor residual y depreciación anual para componentes de la planta de biogás.*

| Activo        | Vida útil (años) | Valor residual (pesos) | Depreciación anual (pesos) |
|---------------|------------------|------------------------|----------------------------|
| Equipos       | 15               | 0                      | \$175.545                  |
| Biodigestor   | 15               | 0                      | \$264.874                  |
| Total (pesos) |                  |                        | \$440.420                  |

**6.8.2.2 VAN**

Se calculó el VAN para el costo del gasto energético en la cervecería artesanal modelo tomando en cuenta un periodo de 15 años, para ambos casos, considerando la implementación del proyecto de la planta de biogás y sin considerarla, con el fin de realizar una comparación, como se muestra en la Tabla 14.

*Tabla 14 Comparación VAN con y sin planta de biogás*

| VAN sin proyecto (pesos) | VAN con proyecto (pesos) |
|--------------------------|--------------------------|
| -\$ 10.414.368           | -\$ 12.648.878           |

El VAN que se obtuvo considerando la implementación del proyecto es menor que el VAN que se tendría manteniendo la forma de abastecimiento de energía que tiene la cervecería artesanal actualmente.

### 6.8.3 Análisis de sensibilidad

Existen otros escenarios posibles para el proyecto debido a la posibilidad de poder cambiar las condiciones de operación en el biodigestor. De acuerdo a esto, se puede tener variaciones en el costo del biodigestor y el volumen de biogás generado, y por consecuencia, en el comportamiento económico del proyecto.

Una de las principales variables que asociada al volumen del digestor a utilizar es la concentración de sólidos totales de la mezcla. Mientras que el porcentaje de materia orgánica digerida es determinante en el volumen de biogás que se genera en relación a una misma cantidad de sustrato.

Para efectos del análisis de sensibilidad, los parámetros de operación que pueden presentar una optimización en el proyecto evaluado, son la concentración de sólidos totales y el porcentaje de materia orgánica removida mediante el tratamiento.

Según Bochmann, se puede conseguir un aumento de un 28% en la generación de metano utilizando un pretratamiento térmico para el bagazo cervecero. Mientras que, de acuerdo a los porcentajes de sólidos totales del bagazo y el inóculo, y manteniendo una relación S/I de  $0,5 \text{ gSV}_{\text{bagazo}}/\text{gSV}_{\text{lodo}}$  en la mezcla dispuesta en el reactor, se podría conseguir para esta, una concentración máxima de sólidos de 6,57%.

En este análisis se consideraron concentraciones de sólidos totales de 5%, 6% y 6,57%, y remociones de la materia orgánica de 65%, 83% y 100%. En la tabla 15 se presentan 9 escenarios posibles para la operación del biodigestor, y el VAN asociado a cada uno de estos.

Tabla 15 VAN del proyecto de biogás respecto a distintos escenarios de condiciones de operación para el biodigestor a utilizar en la cervecera artesanal

|   | Escenarios                              | ST%  | VAN (pesos)    |
|---|---|------|----------------|
| 1 | ST 5% y DQO <sub>REMOVIDA</sub> 65%     | 5,00 | -\$ 12.648.878 |
| 2 | ST 5% y DQO <sub>REMOVIDA</sub> 83%%    | 5,00 | -\$ 11.511.785 |
| 3 | ST 5% y DQO <sub>REMOVIDA</sub> 100%    | 5,00 | -\$ 10.481.966 |
| 4 | ST 6% y DQO <sub>REMOVIDA</sub> 65%     | 6,00 | -\$ 12.164.878 |
| 5 | ST 6% y DQO <sub>REMOVIDA</sub> 83%%    | 6,00 | -\$ 11.027.785 |
| 6 | ST 6% y DQO <sub>REMOVIDA</sub> 100%    | 6,00 | -\$ 9.997.966  |
| 7 | ST 6,57% y DQO <sub>REMOVIDA</sub> 65 % | 6,57 | -\$ 11.945.335 |
| 8 | ST 6,57% y DQO <sub>REMOVIDA</sub> 83%  | 6,57 | -\$ 10.808.243 |
| 9 | ST 6,57% y DQO <sub>REMOVIDA</sub> 100% | 6,57 | -\$ 9.778.424  |

El análisis de sensibilidad muestra el comportamiento económico del proyecto utilizando el VAN como indicador. En el gráfico de la Figura 22 se representa la influencia de cada parámetro estipulado, en la variación de la diferencia entre el VAN con y sin proyecto de biogás, en donde los valores positivos del  $\Delta$ VAN (color amarillo) indican mayor rentabilidad que la situación actual (abastecimiento de la energía mediante gas licuado).

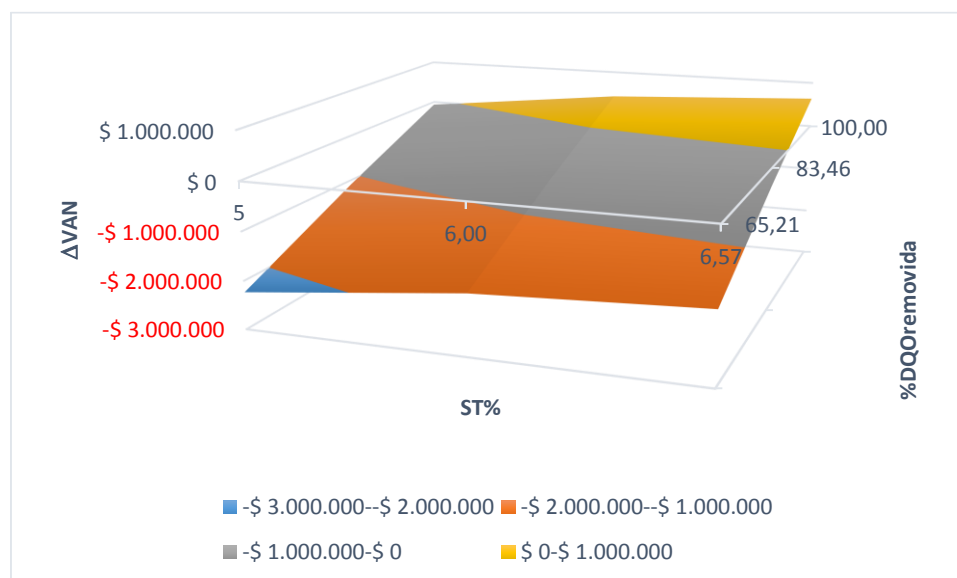


Figura 22 Comportamiento del VAN ante cambios operacionales (%ST Y %DQO removida), donde se representa la diferencia entre el VAN del proyecto y el VAN actual sin proyecto..

La disminución del costo del digestor se debe a que al aumentar la concentración de sólidos totales de la mezcla, disminuye la cantidad de agua presente, por lo tanto, el volumen requerido para el digestor disminuye. A su vez, el costo de construcción del reactor se reduce.

A su vez, si se tuviese un aumento en la DQO removida, en un mismo tiempo de residencia, la producción de metano también aumentaría, y con ello, el ahorro energético.

Al modificar estas variables de operación en el digestor, el comportamiento económico del proyecto sufre cambios.

Mediante el análisis de sensibilidad aplicado al proyecto de valoración energética del bagazo cervecero para la cervecería artesanal modelo, se obtuvo que al utilizar un porcentaje superior de sólidos totales en la digestión anaerobia el VAN del proyecto incrementa, y lo mismo ocurre al considerar mayores porcentajes de *DQO removida* en el bagazo, como se muestra en la figura 20.

Según las simulaciones realizadas utilizando los distintos escenarios, la variable *%DQO removida* tendría una mayor influencia sobre el VAN del proyecto versus la variable *%ST*, como se muestra en la tabla 16.

*Tabla 16 Porcentaje de variación del VAN del proyecto en los posibles escenarios respecto al valor del VAN de la propuesta de proyecto original. %ST v/s %DQO removida*

|               |        | %ST |     |      |
|---------------|--------|-----|-----|------|
|               |        | 5   | 6   | 6,57 |
| %DQO removida | 65,21  | 0%  | 4%  | 6%   |
|               | 83,46  | 9%  | 13% | 15%  |
|               | 100,00 | 17% | 21% | 23%  |

## CAPITULO 7. DISCUSIONES

Mediante las técnicas aplicadas, basadas en la literatura, los ensayos se llevaron a cabo sin inconvenientes y todas las mediciones fueron realizadas rigurosamente. Sin embargo existen ciertos factores que pueden intervenir en los resultados y esto debe ser considerado.

Fue posible producir biogás a partir del bagazo cervecero a través del tratamiento anaerobio y además se pudo establecer el potencial metanogénico que este residuo posee. Sin embargo se trata de un potencial metanogénico mínimo, resultado de ensayos en donde el proceso de digestión anaerobia no fue optimizado. A pesar de que se proporcionó las condiciones necesarias para que los microorganismos pudiesen desarrollarse y degradar la materia orgánica, existen otros factores que intervienen en la eficiencia de un reactor. Una agitación constante de la mezcla en el reactor permite a los microorganismos anaerobios mejorar el acceso al sustrato. También existen diferentes técnicas de pretratamiento que son aplicables al sustrato, y que permiten que los componentes degradables de la materia queden a disposición de los microorganismos responsables de la digestión anaerobia.

### 7.1 Desempeño de las distintas relaciones S/I

El desempeño de las relaciones experimentales en la producción de metano fue distinto entre sí. El ensayo con razón S/I 0,5 registro el mayor potencial metanogénico, con un tiempo de residencia de 20 días, lo que puede deberse a la mayor cantidad de microorganismos presentes en el reactor respecto a la cantidad de sustrato. Si bien el potencial metanogénico alcanzado por el ensayo de relación S/I 1 es cercano al obtenido por el ensayo de relación S/I 0,5, este se obtuvo en un tiempo de residencia de 30 días.

Los ensayos de relación S/I 1 y 2, presentaron un comportamiento con una gran producción de metano en los dos primeros días, luego un periodo en que los reactores generaron muy poco metano y posteriormente un nuevo repunte en la producción. Y esto puede estar influenciado por una posible acidificación de los reactores durante los primeros días de operación debido a la alta carga orgánica suministrada, pero donde el reactor finalmente logra recuperarse y normalizar el pH, ya que el pH de los ensayos determinado posteriormente a la finalización de estos resultó ser cercano 8.

## **7.2 Potencial metanogénico del bagazo cervecero**

Los potenciales metanogénicos del bagazo obtenidos en los ensayos de relaciones S/I 0,5 y 1 se aproximan a valores que se encuentran en la literatura.

Aunque el principio del método utilizado para la medición del metano generado mediante digestión anaerobia ha sido reportado en una gran cantidad de ensayos de potencial metanogénico, se podrían implementar nuevas tecnologías como la cromatografía de gases, en la identificación de las proporciones de los gases generados que componen el biogás. Y así de esta forma aumentar la fiabilidad de un resultado de potencial metanogénico.

## **7.3 Aporte de biogás al proceso productivo de la microcervecía**

El metano que se produciría a partir del bagazo cervecero podría ser utilizado en las operaciones de la cervecía en donde no se necesite un flujo de gas a alta presión, ya que las bolsas de biogás solo permiten almacenar el biogás a baja presión. De otra forma, para poder aportar metano a alta presión sería necesario comprimir el gas en cilindros de acero inoxidable mediante el uso de un compresor de gas, lo que representa una inversión considerablemente mayor, que no está al alcance de una cervecía de la envergadura de la cervecía artesanal modelo.

El aporte de biogás a la microcervecía podría ser considerablemente mayor optimizando la operación de un reactor y realizando pretratamientos al bagazo cervecero.

Además existen diferentes pretratamientos que podrían aplicarse al bagazo cervecero antes de ser dispuesto en el biodigestor que podrían producir un aumento en el porcentaje de materia orgánica disponible para los microorganismos.

## **7.4 Diseño de la planta de biogás**

Si bien los equipos han sido dimensionados de acuerdo a los resultados de la experiencia en laboratorio, puede existir un sobredimensionamiento para algunos de estos.

Los biodigestores a escala real por lo general operan con porcentajes de sólidos totales superiores a 5%. Por lo tanto se hace necesario validar la información realizando pruebas metanogénicas para el bagazo cervecero a una escala mayor.

Aunque los equipos que han sido estipulados son equipos reales adecuados para un sistema de biogás de esta envergadura según la empresa VENICETON, se podrían considerar otras alternativas posibles de conseguir en el país.

### **7.5 Factibilidad económica**

De acuerdo a la comparación de los flujos de caja sin proyecto y con proyecto de biogás, resultaría más rentable para la cervecería artesanal modelo mantener el uso de gas licuado para abastecer todo el gasto energético del proceso productivo. La implementación del sistema de biogás en la cervecería artesanal presenta un VAN inferior al VAN del flujo de caja en donde no se considera la implementación del sistema. Sin embargo, la diferencia entre las dos alternativas es mínima, y el proyecto puede ser optimizado.

De acuerdo al análisis de sensibilidad desarrollado, existen dos principales variables operativas del tratamiento que tienen estrecha relación con el comportamiento económico del proyecto. Según esto, si se aumentara la concentración de sólidos totales en la operación del reactor se necesitaría un menor volumen de este para llevar a cabo el tratamiento. A su vez, si se implementara un pretratamiento al bagazo cervecero antes de llevarlo al reactor, se podría obtener volúmenes superiores en la generación de metano. Ambos escenarios afectan de manera positiva y considerable a la rentabilidad del proyecto. Por esto es necesario desarrollar un estudio enfocado en la operación de un sistema anaeróbico a una escala mayor, donde se utilicen condiciones similares a las que existirían en un biodigestor a escala real, donde exista una agitación constante, y con ello, se pueda operar con concentraciones más altas de sólidos totales.

---

## CAPITULO 8. CONCLUSIONES

Se determinó que el bagazo cervecero tiene un potencial metanogénico de aproximadamente  $339,16 \text{ ml}_{\text{CH}_4}/\text{g}_{\text{bagazo}}$ . De acuerdo a este potencial y a la cantidad de bagazo generada mensualmente se podría producir un volumen de  $80,08 \text{ m}^3$  de  $\text{CH}_4$ /mes. Se estimó el gasto energético de la cervecería artesanal modelo basándose en el consumo de gas licuado semanal actual. La producción de cerveza requiere aproximadamente de  $1555714 \text{ kcal/mes}$ .

Se diseñó un sistema de generación de biogás, el cual consta básicamente de un biodigestor vertical, un desulfurizador de biogás, una bomba de gas y dos gasómetros de bolsa. Esta planta de biogás sería capaz de abastecer un  $41,73\%$  de la energía requerida por la cervecería artesanal mensualmente, destinando toda la producción de bagazo al tratamiento anaeróbico. Para el dimensionamiento del biodigestor se consideraron las mismas condiciones de operación de los ensayos, y con esto el volumen requerido para este sería de  $15 \text{ m}^3$ .

La evaluación económica determinó que llevar a cabo el proyecto de una planta de biogás para la cervecería artesanal modelo, es menos rentable que mantener el abastecimiento energético solo mediante la compra de gas licuado. Sin embargo la diferencia de ambos VAN es mínima y el proyecto es mejorable tanto en el sentido de disminuir la inversión como de generar volúmenes superiores de metano.

De acuerdo a los resultados de este estudio, es posible utilizar el bagazo cervecero como materia prima para la generación de energía, mediante el tratamiento anaeróbico y la producción de biogás a partir de este. Y el biogás generado puede ser utilizado en los procesos productivos de la cervecería, reduciendo de esta manera el consumo de gas licuado y el costo que esto representa.

Sin embargo se debe mejorar la rentabilidad del proyecto, lo cual se puede lograr reduciendo el volumen del digestor y el costo de este, y optimizando el proceso de digestión anaerobia para aumentar la producción de metano

## CAPITULO 9. BIBLIOGRAFÍA

- Asociación de productores de cerveza en Chile, A. (2007). *ACECHI*. Obtenido de [www.acechi.cl](http://www.acechi.cl)
- Bochmann, G., Drosch, B., & Fuchs, W. (2015). Anaerobic Digestion of Thermal Pretreated Brewers' Spent Grains. *Environmental Progress & Sustainable Energy (Vol.34, No.4)*, 1092-1096.
- Bohórquez, S. S. (2012). Aprovechamiento de Residuos Agroindustriales: Pasado, presente y futuro. *Revista de la Sociedad Mexicana de Biotecnología y Bioingeniería*, 15-17.
- Castells, X. E. (2012). *Tratamiento y Valorización energética de residuos*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, S.A.
- Chamy, R., & Vivanco, E. (2007). Identificación y clasificación de los distintos tipos de biomasa disponibles en Chile para la generación de biogás. *Potencial de biogás*, 15.
- Chamy, R., Carrera, J., Jeison, D., & Ruiz, G. (2003). *Avances en Biotecnología ambiental: Tratamiento de residuos líquidos y sólidos*. Valparaíso: Ediciones Universitarias de Valparaíso. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.
- Chernicharo, C. (2007). *Principios do tratamento biológico de águas residuárias. Universidad Federal de Minas Gerais. Vol V. Brasil*. Belo Horizonte.
- Comisión Nacional de Energía . (2007). *Potencial de biogas*. Santiago, Chile.
- Delacamara, G. (2008). *Guía para decisores*. Santiago.
- Espinoza, L. (1983). Parámetros de control en la digestión anaerobia. Valparaíso, Chile: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Facultad de Ingeniería.
- Field, J. (s.f.). *Medición de parámetros*. Holanda: Universidad agrícola de Wageningen.
- Figueruelo, J., & Marino, M. (2004). *Química física del ambiente y de los procesos medioambientales*. Barcelona: Reverté S.A.
- Foust, A., Wenzel, L., Clump, C., Maus, L., & Andersen, L. (2006). *Principios de operaciones unitarias*. México Cecsá.
- Gitman, L. J., & Zutter, C. J. (2012). *Principios de administración financiera*. Atlacomulco, México: PEARSON EDUCACION.
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. (2011). *Informe especial sobre fuentes de energía renovables y mitigación del cambio climático*. Michael Melford/National Geographic Stock.
- Horikawa, M. S. (2004). Chemical absorption of H<sub>2</sub>S for biogas purification. *Brazilian Journal of Chemical Engineering Vol. 21, No. 03*, 415 – 422.

- 
- Igoni, A., Ayotamuno, M., Eze, C., Ogaji, S., & Probert, S. (2007). Designs of anaerobic digesters for producing biogas from municipal solid-waste. *Applied Energy Vol. 85*, 430-438.
- Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. (2007). Atlas de la agroenergía y los biocombustibles en las Américas. San José, Costa Rica: Sede Central del IICA.
- Lens, P., Westermann, P., Haberbauer, M., & Moreno, A. (2005). *biofuels for fuel cells: Renewable energy from biomass fermentation*. Londres: IWA Publishing.
- Lesteur, M. e. (2010). Alternative methods for determining anaerobic biodegradability: A review. *Process Biochemistry*, 431-440.
- Lettinga, H., De Man, A., Grin, P., & Hulshoff Pol, L. W. (1987). Anaerobic wastewater treatment as an appropriate technology for developing countries. *La Tribune du Cebedeau, vol. 40*, 21-32.
- Metcalf, L., & Eddy, H. (1996). *Ingeniería de aguas residuales, tratamiento, vertido y reutilización*. México: Editorial McGraw-Hill. Tercera Edición.
- MIDEPLAN, M. d. (1998). inversión, Preparación y presentación de proyectos de inversión. Santiago, Chile: Alfabetas Impresores.
- Montalvo, J., & Guerrero, L. (2003). *Tratamiento anaerobio de residuos*. Valparaíso, Chile: Editorial Universitaria.
- Montes, M. E. (2008). Estudio Técnico-Económico de la digestión anaerobia conjunta de la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos y lodos de depuradora para la obtención de biogás.
- Musatto, S. I., Dragone, G., & Roberto, I. (2004). *Brewers' spent grain: generation, characteristics*. Brazil.
- Nogues, F. (2010). *Energía de la biomasa (VOL. II): Energías renovables*. Zaragoza: Prensas universitarias de Zaragoza.
- Pascual, J. (2011). *Rediseño y ensayo de un biodigestor en la granja experimental de la universidad autónoma de Chapingo*. Chapingo, Mexico: Tesis para optar al título de Ingeniero Mecánico Agrícola.
- Poirrier, P. (1998). *Degradación anaerobia de residuos sólidos industriales*. Valparaíso, Chile: Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Católica de Valparaíso.
- Pontt, C. (2008). *Potencial de biomasa en Chile*. Valparaíso: Universidad Técnica Federico Santa María.

- 
- Raposo, F. e. (2006). Influence of inoculum to substrate ratio on the biochemical methane potential of maize in batch tests. *ELSEVIER*, 1444-1450.
- Rios, I., & Paula, P. (2015). *Estimación del potencial metanogénico de lodos provenientes de una piscícola de salmones*. Valparaíso: trabajo de titulación para optar al título de Ingeniero Ambiental.
- Rodríguez, C. (2012). *Producción de biogás a partir del bagazo cervecero*. Santiago.
- Sanchez, C. (2004). *Diseño de una planta de tratamiento de la fracción orgánica de los RSU*. Valparaíso, Chile.: Tesis Ingeniero Bioquímico. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. .
- Seoáñez, M. (2001). *Tratado de gestión del medio ambiente urbano*. Mundi-Prensa.
- Servicios Profesionales en Web*. (16 de Junio de 2016). Obtenido de <http://www.spw.cl/proyectos/evaluacion.htm>
- Spinosa, L., & Vesilind, P. (2001). *Sludge Into Biosolids*. Londres: IWA Publishing.
- Torres, P., & Perez, A. (2010). *Actividad metanogénica específica: una herramienta de control y optimización de sistemas de tratamiento anaerobio de aguas residuales*. Cali.
- Townsley, P. (1979). *Preparation of commercial products from brewer's waste grain and trub*.
- Uzodinma, E., & Ofoefule, A. (2008). Effect of abattoir cow liquor waste on biogas yield of some agro-industrial wastes. En *Scientific Research and Essay Vol.3* (págs. 473-476). Nigeria: University of Nigeria.
- Varnero, M. T. (2011). *Manual de Biogás*. Santiago.
- Vigueras, S. (2002). *Digestión anaerobia en una y dos etapas de lodos residuales secundarios*. Iztapalapa.
- Yepes, S. M., Montoya, L. J., & Orozco, F. (2008). *Valorización de residuos agroindustriales – frutas – en Medellín y el sur del Valle del Aburrá, Colombia* . Medellín.
- Zagal, E., & Sadsawka, A. (2007). *Protocolo de métodos de análisis para suelos y lodos*. Chillan, Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía.

## CAPITULO 10. ANEXOS

### ANEXO 1 “ELABORACION DE LOS ENSAYOS DE POTENCIAL METANOGENICO”

Para la elaboración de los ensayos se utilizaron los componentes y cantidades de estos según los valores que se muestran en la tabla 17.

Tabla 17 Componentes de los Ensayos de potencial metanogénico

| ST % | Relación S/l | MasaBagazo/<br>MasaLodo | % SV<br>bagazo | % ST<br>bagazo | SV lodo | ST lodo | Masa<br>Bagaso<br>Seco |
|------|--------------|-------------------------|----------------|----------------|---------|---------|------------------------|
| 5    | 2            | 0,3017                  | 26,83          | 27,89          | 4,047   | 5,017   | 2,26                   |
| 5    | 1            | 0,1508                  | 26,83          | 27,89          | 4,047   | 5,017   | 1,72                   |
| 5    | 0,5          | 0,07541                 | 26,83          | 27,89          | 4,047   | 5,017   | 1,12                   |

| Relación S/l | Masa Bagazo<br>Hum. | Masa Bagazo<br>Hum. | Masa<br>Lodo | Densidad<br>Bagazo<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | D lodo | Vol.<br>bag<br>(ml) | Vol.<br>Lodo<br>(ml) |
|--------------|---------------------|---------------------|--------------|--|--------|---------------------|----------------------|
| 2            | 7,49                | 7,49                | 24,83        | 1,115                                      | 1      | 8,35                | 24,83                |
| 1            | 5,72                | 5,72                | 37,94        | 1,115                                      | 1      | 6,38                | 37,94                |
| 0,5          | 3,71                | 3,71                | 49,15        | 1,115                                      | 1      | 4,13                | 49,15                |

| Relación S/l | Solución<br>Macronutrientes<br>(ml) | Solución<br>Micronutrientes<br>(ml) | S (ml) | Levadura<br>(g) | Vol.<br>Total<br>(ml) | Vol.<br>Agua<br>(ml) |
|--------------|-------------------------------------|-------------------------------------|--------|-----------------|-----------------------|----------------------|
| 2            | 0,1                                 | 0,1                                 | 0,005  | 0,010           | 34,79                 | 35,21                |
| 1            | 0,1                                 | 0,1                                 | 0,005  | 0,010           | 45,61                 | 24,39                |
| 0,5          | 0,1                                 | 0,1                                 | 0,005  | 0,010           | 54,19                 | 15,81                |

## ANEXO 2 “MEDICIONES DIARIAS DE METANO”

Se registraron las mediciones diarias de metano tanto para los ensayos de las distintas relaciones, como para los blancos elaborados. Los datos de mediciones se encuentran en la tabla 18.

Tabla 18 Mediciones diarias de metano

|                            |                  | Replicas | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) |
|----------------------------|------------------|----------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                            |                  |          | 0                    | 1                    | 2                    | 3                    | 4                    | 5                    |
| Ensayos<br>Relación<br>S/I | S/I 0,5          | 1        | 0                    | 68,33                | 45,57                | 31,68                | 35,01                | 31,99                |
|                            |                  | 2        | 0                    | 64,97                | 31,4                 | 17,64                | 18,62                | 19,64                |
|                            |                  | 3        | 0                    | 76,06                | 52,39                | 36,83                | 36,34                | 34,89                |
|                            | S/I 1            | 1        | 0                    | 73,95                | 48,6                 | 13,65                | 12,43                | 12,54                |
|                            |                  | 2        | 0                    | 77,93                | 59,45                | 20,01                | 10,21                | 14,4                 |
|                            |                  | 3        | 0                    | 77,68                | 36,84                | 11,45                | 10,72                | 10,9                 |
|                            | S/I 2            | 1        | 0                    | 92,78                | 31,33                | 14,42                | 14,03                | 6,73                 |
|                            |                  | 2        | 0                    | 108,53               | 28,78                | 18,01                | 7,28                 | 7,58                 |
|                            |                  | 3        | 0                    | 106,36               | 37,08                | 24                   | 17,93                | 7,71                 |
| Blancos                    | Blanco<br>Lodo   | BL 0,5   | 0                    | 11,11                | 3,63                 | 5,27                 | 6,26                 | 6,86                 |
|                            |                  | BL 1     | 0                    | 11,45                | 3,22                 | 2,09                 | 3,78                 | 3,04                 |
|                            |                  | BL 2     | 0                    | 8,63                 | 6,53                 | 1,52                 | 2,51                 | 2,47                 |
|                            | Blanco<br>bagazo | BB 0,5   | 0                    | 21,55                | 13,64                | 3,54                 | 13,18                | 3,27                 |
|                            |                  | BB 1     | 0                    | 21,17                | 15,91                | 12,6                 | 29,46                | 9,71                 |
|                            |                  | BB 2     | 0                    | 61,43                | 16,58                | 19,85                | 1,56                 | 0,31                 |

| CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 6                    | 7                    | 8                    | 9                    | 10                   | 11                   | 12                   | 13                   | 14                   |
| 31,65                | 37,17                | 33,51                | 29,84                | 27,78                | 24,13                | 14,5                 | 8,55                 | 8,12                 |
| 20,14                | 20,7                 | 23,26                | 25,81                | 25,29                | 25,89                | 25,63                | 25,91                | 25,26                |
| 35,6                 | 38,17                | 34,94                | 31,7                 | 26,61                | 22,41                | 14,65                | 8,87                 | 7,94                 |
| 15,47                | 13,48                | 12,37                | 11,25                | 12,03                | 15,23                | 14,99                | 16,71                | 19,04                |
| 16,85                | 13,5                 | 12,45                | 11,4                 | 12,25                | 15,27                | 16,53                | 16,65                | 18,1                 |
| 14,18                | 13,57                | 12,19                | 10,81                | 11,28                | 15,18                | 14,89                | 17,02                | 17,61                |
| 6,45                 | 7,14                 | 8,86                 | 10,61                | 10,31                | 7,15                 | 6,73                 | 6,48                 | 7,9                  |
| 7,93                 | 7,91                 | 8,7                  | 9,48                 | 8,62                 | 6,91                 | 8,48                 | 11,12                | 13,43                |
| 7,31                 | 7,45                 | 3,41                 | 19,37                | 10,81                | 7,09                 | 8,94                 | 8,92                 | 10,62                |
| 6,27                 | 5,97                 | 5,58                 | 5,19                 | 4,06                 | 4,36                 | 4,83                 | 3,86                 | 4,34                 |
| 1,63                 | 2,38                 | 1,93                 | 1,48                 | 1,62                 | 2,47                 | 1,74                 | 2,18                 | 1,71                 |
| 1,88                 | 1,11                 | 1,74                 | 2,36                 | 0,94                 | 1,7                  | 1,82                 | 2,02                 | 1,45                 |
| 2,29                 | 1,87                 | 1,68                 | 1,49                 | 1,63                 | 1,27                 | 1,25                 | 1,02                 | 1,41                 |
| 4,73                 | 3,49                 | 2,67                 | 1,85                 | 2,12                 | 1,82                 | 2,37                 | 1,95                 | 1,89                 |
| 0,26                 | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    |

| CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 15                   | 16                   | 17                   | 18                   | 19                   | 20                   | 21                   | 22                   | 23                   |
| 7,26                 | 5,21                 | 5,43                 | 8,44                 | 7,84                 | 7,75                 | 6,88                 | 4,64                 | 4,53                 |
| 23,17                | 20,33                | 15,11                | 14,07                | 7,92                 | 7,34                 | 6,24                 | 3,52                 | 3,89                 |
| 7,13                 | 5,02                 | 5,26                 | 8,61                 | 8,43                 | 8,12                 | 6,25                 | 4,64                 | 5,63                 |
| 19,45                | 20,86                | 21,61                | 27,65                | 28,32                | 28,95                | 31,68                | 24,94                | 29,63                |
| 19,74                | 22,39                | 25,04                | 27,5                 | 27,45                | 27,34                | 29,1                 | 24,12                | 26,33                |
| 18,31                | 19,8                 | 20,75                | 21,2                 | 27,59                | 28,8                 | 29,24                | 22,72                | 24,57                |
| 8,58                 | 9,49                 | 10,61                | 14,1                 | 15,56                | 15,96                | 21,11                | 16,51                | 22,4                 |
| 14,63                | 14,72                | 15,8                 | 24,65                | 26,43                | 27,82                | 34,27                | 24,37                | 35,26                |
| 10,19                | 8,64                 | 8,61                 | 19,67                | 20,77                | 21,61                | 23,63                | 20,87                | 25,83                |
| 3,57                 | 2,75                 | 3,01                 | 3,52                 | 2,98                 | 2,66                 | 3,63                 | 2,53                 | 2,86                 |
| 1,55                 | 0,94                 | 1,07                 | 1,55                 | 1,86                 | 1,65                 | 1,54                 | 1,23                 | 1,09                 |
| 1,59                 | 1,35                 | 1,43                 | 1,23                 | 2,23                 | 1,78                 | 2,01                 | 0,98                 | 1,45                 |
| 0,62                 | 1,34                 | 1,43                 | 1,27                 | 1,22                 | 1,04                 | 1,44                 | 0,97                 | 1,63                 |
| 0,77                 | 1,87                 | 1,81                 | 2,01                 | 1,68                 | 1,44                 | 1,06                 | 0,64                 | 0,94                 |
| 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    |

| CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 24                   | 25                   | 26                   | 27                   | 28                   | 29                   | 30                   | 31                   | 32                   |
| 4,35                 | 4,23                 | 4,1                  | 4,04                 | 3,56                 | 3,42                 | 3,12                 | 2,64                 | 3,21                 |
| 3,84                 | 5,22                 | 4,96                 | 5,09                 | 4,12                 | 4,01                 | 3,64                 | 2,23                 | 3,36                 |
| 4,91                 | 5,14                 | 4,87                 | 4,93                 | 4,25                 | 3,96                 | 3,57                 | 2,67                 | 3,64                 |
| 26,7                 | 23,42                | 21,89                | 19,95                | 17,78                | 12,43                | 9,35                 | 6,36                 | 6,83                 |
| 21,45                | 18,56                | 16,54                | 15,98                | 14,54                | 13,12                | 8,18                 | 5,33                 | 7,52                 |
| 19,27                | 18,63                | 17,21                | 12                   | 11,01                | 9,78                 | 8,62                 | 5,67                 | 6,65                 |
| 20,91                | 23,67                | 21,8                 | 20,57                | 22,15                | 19,56                | 18,34                | 17,58                | 17,87                |
| 29,26                | 23,45                | 22,11                | 21,26                | 20,96                | 19,84                | 17,36                | 16,61                | 15,34                |
| 21,66                | 25,33                | 18,45                | 22,06                | 23,55                | 22,36                | 20,12                | 19,2                 | 17,97                |
| 2,48                 | 2,46                 | 2,33                 | 2,35                 | 1,97                 | 1,71                 | 1,59                 | 1,17                 | 1,36                 |
| 0,98                 | 0,93                 | 0,84                 | 0,74                 | 0,71                 | 0,64                 | 0,57                 | 0,35                 | 0,67                 |
| 1,12                 | 1,34                 | 1,29                 | 1,19                 | 1,08                 | 0,96                 | 0,93                 | 0,85                 | 0,94                 |
| 1,45                 | 1,54                 | 1,37                 | 1,07                 | 0,99                 | 0,97                 | 0,91                 | 0,94                 | 0,83                 |
| 0,71                 | 0,84                 | 0,72                 | 0,65                 | 0,62                 | 0,54                 | 0,42                 | 0,28                 | 0,58                 |
| 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    |

| CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 33                   | 34                   | 35                   | 36                   | 37                   | 38                   | 39                   | 40                   | 41                   |
| 3,18                 | 3,82                 | 3,67                 | 3,35                 | 3,29                 | 3,37                 | 3,55                 | 3,21                 | 2,79                 |
| 3,27                 | 3,06                 | 2,89                 | 2,74                 | 2,66                 | 2,26                 | 2,45                 | 2,59                 | 2,43                 |
| 3,35                 | 3,3                  | 3,22                 | 3,14                 | 2,99                 | 3,26                 | 3,38                 | 3,22                 | 2,91                 |
| 6,4                  | 6,77                 | 6,37                 | 6,25                 | 6,19                 | 5,86                 | 5,76                 | 5,98                 | 5,46                 |
| 6,94                 | 7,88                 | 6,74                 | 6,23                 | 6,03                 | 5,74                 | 6,12                 | 6,34                 | 5,91                 |
| 6,52                 | 6,54                 | 6,36                 | 6,18                 | 5,99                 | 5,63                 | 5,42                 | 5,12                 | 4,63                 |
| 15,63                | 13,11                | 11,39                | 9,26                 | 7,87                 | 6,96                 | 7,13                 | 7,33                 | 6,54                 |
| 13,29                | 9,35                 | 7,23                 | 6,85                 | 6,12                 | 5,96                 | 6,29                 | 5,98                 | 5,34                 |
| 14,94                | 12,63                | 11,94                | 11,31                | 10,28                | 8,35                 | 7,14                 | 6,46                 | 5,92                 |
| 1,42                 | 1,29                 | 1,35                 | 1,41                 | 1,29                 | 1,33                 | 1,46                 | 1,42                 | 1,21                 |
| 0,84                 | 0,73                 | 0,81                 | 0,66                 | 0,71                 | 0,61                 | 0,81                 | 0,77                 | 0,83                 |
| 1,02                 | 0,85                 | 0,91                 | 0,76                 | 0,87                 | 0,79                 | 0,87                 | 0,81                 | 0,97                 |
| 0,74                 | 0,8                  | 0,77                 | 0,71                 | 0,63                 | 0,66                 | 0,46                 | 0,43                 | 0,51                 |
| 0,46                 | 0,45                 | 0,55                 | 0,61                 | 0,46                 | 0,51                 | 0,29                 | 0,31                 | 0,47                 |
| 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0,09                 | 0,07                 | 0                    | 0                    |                      |

---

| CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) | CH <sub>4</sub> (ml) |
|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 42                   | 43                   | 44                   | 45                   | 46                   | 47                   |
| 2,51                 | 2,34                 | 2,13                 | 1,91                 | 1,83                 | 1,64                 |
| 2,19                 | 2,04                 | 1,85                 | 1,69                 | 1,55                 | 1,51                 |
| 2,63                 | 2,25                 | 1,91                 | 1,83                 | 1,77                 | 1,73                 |
| 4,88                 | 4,51                 | 4,26                 | 4,13                 | 3,89                 | 3,65                 |
| 5,32                 | 4,79                 | 4,21                 | 3,68                 | 3,22                 | 2,96                 |
| 4,12                 | 3,66                 | 3,19                 | 2,87                 | 2,53                 | 2,43                 |
| 6,19                 | 5,87                 | 5,23                 | 4,67                 | 4,13                 | 3,25                 |
| 4,76                 | 4,49                 | 3,88                 | 3,54                 | 3,21                 | 2,86                 |
| 5,47                 | 4,91                 | 4,57                 | 3,92                 | 3,65                 | 2,64                 |
| 0,94                 | 0,85                 | 0,97                 | 0,73                 | 0,65                 | 0,59                 |
| 0,74                 | 0,66                 | 0,61                 | 0,49                 | 0,56                 | 0,47                 |
| 0,91                 | 0,74                 | 0,81                 | 0,65                 | 0,72                 | 0,67                 |
| 0,47                 | 0,43                 | 0,49                 | 0,53                 | 0,39                 | 0,45                 |
| 0,42                 | 0,39                 | 0,36                 | 0,31                 | 0,27                 | 0,25                 |
| 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    | 0                    |

## ANEXO 3 “MEDICIONES DE PH Y DATOS PARA EL CALCULO DE AGV Y ALCALINIDAD”

Se midió el pH inicial en una muestra de cada ensayo y luego se tituló con HCl (0,1M). Se registraron los volúmenes gastados de HCl (0,1M) en la titulación de cada muestra, con el fin de obtener los datos para calcular la concentración de AGV y alcalinidad presentes en estas (Tabla 19).

Tabla 19 Mediciones de pH y datos para el cálculo de AGV y alcalinidad final

|         |   | pH inicial | pH Inicial → pH4,3<br>HCl (0,1M)<br>(ml) | pH5 → pH4<br>HCl (0,1M)<br>(ml) |
|---------|---|------------|--|---------------------------------|
| S/I 0,5 | 1 | 7,93       | 28,2                                     | 5,2                             |
|         | 2 | 8          | 28,1                                     | 2,6                             |
|         | 3 | 7,91       | 29,4                                     | 3,3                             |
| S/I 1   | 1 | 8,18       | 24,8                                     | 1,5                             |
|         | 2 | 8,08       | 25,2                                     | 1,7                             |
|         | 3 | 8,16       | 24,3                                     | 2                               |
| S/I 2   | 1 | 8,05       | 18,3                                     | 0,8                             |
|         | 2 | 8,13       | 19,7                                     | 1,2                             |
|         | 3 | 8,15       | 17,8                                     | 1,2                             |
| BL 0,5  | 1 | 7,3        | 2,6                                      | 0,5                             |
| BL 1    | 2 | 8          | 23,6                                     | 2,4                             |
| BL 2    | 3 | 7,76       | 17,7                                     | 1,5                             |
| BB 0,5  | 1 | 7,99       | 31,4                                     | 4,2                             |
| BB 1    | 2 | 8,92       | 34,5                                     | 4,9                             |
| BB 2    | 3 | 3,45       | 0  | 0                               |

## ANEXO 4 “DETERMINACIÓN DE LA DQO REMOVIDA”

En la Tabla 20 se presentan los resultados de las mediciones de DQO para los ensayos de potencial metanogénico, y el porcentaje de materia orgánico removido estimado para cada uno de estos.

*Tabla 20 Datos para el cálculo de la DQO removida. Método analítico*

| Ensayo R (S/l) | Replica | Final          | Inicial       |                   |              |            | % Remoción |
|----------------|---------|----------------|---------------|-------------------|--------------|------------|------------|
|                |         | mgDQO/g Ensayo | MgDQO/gEnsayo | mgDQO disponibles | mgDQO bagazo | mgDQO lodo |            |
| 0,5            | 1       | 613,94         | 1.246,06      | 4.361,20          | 1519,18      | 2.842,01   | 50,73      |
|                | 2       | 595,18         | 1.246,06      | 4.361,20          | 1519,18      | 2.842,01   | 52,23      |
|                | 3       | 594,73         | 1.246,06      | 4.361,20          | 1519,18      | 2.842,01   | 52,27      |
| 1              | 1       | 688,67         | 1.275,55      | 4.464,41          | 2345,49      | 2.118,91   | 46,01      |
|                | 2       | 718,87         | 1.275,55      | 4.464,41          | 2345,49      | 2.118,91   | 43,64      |
|                | 3       | 722,66         | 1.275,55      | 4.464,41          | 2345,49      | 2.118,91   | 43,35      |
| 2              | 1       | 985,91         | 1.301,25      | 4.554,37          | 3221,64      | 1.332,72   | 24,23      |
|                | 2       | 981,41         | 1.301,25      | 4.554,37          | 3221,64      | 1.332,72   | 24,58      |
|                | 3       | 942,99         | 1.301,25      | 4.554,37          | 3221,64      | 1.332,72   | 27,53      |

## **ANEXO 5 “COTIZACION VENICETON”**

La cotización elaborada por parte de la empresa extranjera VENICETON, en donde se detallan los equipos y materiales necesarios para la construcción del sistema de biogás se presenta en la Figura 23.








| Chongqing Veniceton Technology Co., Ltd.                       |  |   |   |            |              |                  |             |
|--|--|---|---|------------|--------------|------------------|-------------|
| Tel: 86-15025406314 Fax: 86-023-86687414 Email:63449802@qq.com |  |   |   |            |              |                  |             |
| Web:www.veniceton.en.alibaba.com                               |  |   |   |            |              |                  |             |
| QUOTATION  |  |   |   |            |              |                  |             |
| Purchaser To   |  |   |   |            | Date         |                  |             |
| Address  |  |   |   |            | P/L NO       |                  |             |
| Subject  | 150m3 Biogas system  |   |   |            |              |                  |             |
| Telephone/Fax  |  |   |   |            |              |                  |             |
| From   | Chongqing Veniceton Technology Co., Ltd  |   |   |            |              |                  |             |
| Contact  | Irene Zhang  |   |   |            | Sales        | +86 15025406314  |             |
| 150m3 Biogas Digester System                                   |  |   |   |            |              |                  |             |
| Model No.  | Description  | Picture Show  | Details                                 | Package    | Unit Price   | Suggest Quantity | Total Price |
| MB-150CB   | 1.2mm pvc+ mesh cloth  |    | 50m3<br>8*3*2m<br>Weight :<br>110kg/set | PVC Bag    | USD1617      | 3                | USD4851     |
| MSB-20CB   | 1.0mm pvc+ mesh cloth  |    | 20m3<br>4*2.5*2m<br>Weight: 60kg/set    | PVC Bag    | USD783       | 1                | USD750      |
| 300L Biogas Desulfurizer Tank& Biogas Dewater Tank             | Diameter*Height<br>504*1520MM  |  | -                                       | -          | USD530       | 1                | USD1100     |
| MA-180W Bas Push Pump  | Rated Power:180WRated Voltage:220V/380V/50HzMax Pressure: 9KPaMax Output: 18m³/h |  | 6kgs                                    | Carton box | USD250       | 1                | USD250      |
|  | The pipe connection desulfurization dehydration                                  |  |   | Carton box | USD340/SET   | 1                | USD340      |
| Hard pipe  | Material: PVC<br>Diameter: 16mm<br>Thickness: 1.6mm<br>Use for outdoor           |  | -                                       | Carton box | USD1/meter   | 30               | USD30       |
| Soft pipe  | Material: PVC<br>Inner Diameter: 8/10mm<br>Outer Diameter: 11.5/13.5mm           |  | -                                       | Carton box | USD0.7/meter | 10               | USD7        |

Figura 23 Cotización VENICETON para sistema de biogás.

## ANEXO 6 “FLUJOS DE CAJA”

Tabla 21 Flujo de caja para la implementación del sistema de biogás en la cervecería artesanal.

|                            | AÑO      |                 |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|----------------------------|----------|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                            | 0        | 1               | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        | 8        | 9        | 10       | 11       | 12       | 13       | 14       | 15       |
| Ingresos                   | 0        | 0               | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| Costos Fijos               | -1355244 | -997917         | -997917  | -997917  | -997917  | -997917  | -997917  | -997917  | -997917  | -997917  | -997917  | -997917  | -997917  | -997917  | -997917  | -997917  |
| Gas licuado                | -1355244 | -997917         | -997917  | -997917  | -997917  | -997917  | -997917  | -997917  | -997917  | -997917  | -997917  | -997917  | -997917  | -997917  | -997917  | -997917  |
| Costos Variables           | 0        | 0               | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| Depreciación de equipos    | -440421  | -440421         | -440421  | -440421  | -440421  | -440421  | -440421  | -440421  | -440421  | -440421  | -440421  | -440421  | -440421  | -440421  | -440421  | -440421  |
| Cuota préstamo             | -1035261 | -1035261        | -1035261 | -1035261 | -1035261 | -1035261 | -1035261 | -1035261 | -1035261 | -1035261 | -1035261 | -1035261 | -1035261 | -1035261 | -1035261 | -1035261 |
| Utilidad antes de impuesto | -2830926 | -2473599        | -2473599 | -2473599 | -2473599 | -2473599 | -2473599 | -2473599 | -2473599 | -2473599 | -2473599 | -2473599 | -2473599 | -2473599 | -2473599 | -2473599 |
| Impuesto                   | 0        | 0               | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| Utilidad Neta              | -2830926 | -2473599        | -2473599 | -2473599 | -2473599 | -2473599 | -2473599 | -2473599 | -2473599 | -2473599 | -2473599 | -2473599 | -2473599 | -2473599 | -2473599 | -2473599 |
| Ajuste (Dep. de equipos)   | 440421   | 440421          | 440421   | 440421   | 440421   | 440421   | 440421   | 440421   | 440421   | 440421   | 440421   | 440421   | 440421   | 440421   | 440421   | 440421   |
| Inversión Inicial          | -6869627 |                 |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Inversión mano de obra     | -1158601 |                 |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Flujo de caja              | 0        | -2390505        | -2033178 | -2033178 | -2033178 | -2033178 | -2033178 | -2033178 | -2033178 | -2033178 | -2033178 | -2033178 | -2033178 | -2033178 | -2033178 | -2033178 |
| VAN (0,12)                 |          | - \$ 12.648.878 |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |

Tabla 22 Flujo de caja para la situación energética actual de la cervecería artesanal modelo.

|                            | AÑO      |                |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
|----------------------------|----------|----------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                            | 0        | 1              | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        | 8        | 9        | 10       | 11       | 12       | 13       | 14       | 15       |
| Ingresos                   |          | 0              | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| Costos Fijos               | -1712571 | -1712571       | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 |
| Gas licuado                | -1712571 | -1712571       | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 |
|                            | 0        | 0              | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| Costos Variables           | 0        | 0              | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| Depreciacion de equipos    | 0        | 0              | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| Utilidad antes de impuesto | -1712571 | -1712571       | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 |
| Impuesto                   | 0        | 0              | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| Utilidad Neta              | -1712571 | -1712571       | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 |
| Ajuste (Dep. de equipos)   | 0        | 0              | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        | 0        |
| Inversion Inicial          | 0        |                |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Inversion mano de obra     | 0        |                |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |
| Flujo de caja              | 0        | -1712571       | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 | -1712571 |
| VAN (0,12)                 |          | -\$ 10.414.365 |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |