

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
NÚCLEO UNIVERSITARIO "RAFAEL RANGEL"  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
TRUJILLO ESTADO TRUJILLO

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN FERMENTADOR ANAERÓBICO PARA LA  
PRODUCCIÓN DE ETANOL A ESCALA DE LABORATORIO**

**Por:  
Juan Vicente Liendro Moncada**

Trabajo de grado presentado ante el Consejo de Departamento de Ingeniería de la Universidad de Los Andes, Núcleo Universitario "Rafael Rangel" como requisito parcial para optar al Título de Ingeniero Agrícola.

**Tutora Académica**

Italia Chinappi

**Tutor de Laboratorio**

Alonso Jerez

**Mayo, 2008**

## **DEDICATORIA**

Al Universo como un todo.

Y a mis tres divinas personas: María Celeste, Vicente Emilio y María del Valle.

## **AGRADECIMIENTOS**

Mediante estas palabras quiero hacer un gesto de gratitud a las personas e instituciones que colaboraron en la realización de este trabajo de investigación:

A los Profesores Italia Chinappi y Alonso Jerez; por el asesoramiento, consejos y ayuda brindada; a ustedes, mi admiración y agradecimiento por siempre.

Al Consejo de Desarrollo Científico, Humanístico y Tecnológico de la Universidad de los Andes (CDCHT); por el financiamiento de este proyecto de investigación (Código del proyecto: N.U.R.R - C - 477 - 07 - 02F).

Al Profesor Ulneiver Mejia; en representación de los Servicios Generales de la ULA-NURR; por la colaboración ofrecida en el suministro de materiales para la construcción del equipo.

A quienes de una u otra forma colaboraron en la realización de este proyecto; a todos, muchas gracias.

## INDICE GENERAL

|  | Pág.      |
|--|-----------|
| Dedicatoria .....  | 2         |
| Agradecimientos.....   | 3         |
| Indice general.....  | 4         |
| Indice de figuras.....   | 6         |
| Indice de tablas .....   | 0         |
| Indice de gráficos .....   | 1         |
| Resumen .....  | 2         |
| <b>CAPITULO I</b> .....  | <b>3</b>  |
| Introducción.....  | 3         |
| Planteamiento del problema.....  | 5         |
| Justificación.....   | 10        |
| Objetivos .....  | 13        |
| <b>CAPITULO II</b> .....   | <b>14</b> |
| <b>MARCO TEÓRICO</b> .....   | <b>14</b> |
| 2.1 Tipos de energía y energías alternativas.....  | 14        |
| 2.2 Energía de Biomasa.....  | 14        |
| 2.3 Procesos de Conversión .....   | 16        |
| 2.4 Tipos de Biomasa.....  | 17        |
| 2.5 Potenciales de la Biomasa .....  | 18        |
| 2.6 Biocombustibles .....  | 19        |
| 2.7 Biocombustibles líquidos.....  | 19        |
| 2.8 El Etanol.....   | 20        |
| 2.9 Fermentación alcohólica.....   | 24        |
| 2.10 El Fermentador o bioreactor.....  | 27        |
| 2.11 La Destilación.....   | 28        |
| 2.12 Análisis y Mediciones .....   | 29        |
| 2.13 Las Levaduras.....  | 30        |
| <b>CAPITULO III</b> .....  | <b>32</b> |
| <b>MATERIALES Y MÉTODOS</b> .....  | <b>32</b> |
| 3.1 Fermentador anaeróbico para la producción de etanol .....  | 32        |
| 3.2 Sistema de refrigeración/calefacción.....  | 38        |
| 3.3 Sistema de destilación para la separación del etanol del sustrato .....                                | 40        |
| 3.4 Dispositivos de conducción y conexiones .....  | 43        |
| 3.5 Dispositivos de aislamiento térmico .....  | 47        |
| 3.6 Calibración del equipo de fermentación .....   | 49        |
| 3.7 Ensayo de destilación y condensación del etanol mediante el sistema de refrigeración/calefacción ..... | 51        |
| 3.8 Ensayo de fermentación alcohólica y destilación .....  | 52        |
| 3.9 Banca de soporte de los elementos del sistema .....  | 54        |
| <b>CAPITULO IV</b> .....   | <b>56</b> |
| <b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....  | <b>56</b> |
| 4.1 Calibración del equipo de fermentación .....   | 56        |

|  |    |
|--|----|
| 4.2 Ensayo de destilación y condensación del etanol mediante el sistema de refrigeración/calefacción ..... | 62 |
| 4.3 Ensayo de fermentación alcohólica y destilaciones sucesivas.....                                       | 64 |
| <b>CAPITULO V</b> .....  | 69 |
| <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....  | 69 |
| 5.1 Conclusiones.....  | 69 |
| 5.2 Recomendaciones.....   | 70 |
| <b>BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA</b> .....   | 72 |
| <b>ANEXOS</b> .....  | 77 |
| Materiales para el ensayo de fermentación alcohólica.....  | 77 |
| Manual para la operación del equipo .....  | 77 |
| Manual para el mantenimiento del equipo.....   | 80 |

## INDICE DE FIGURAS

|   | Pág. |
|---|------|
| FIGURA 1: Clasificación de las energías alternativas .....  | 22   |
| FIGURA 2: Procesos de producción de alcohol de caña de azúcar .....   | 33   |
| FIGURA 3: Micrografía electrónica de barrido de <i>Saccharomyces cerevisiae</i> .....   | 38   |
| FIGURA 4: Anillos metálicos, ganchos y tornillos de sujeción del bioreactor.....  | 40   |
| FIGURA 5: Dispositivo para el monitoreo de la temperatura del sustrato en los<br>procesos de fermentación.....                            | 41   |
| FIGURA 6: Monitoreo de la temperatura de los compuestos volátiles en el interior<br>del bioreactor durante el proceso de destilación..... | 42   |
| FIGURA 7: Orificios en la tapa del fermentador. ....  | 43   |
| FIGURA 8: Copa de aluminio adosada a la tapa del fermentador.....   | 44   |
| FIGURA 9: Sistema de refrigeración/calefacción. ....  | 45   |
| FIGURA 10: Calentador eléctrico. ....   | 47   |
| FIGURA 11: Condensador. ....  | 48   |
| FIGURA 12: Estufa eléctrica usada como fuente de calor en el proceso de<br>destilación.....   | 49   |
| FIGURA 13: Vista interna del condensador. ....  | 50   |
| FIGURA 14: Dispositivos de conducción.....  | 52   |
| FIGURA 15: Dispositivos de conducción del etanol. ....  | 53   |
| FIGURA 16: Red de distribución de la fuente de agua.....  | 54   |
| FIGURA 17: Dispositivos de aislamiento térmico. ....  | 56   |
| FIGURA 18: Manta térmica. ....  | 56   |
| FIGURA 19: Banca construida para el soporte de los elementos del sistema de<br>fermentación.....  | 62   |

## INDICE DE TABLAS.

|  | Pág. |
|--|------|
| TABLA 1: Propiedades físicas del etanol anhidro .....  | 28   |
| TABLA 2: Impacto del etanol sobre el medioambiente.....  | 29   |
| TABLA 3: Producción mundial de alcohol etílico (2004).....   | 30   |
| TABLA 4: Caudales promedios para cada una de las aberturas de la válvula del sistema de distribución de agua .....                               | 63   |
| TABLA 5: Mediciones de la temperatura del bioreactor en el transcurso del tiempo para diferentes caudales promedio.....                          | 64   |
| TABLA 6: Mediciones de temperatura del agua de refrigeración del condensador en el transcurso del tiempo, para diferentes caudales promedio..... | 67   |

## INDICE DE GRÁFICOS

|   | Pág. |
|---|------|
| GRÁFICO 1: Curvas de calibración del bioreactor .....   | 64   |
| GRÁFICO 2: Curvas de calibración del condensador .....  | 67   |
| GRÁFICO 3: Curva del ensayo de destilación usando el sistema de<br>refrigeración/calefacción..... | 69   |
| GRÁFICO 4: Curva del ensayo de destilación del etanol hidratado.....                              | 73   |



## RESUMEN

En virtud de la carencia de equipos en el Laboratorio de Energía y Mecanización Agrícola de la ULA-NURR; aunado al problema de recalentamiento planetario y consecuente cambio climático, producto principalmente de las desequilibradas emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera; se plantea la necesidad de diseñar y construir una fermentador anaeróbico para la producción de etanol a escala de laboratorio; como una manera de contribuir al estudio de fuentes energía alternas. Para ello se construyo el fermentador propiamente dicho, el sistema de destilación del etanol y se realizaron una serie de ensayos y pruebas con la finalidad de: calibrar cada uno de los elementos que conforman el sistema de fermentación alcohólica y a su vez, evaluar y verificar el correcto funcionamiento del equipo fermentativo; se elaboró además una guía o manual de operaciones y mantenimiento del equipo para los diferentes usuarios del sistema en las labores de docencia e investigación.

# CAPITULO I

## INTRODUCCIÓN

La humanidad se enfrenta actualmente a una crisis energética de proporciones globales. La actual y creciente demanda energética y el uso extendido de los combustibles fósiles, han contribuido notablemente al recalentamiento de nuestro planeta, dando origen al denominado “Cambio Climático”; producto éste, de las desequilibradas emisiones de gases de invernadero.

El uso de fuentes de energía alternas; como es el caso de la Biomasa y dentro de ésta, el uso de los biocombustibles; específicamente del Etanol, cuyo proceso de obtención se encuentra relacionado directamente con la agricultura; representan opciones válidas para el desarrollo de un sistema energético con características más ecológicas y ambientalmente menos adversas que el uso de los combustibles fósiles. En tal sentido y debido a la carencia de equipos que se presenta actualmente en el Laboratorio de Energía y Mecanización Agrícola del Núcleo Universitario “Rafael Rangel” de la Universidad de los Andes en Trujillo; se plantea el diseño y la construcción de un fermentador anaeróbico para la producción de Etanol a escala de laboratorio, contribuyendo con la dotación de dicho laboratorio, en la búsqueda de promover las actividades primordiales de la Universidad: docencia, investigación y extensión; en el contexto de la carrera de Ingeniería Agrícola.

La metodología empleada para lograr el objetivo; plantea la necesidad de diseñar y construir el fermentador anaeróbico propiamente dicho (para la producción de Etanol); el sistema de refrigeración/calefacción del fermentador (para mantener temperaturas idóneas en el proceso de fermentación); el sistema de destilación (para separar el Etanol del sustrato); además de verificar y evaluar el funcionamiento del reactor construido (con la finalidad de comprobar su funcionalidad) y por último elaborar una guía para la operación y mantenimiento del equipo fermentativo (con el fin que profesores y estudiantes lleven a cabo con éxito la práctica de laboratorio).

## PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los recursos energéticos han sido desde siempre la base sobre la cual se han desarrollado y sustentado todas las actividades de la civilización humana y en las cuales destaca el uso de fuentes renovables de energía. Una vez ocurrida la revolución industrial, la cual desencadenó un aumento creciente de las necesidades energéticas; se produjo un cambio en el patrón de uso de los recursos energéticos, produciéndose gradualmente un acercamiento a la utilización de fuentes de energía no renovables, donde destacan los combustibles fósiles; principalmente carbón y petróleo (Schoijet, 2002).

En la actualidad, los hidrocarburos se han convertido en la principal fuente de energía para los países industrializados, que a su vez son los mayores consumidores de energía del planeta. A la par de esto, ha mermando el uso de fuentes renovables de energía, para satisfacer las necesidades humanas, a pesar de que la mayor parte de los países del globo mantienen fuentes energéticas renovables como principal recurso para el desarrollo de sus actividades.

Actualmente, las energías renovables proporcionan alrededor del 20% del suministro energético mundial, siendo la mayor contribución la proveniente de las centrales hidroeléctricas y de la biomasa, como la quema de madera y de paja. Los combustibles fósiles, encabezados por el petróleo, suponen cerca de tres cuartos del total, mientras que la nuclear aporta el 5,6% (López, 2002).

El mundo encara el agotamiento progresivo de sus recursos energéticos basados mayoritariamente en combustibles no renovables. Al mismo tiempo, el consumo de energía aumenta a ritmos cada vez más crecientes. De otro lado, el consumo global de combustibles genera enormes cantidades de gases contaminantes que son liberados a la atmósfera. Este tipo de contaminación ha causado cambios en el clima del planeta por lo que se ha convertido en una de las problemáticas que más preocupan a los gobiernos, las ONG's, las comunidades y la opinión pública en general (Sánchez y otros, 2005). Además de todas las implicaciones que tiene en el deterioro ambiental la extracción, manejo y procesamiento de los hidrocarburos, para convertirlos en combustible útil, por el alto grado de afectación que produce dicha actividad en el entorno, lo cual va en detrimento del medio ambiente.

La desventaja que representa sustentar todo un modo de vida y desarrollo, en el uso de los combustibles fósiles; los cuales en algún momento se agotarán, reflejan la importancia de desarrollar fuentes alternas de energía, basadas estas en el uso de recursos naturales renovables y con un mayor grado de beneficios ecológicos y ambientales. El total de subsidios en Latinoamérica y el Caribe destinados a los derivados de hidrocarburos (gasolina, diesel, fuel oil y GLP) asciende a aproximadamente 25 mil millones de dólares para el año 2005. El 57% se destina al diesel, el 26% a la gasolina, 9% al fuel oil y 8% al GLP. En promedio el subsidio en relación al PIB para los países de Latinoamérica y el Caribe para el año 2005 alcanza a 2,25%. Los países que más altos porcentajes de su PIB asignan por concepto de subsidio son: Surinam, Venezuela y Ecuador. Los subsidios a los

combustibles son representativos en el PIB y por ende, de gran preocupación respecto a sus presupuestos ya que constituyen un elemento de contribución social (Roca y otros, 2007).

El uso de la biomasa, como fuente de energía alterna es una acción válida y que presenta grandes ventajas en la búsqueda de opciones que logren mejorar o paliar lo efectos nocivos que ejerce sobre el medio ambiente el uso de los combustibles fósiles. Dentro de la amplia gama de recursos energéticos, obtenidos a partir de la biomasa; destacan, los denominados “agrocombustibles”, los cuales se obtienen a partir de las actividades agrícolas, mediante el procesamiento de cultivos específicos para tal finalidad y obteniéndose combustible de bajo impacto ambiental. En el caso específico del etanol, este agrocombustible, se obtiene a partir de la fermentación de compuestos ricos en azúcares, tal es el ejemplo del cultivo de la caña de azúcar, y la cual se realiza por la acción de levaduras, obteniéndose como producto final, alcohol en forma de etanol. El etanol se origina a partir de la fermentación natural, luego de extraer los jugos de cultivos de caña de azúcar, el maíz, el trigo o la yuca (Ocampo, 2006). La mayor parte de las fermentaciones alcohólicas se llevan a cabo mediante la levadura *Saccharomyces cerevisiae* u otras especies similares (Wiseman, 1986). La producción de bebidas destiladas comprende las fases de extracción, fermentación y destilado.

Es menester por lo tanto, abrir el camino para el desarrollo de este tipo de recursos energéticos, como alternativa en la búsqueda de soluciones a los problemas planteados. En tal sentido se presenta la necesidad de establecer

mecanismos de docencia, investigación y extensión universitaria, donde se pueda de algún modo desarrollar actividades inherentes al estudio de estas fuentes alternas de energía. La carencia de equipos y falta de dotación de los laboratorios universitarios y específicamente del laboratorio de Energía y Mecanización agrícola del Núcleo Universitario “Rafael Rangel” de la Universidad de los Andes, es una realidad, que afecta de manera drástica el estudio de estas fuentes alternas de energía y en consecuencia, limita la posibilidad de establecer soluciones a las necesidades planteadas.

La carencia; tanto en cantidad, como en calidad de los equipos necesarios para el desarrollo óptimo de las actividades de docencia, investigación y extensión universitarias, es un hecho relevante, que cobra vital importancia y más aún, en el estudio de los recursos energéticos alternativos. De ésta necesidad de equipos y máquinas, surge la idea de desarrollar un conjunto de acciones conducentes a la dotación y equipamiento del laboratorio de Energía y Mecanización Agrícola del Núcleo Universitario Rafael Rangel.

En el estudio de las fuentes alternas de energía, y dentro de éstas, el caso puntual de aquellas relacionadas con el aprovechamiento de la biomasa del proceso de producción agrícola; la idea consiste en la construcción de un fermentador anaeróbico para la producción de etanol (hidrocarburo que puede ser utilizado solo o combinado como combustible en motores de combustión interna); evaluar el funcionamiento del reactor y finalmente la elaboración de una guía para la operación y mantenimiento del equipo construido. Estas acciones enmarcadas

todas ellas en la dotación y equipamiento del laboratorio de energía y mecanización agrícola del Núcleo Universitario “Rafael Rangel” de la Universidad de los Andes en Trujillo de manera que los estudiantes de la carrera de Ingeniería Agrícola tengan la oportunidad de poner en práctica los conocimientos adquiridos.



## JUSTIFICACIÓN

Mediante la dotación y equipamiento del Laboratorio de Energía y Mecanización Agrícola; se persigue introducir un mecanismo de estudio acerca de las fuentes alternas de energía renovables y de los aspectos tecnológicos que guardan conexión con estas fuentes de energía; específicamente aquellas que están relacionadas directamente con el desarrollo de las actividades agrícolas; con el objeto de contribuir de alguna manera en la solución de los problemas de carencia de equipos en los laboratorios.

Las ventajas de las energías renovables son ambientales (no producen CO<sub>2</sub>, gases de efecto invernadero, ni residuos de difícil tratamiento) y económicas (evitan la dependencia del exterior, crean cinco veces más puestos de trabajo que las convencionales, pueden instalarse en zonas donde es difícil llegar con fuentes clásicas y se trata de tecnologías al alcance de todos). Estas ventajas explican que las energías renovables tienen un futuro prometedor y que están en continua progresión (Blanco, 2004).

La producción de etanol, ha generado gran interés por su potencial como combustible alternativo para motores de ignición de gasolina (Pérez y otros, 2004). Las emisiones de CO<sub>2</sub> generadas por la producción y uso de biocombustibles son compensadas por la absorción de CO<sub>2</sub> durante el crecimiento de las plantas y de otros materiales vegetales, a partir de los cuales dichos combustibles se producen (Sánchez y Cardona, 2005). Esto representa enormes ventajas ambientales,

puesto que el uso de este alcohol en sus diferentes formas y asociaciones, como combustible, disminuye considerablemente las emisiones de gases que causan el “Efecto Invernadero” y el recalentamiento del planeta, causas directas del “Cambio Climático” que hoy padecemos y que representa uno de los principales problemas que aqueja a la humanidad.

El proceso de producción de etanol tiene efectos menos adversos sobre el medio ambiente que los procesos de producción relacionados con el petróleo y el carbón. Es una energía renovable, abundante, descentralizada y limpia (Monsalve y otros, 2006).

Los continuos avances tecnológicos en el sector de las energías renovables y el apoyo institucional a estas aplicaciones, está permitiendo reducir de forma significativa la menor rentabilidad económica de estas tecnologías frente a las convencionales, de forma que el papel de estas energías es cada vez más significativo en el mercado energético con un futuro esperanzador y cada vez más cercano (Plá de la Rosa, 2001).

La construcción del fermentador anaeróbico para la producción de etanol a escala de laboratorio, tiene como premisa fundamental: contribuir con el estudio y desarrollo de los recursos energéticos alternos, en la búsqueda de soluciones a las necesidades humanas, en equilibrio con el medio ambiente y con el fin de ayudar en la construcción de unidades de laboratorio bien equipadas y dotadas, que cuenten con las herramientas necesarias para un eficaz desenvolvimiento de

las actividades de docencia, investigación y extensión universitarias, ya que estas actividades son la esencia de la Universidad.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Diseñar y construir un fermentador anaeróbico para la producción de etanol a escala de laboratorio, con el fin de contribuir a la dotación y equipamiento del Laboratorio de Energía y Mecanización Agrícola, del Núcleo Universitario “Rafael Rangel” de la Universidad de los Andes.

### **Objetivos Específicos**

- Construir un fermentador anaeróbico para la producción de etanol a escala de laboratorio.
  
- Construir el sistema de destilación y condensación para la separación del etanol.
  
- Verificar y evaluar el funcionamiento del equipo construido.
  
- Elaborar una guía o manual para la operación y mantenimiento del equipo.

## **CAPITULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

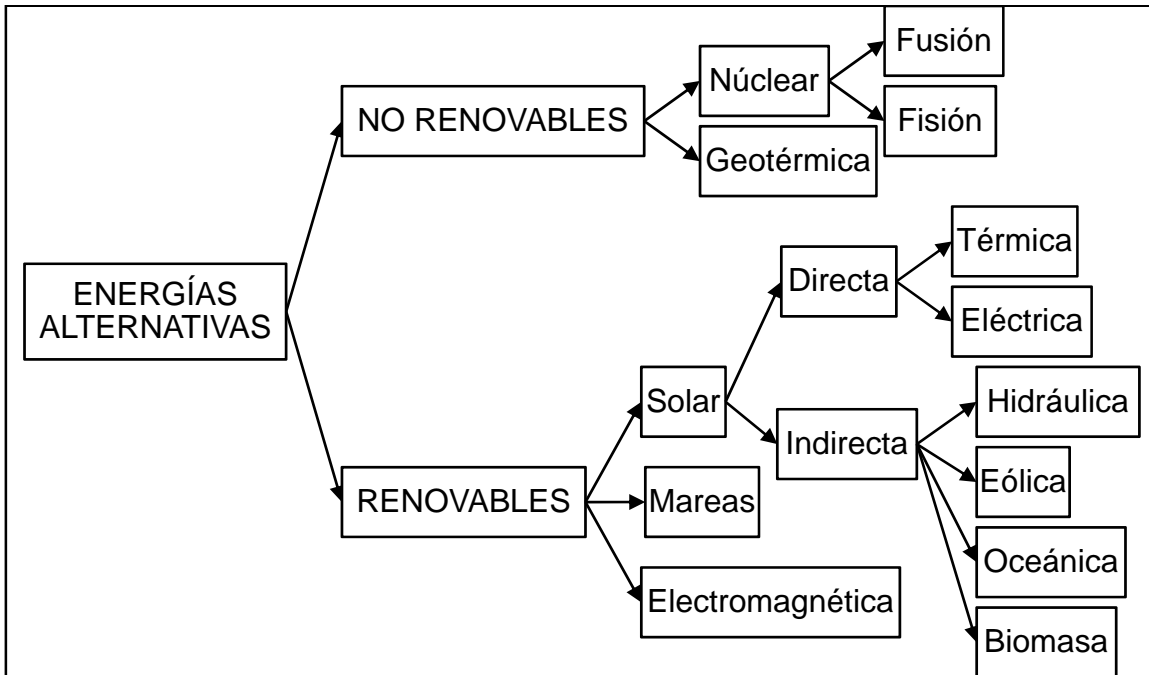
#### **2.1 Tipos de energía y energías alternativas**

Posso (2002); plantea que si bien las fuentes de energía pueden clasificarse de variadas formas según el criterio usado, la clasificación más amplia de la misma es en no renovables y renovables. Las primeras son aquellas que se consumen a una mayor velocidad de lo que la naturaleza puede reemplazarlas; tal que la cantidad total disponible es cada vez menor y su posibilidad de reposición remota, en esta categoría se ubican las fuentes fósiles. Las segundas, son fuentes que o pueden reponerse al generarse por procesos cíclicos de periodicidad variable (desde horas, hasta años) o son inagotables. Se conocen genéricamente como energías alternativas (EA) y comprenden todas aquellas energías de origen no fósil y que no han participado significativamente en el mercado mundial de la energía. La clasificación de las energías alternas se puede observar en la figura 1.

#### **2.2 Energía de Biomasa**

En sentido amplio el término *biomasa* se refiere a cualquier tipo de materia orgánica que ha tenido su origen inmediato en un proceso biológico y es, en última instancia, energía solar transformada por fotosíntesis. La madera, los desechos de agricultura y el estiércol animal se ubican en esta categoría (Posso, 2002).

**Figura 1: Clasificación de las energías alternativas**



**Fuente:** Adaptado de (Posso, 2002).

Alonso (2004), define la *biomasa* como toda aquella materia orgánica que ha tenido como precedente un proceso biológico y en función de su origen puede ser vegetal (aquella que su precedente biológico es la fotosíntesis) o animal (aquella cuyo precedente biológico es el metabolismo heterótrofo).

Posso (2002), señala que el uso de la biomasa es de vieja data; la leña fue la primera y única fuente energética utilizada por el hombre para satisfacer sus necesidades domésticas y todavía es una fuente importante en muchos países subdesarrollados. A partir de los años sesenta se ha experimentado un progreso tecnológico extraordinario en el uso de esta fuente energética. Además, según el concepto ecológico moderno, a las fuentes forestales se las considera como renovables, no sólo por su reemplazo sino por su beneficio al ambiente, ya que

tienen la propiedad de reducir grandemente las emisiones de gases de invernadero o incluso establecer un balance ideal.

### **2.3 Procesos de Conversión**

Posso (2002), señala que las aplicaciones más importantes de la bioenergía son: producción de calor, electricidad y combustible. Los procesos de conversión de la biomasa para estos fines son básicamente de dos tipos: bioquímicos y termoquímicos.

*Producción Bioquímica:* los procesos asociados se basan en la descomposición de la biomasa mediante microorganismos en presencia o ausencia de oxígeno y comprende principalmente la producción de combustibles líquidos (Etanol) por fermentación. En cuanto a los combustibles gaseosos se generan por digestión anaeróbica, el metano es el principal producto obteniéndose además lodos residuales mejoradores de suelos o fertilizantes (Posso, 2002).

*Producción Termoquímica:* sus procesos se basan en la descomposición de la biomasa mediante calor e incluyen la combustión directa, la pirolisis y la gasificación. Según las condiciones de operación se obtienen diferentes proporciones de producto sólido, líquido o gaseoso (Posso, 2002).

- *Pirolisis:* es la degradación térmica del material orgánico en ausencia de oxígeno a temperaturas superiores a los 600 °C. En especial, madera y residuos forestales pueden procesarse para producir combustibles gaseosos y líquidos y también carbón vegetal; un biocombustible sólido.

- *Gasificación*: consiste en una combustión incompleta de la que se obtiene principalmente un gas combustible con un poder calorífico variable y que actúa como portador de energía.
- *Combustión*: es el sistema más elemental y antiguo de recuperación energética, el calor generado se utiliza tanto en instalaciones domésticas como industriales. El biocombustible sólido más común es la leña, también los residuos de las cosechas de grano, pajas de trigo, arroz o maíz, se pueden aprovechar para hacer funcionar pequeñas centrales eléctricas. La eficiencia térmica del proceso es baja, oscilando entre el 20% y el 22% (Posso, 2002).

## **2.4 Tipos de Biomasa**

Las fuentes de biomasa que se pueden considerar de forma global son las siguientes: Biomasa natural, Biomasa residual, Excedentes agrícolas y Cultivos energéticos (Alonso, 2004).

La *biomasa natural* es la procedente de forma espontánea de la naturaleza (masas forestales generalmente). Respecto a la *biomasa residual*, se puede decir que en ella se incluyen todas aquellas materias primas que se generan en las actividades de producción, transformación y consumo, y que no han alcanzado valor económico en el contexto donde se generan. Los *excedentes agrícolas* son todas aquellas materias primas que se encuentran en una situación cuya producción es mayor que su utilización y como *cultivos energéticos* se entienden todas aquellas especies vegetales tradicionales con gran superficie de cultivo, que



se pueden desarrollar tanto para uso alimentario como energético, especies que se están ensayando y mejorando y que tienen como principal destino el energético, e incluso especies alimentarias con superficie de cultivo reducido, pero que presentan un potencial energético muy alto (Alonso, 2004).

## **2.5 Potenciales de la Biomasa**

Posso (2002), indica que con un estimado de 14000 MW de capacidad mundial instalada, la biomasa es la mayor fuente de potencia para generación de energía eléctrica con energías alternativas después de la hidroeléctrica. Estados Unidos es el más grande generador con 7000 MW instalados. Las expectativas de crecimiento de la generación en el mundo es alcanzar más de 30000 MW para el año 2020, China y la India prevén instalar sistemas con biomasa de manera masiva, las estimaciones muestran que para el 2015, China deberá tener 4000 MW instalados y la India, 1500 MW. Esto representa un crecimiento extraordinario de su capacidad instalada actual de 154 MW y 59 MW respectivamente. Otros países con un promisorio crecimiento de la bioenergía son: Brasil, Malasia, Filipinas, Indonesia, Australia, Canadá, Inglaterra, Alemania y Francia. No obstante, para que estas aspiraciones prosperen será preciso además de políticas de incentivo adecuadas, un avance en el conocimiento de la biomasa como combustible, así como un importante desarrollo y actualización de los procesos de conversión energética, casi ancestrales, para hacerlos factibles, competitivos y eficientes.

## **2.6 Biocombustibles**

Alonso (2004), explica que los biocombustibles son todos aquellos productos biomásicos que pueden ser empleados para la obtención de energía. En función del estado que presenta el biocombustible se puede realizar la siguiente clasificación: biocombustibles sólidos, biocombustibles líquidos o biocarburantes y biocombustibles gaseosos. Dentro del grupo de los *biocombustibles sólidos* se encuentran los residuos agrícolas herbáceos y leñosos, los cultivos energéticos, los residuos forestales, los residuos de industrias agroalimentarias y forestales. Dentro de los *biocombustibles gaseosos*, destaca el biogás como aquel gas producido por la degradación de la materia orgánica en ausencia de oxígeno y gracias a la presencia de una serie de bacterias. Al contener el biogás una importante cantidad de metano, al igual que el gas natural, es susceptible de ser aprovechado energéticamente. Los biocombustibles líquidos y biocarburantes son compuestos que pueden sustituir total o parcialmente a la gasolina o al gasóleo tradicional y que proceden de materias primas vegetales (Alonso, 2004).

## **2.7 Biocombustibles líquidos**

Alonso (2004), señala que los productos obtenidos, dependiendo de la materia prima de la que se parte, son los siguientes: bioaceites y biodiesel; los aceites de origen vegetal, son los ácidos grasos de cadena larga que se extraen a partir de semillas y/o frutos de plantas oleaginosas como el girasol o la colza, aunque con un gran potencial también el cardo. Debido a la presencia de problemas que presentan en los motores de automoción la utilización directa de los bioaceites, se requiere una reacción denominada transesterificación, mediante la cual los ácidos

grasos reaccionan con un alcohol para dar lugar a ésteres metílicos o biodiesel, y es lo que puede emplearse en los motores. Las materias primas tradicionales para la producción de estos compuestos son el girasol o diversas especies de colza, así como el propio cardo y los aceites de fritura usados y convenientemente tratados.

## **2.8 El Etanol**

Sánchez y otros (2005), definen el *Bioetanol* como el alcohol etílico producido a partir de la fermentación de los azúcares que se encuentran en los productos vegetales combinados en forma de sacarosa, almidón, celulosa y hemicelulosa. Para su obtención se pueden emplear materias primas amiláceas como los cereales, materias primas azucaradas y materias primas lignocelulósicas como la biomasa forestal o la procedente de los residuos de los cereales. El etanol no es nuevo: Nicolaus Otto, inventor del motor Otto, en 1876, utilizó etanol en uno de sus motores, y el primer vehículo que construyó Henry Ford funcionaba con etanol (Daniels, 2007).

El Bioetanol, es el biocombustible más importante; el alcohol carburante (etanol), puede ser utilizado como oxigenante de la gasolina, elevando su contenido de O<sub>2</sub>, lo que permite una mayor combustión de la misma, disminuyendo las emisiones contaminantes de hidrocarburos no oxidados completamente (Sánchez y otros, 2005). En la tabla 1, puede apreciarse algunas propiedades del etanol anhidro.

**Tabla 1: Propiedades físicas del etanol anhidro**

|   |
|---|
| Punto de ebullición: 79°C   |
| Punto de fusión: -117°C   |
| Densidad relativa (agua = 1): 0,8                                 |
| Solubilidad en agua: Miscible                                     |
| Presión de vapor a 20°C: 5,8 kPa                                  |
| Densidad relativa de vapor (aire = 1): 1,6                        |
| Densidad relativa de la mezcla vapor/aire a 20°C (aire = 1): 1,03 |
| Punto de inflamación: 13°C (c.c.)                                 |
| Temperatura de autoignición: 363°C                                |
| Límites de explosividad, % en volumen en el aire: 3,3-19          |
| Coeficiente de reparto octanol/agua como log Pow: -0,32           |

**Fuente:** Adaptado de (Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales de España, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 2007).

Vázquez y otros (2007); señalan que el etanol permite un aumento del índice de octanos, y por lo tanto la reducción del consumo y la reducción de la contaminación (de 10% a 15% menos de monóxido de carbono e hidrocarburos). El etanol se puede mezclar con la gasolina sin plomo de un 10% a un 25% sin dificultad. En ciertos motores, se ha logrado incorporar hasta en un 100%.

La utilización de etanol en mezclas con gasolina hasta en un 20% en volumen no exige modificaciones de los motores de ciclo Otto, y sólo en algunos casos requiere ajustes de carburación, debido a su efecto de empobrecimiento de

mezcla. Para mezclas con mayor proporción de etanol, ó para su utilización puro, se requiere realizar modificaciones a los diseños de los motores (Molina y otros, 2002).

La mayor ventaja del etanol estriba en que puede obtenerse de recursos renovables como la biomasa, evitando así la contribución neta a la atmósfera de gases con efecto invernadero. De esta manera, el CO<sub>2</sub> producto de la combustión es nuevamente fijado por la biomasa durante su crecimiento (Cardona y otros, 2005). Puede apreciarse en la tabla 2; el impacto del etanol sobre el medioambiente.

**Tabla 2: Impacto del etanol sobre el medioambiente**

| Emisiones | Etanol en la mezcla con gasolina |     |     |     |
|-----------|----------------------------------|-----|-----|-----|
|           | 0%                               | 12% | 18% | 22% |
| <b>CO</b> | 200 – 450                        | 150 | 120 | 100 |
| <b>HC</b> | 140                              | 110 | 105 | 100 |

**Fuente:** Adaptado de (Daniels, 2007).

Vázquez y otros (2007), afirman, que una de las opciones para producir etanol es por fermentación a partir de materias primas ricas en carbohidratos (azúcar, almidón, celulosa, etcétera). Por tal razón, es común designar al etanol obtenido por esta vía “bioetanol”. Entre estas materias primas se encuentran las frutas y vegetales como la caña de azúcar y la remolacha, los cereales (trigo, maíz, sorgo), los tubérculos (papas, yuca) y en general, materias provenientes de ligno-

celulosas o de residuos orgánicos. La materia prima representa el mayor porcentaje dentro de los costos de producción de etanol, sumando más del 60% (Cardona y otros, 2005).

El primer programa masivo de energías renovables a nivel mundial de producción de bioetanol a partir de caña de azúcar se inició en Brasil en 1975. Hasta 1989, el programa se apoyó en políticas públicas de beneficios económicos e incentivos fiscales para ayudar al desarrollo industrial de ésta tecnología. La producción se estabilizó desde entonces en 11 mil a 16 mil millones de litros por año (Vázquez y otros, 2007). El etanol se obtiene a partir de la caña de azúcar en países tropicales como Brasil e India. En algunos países europeos como Francia se utilizan melazas de remolacha azucarera. La materia prima principal para la obtención de etanol en los EEUU es el almidón (Sánchez y otros, 2005). En la Tabla 3, se observa la producción mundial de alcohol etílico.

**Tabla 3: Producción mundial de alcohol etílico (2004)**

| <b>PAÍS</b>    | <b>MILL. LITROS</b> |
|----------------|---------------------|
| Brasil         | 15 098, 37          |
| Estados Unidos | 13 379, 98          |
| China          | 3 648, 74           |
| India          | 1 748, 67           |
| Francia        | 828, 91             |
| Rusia          | 749, 43             |
| Sur África     | 416, 35             |
| Reino Unido    | 401, 21             |
| Arabia Saudita | 299, 01             |
| España         | 299, 01             |
| <b>Total</b>   | <b>40 764, 45</b>   |

**Fuente:** Sánchez y Cardona, 2005.

Según La Agencia Internacional de Energía, el potencial de esta fuente de energía es considerable, pues se calcula que el bioetanol podría sustituir un 25% de la gasolina utilizada como combustible en el año 2025 (Vázquez y otros, 2007).

El etanol tiene innumerables aplicaciones: bebidas fermentadas para consumo humano como vinos, aguardiente, vodka, ron, brandy, etc. En la industria se emplea en gran cantidad de procesos como: disolución de la nitrocelulosa, disolvente de colorantes en las industrias alimenticias y textil; disolvente de: resinas, jabón, aceites, ceras, etc.; y oxidación en la fabricación de ácido acético, vinagre, acetaldehído; y utilizado como solvente (Monsalve y otros, 2006).

## **2.9 Fermentación alcohólica**

Vázquez y otros (2007), explican que la fermentación alcohólica es una bioreacción que permite degradar azúcares en alcohol y dióxido de carbono. Mientras Alonso (2004), expone que la fermentación alcohólica, es aquel método en el que se produce la conversión de los hidratos de carbono de la materia prima en etanol, por la acción de microorganismos durante dos o tres días bajo condiciones controladas. Las materias primas generalmente empleadas han sido y son materias sacaríferas y amiláceas, aunque la utilización de éstas últimas implica la realización de una hidrólisis ácida o enzimática para que los carbohidratos pasen a monosacáridos y se pueda realizar la fermentación propiamente dicha.

Por otra parte Bautista y otros en el 2001, señalan que la fermentación es un proceso biológico anaeróbico donde los azúcares simples como la glucosa y

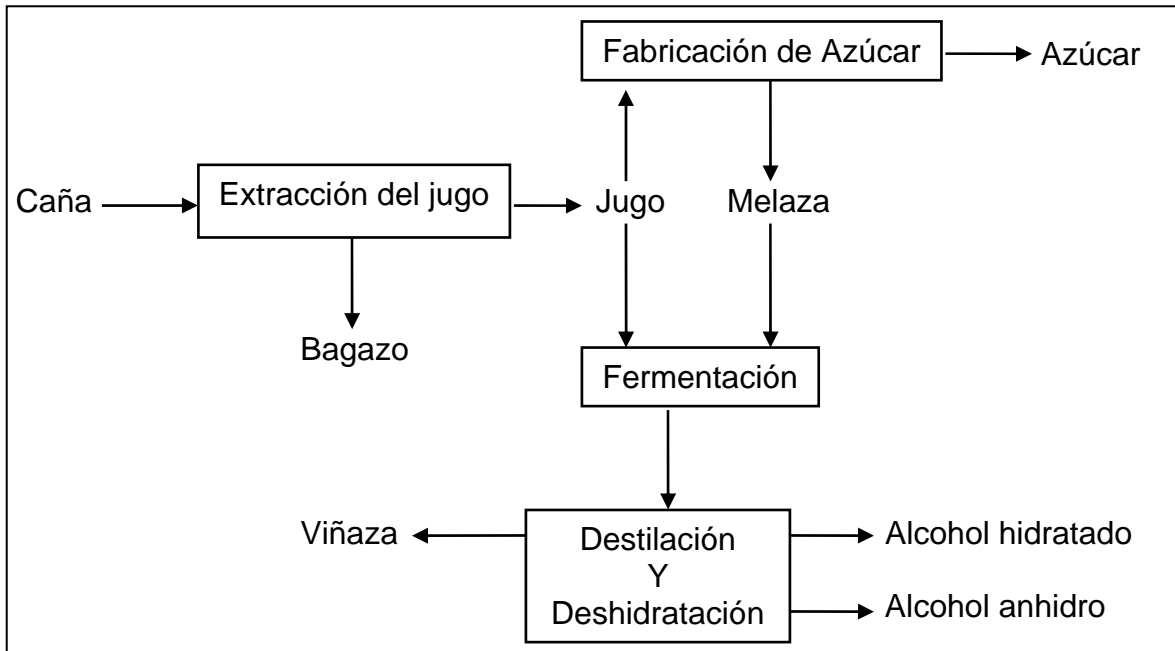
fructosa, son transformados a etanol y dióxido de carbono por acción de las levaduras. Para que un proceso fermentativo tenga éxito es indispensable utilizar materias primas de alta calidad, que proporcionen a las levaduras todos los nutrimentos para su crecimiento óptimo.

La principal materia prima para la producción de etanol es la caña de azúcar, ya sea en forma de jugo de caña o como melazas (subproducto de la industria azucarera). Se puede obtener cerca de 70L de etanol/ton de caña y 9L de etanol/ton de melaza grado C, además de cerca de 100 Kg de azúcar (Sánchez y otros, 2005). El proceso de obtención de alcohol etílico a partir de caña de azúcar comprende la extracción del jugo de caña (rico en azúcares), su acondicionamiento para hacerlo apropiado a las levaduras de la fermentación, la separación de la biomasa del caldo resultante para dar paso a la concentración del etanol mediante operaciones unitarias y su posterior deshidratación; forma en que es utilizado como aditivo oxigenante (Cardona y otros, 2005). En la figura 2, se presenta un esquema del proceso de producción de alcohol etílico.

El rendimiento teórico estequiométrico para la transformación de glucosa en etanol es de 0,511 g de etanol y 0,489 g de CO<sub>2</sub> por 1 g de glucosa. Este valor fue cuantificado por Gay Lussac. En la realidad es difícil lograr este rendimiento, porque la levadura utiliza la glucosa para la producción de otros metabolitos. El rendimiento experimental varía entre 90% y 95% del teórico, es decir, de 0,469 a 0,485 g/g. Los rendimientos en la industria varían entre 87% y 93% del rendimiento teórico (Vázquez y otros, 2007).

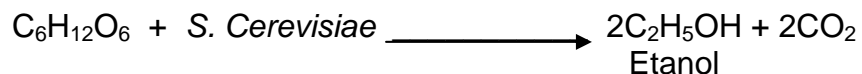


**Figura 2: Procesos de producción de alcohol de caña de azúcar**



**Fuente:** Adaptado de (CEPAL, 2006).

Según Sánchez y otros (2005). La reacción general de la fermentación se puede presentar como:



Para evaluar esta transformación, se usa el Rendimiento biomasa/producto y el Rendimiento producto/sustrato. El Rendimiento biomasa/sustrato ( $Y_x/s$ ): es la cantidad de levadura producida por cantidad de sustrato consumido. El Rendimiento sustrato/producto ( $Y_p/s$ ): es la cantidad de producto sintetizado por cantidad de sustrato consumido. Otro parámetro importante es la productividad (g/h/l), la cual se define como la cantidad de etanol producido por unidad de

tiempo y de volumen. Los parámetros antes mencionados se definen con relación a la fase y al modo de funcionamiento del bioreactor o fermentador (Vázquez y otros, 2007).

Para tener una fermentación adecuada es necesario contar con buenas condiciones de anaerobiosis, sustrato suficiente para la levadura, utilizar siempre las mismas cepas de levadura adecuadas para la producción y evitar las contaminaciones por otros microorganismos que pueden producir sustancias no deseadas; controlar durante el proceso las condiciones óptimas de temperatura y tiempo para obtener la mayor cantidad de etanol. El paso del metabolismo aeróbico a anaeróbico es crucial y debe tenerse especial cuidado de eliminar el aire de los fermentadores. Puede haber problemas en la fermentación cuando la concentración de azúcares en el mosto es insuficiente, si hay alta concentración de alcohol o cuando existe contaminación por otras levaduras y bacterias (Bautista y otros, 2001).

## **2.10 El Fermentador o bioreactor**

Vázquez y otros (2007), definen que en general, un bioreactor es un recipiente cilíndrico de doble pared, de vidrio o de acero inoxidable (para el control de la temperatura y esterilización en línea), cubierto de una platina de acero inoxidable. La platina está dotada de entradas y salidas que permiten agregar sustratos, nutrientes y sustancias como ácidos o bases, extraer productos, o bien, hacer mediciones en línea. La platina permite acoplar un sistema de agitación para

mantener la homogeneidad y facilitar, en su caso, la transferencia de oxígeno y/o nutrientes.

El bioreactor es el elemento central para la realización de la fermentación alcohólica. Existen diversas opciones para disponer de esta tecnología; por ejemplo, construir una instalación simple, hasta la adquisición de una instalación completa con especificaciones técnicas adecuadas a las características concretas del proceso. Entre estas dos opciones existen múltiples posibilidades caracterizadas por diferentes precios, volúmenes, tecnologías, modos de funcionamiento (discontinuo, fed batch, continuo, cascada), etc. La elección depende de los recursos económicos disponibles y del interés por desarrollar una tecnología propia (Vázquez y otros, 2007).

## **2.11 La Destilación**

Bautista y otros (2001), definen la destilación como la separación de una mezcla líquida por vaporización selectiva y parcial de la misma; la fracción vaporizada se condensa y se recupera como líquido. En el caso del etanol para consumo humano, un punto muy importante que no se puede pasar por alto, es que en este caso se elimina la mayor parte del metanol que se ha generado en las etapas anteriores. El metanol es muy peligroso para la salud del hombre y tiene una dosis letal: de 100 a 250 ml.

## 2.12 Análisis y Mediciones

*Medición de grados Brix (°Bx):* los grados Brix representan una escala arbitraria para medir densidades de soluciones de azúcares y equivalen al porcentaje en peso de sólidos solubles de una muestra, que principalmente son azúcares. Su determinación se realiza con un refractómetro o con un hidrómetro (Bautista y otros, 2001).

Con el refractómetro se determina el índice de refracción de un haz de luz que atraviesa el medio en el cual se encuentran los azúcares. El hidrómetro usado para determinar el °Bx se llama sacarímetro y su uso, está basado en el principio de que un cuerpo desplaza el líquido igual a su peso en el cual éste flota. El peso del líquido desplazado es igual al producto de su volumen y densidad. Si  $V_1$  y  $V_2$  son los volúmenes de dos líquidos desplazados por el mismo peso y  $D_1$  y  $D_2$  sus respectivas densidades  $V_1 \cdot D_1 = V_2 \cdot D_2$  y  $D_1 / D_2 = V_1 / V_2$  (Bautista y otros, 2001).

Así los volúmenes de diferentes líquidos desplazados por el mismo cuerpo flotante son inversamente proporcionales a las densidades de los líquidos. Si el cuerpo flotante es un cilindro vertical de diámetro uniforme, el volumen desplazado es proporcional a la profundidad con la que el cuerpo se hunde  $D_1 / D_2 = H_2 / H_1$  (Bautista y otros, 2001).

Físicamente el hidrómetro es un flotador de vidrio que tiene un fondo ancho y pesado y un cuello delgado en la parte superior, llamado vástago. Además, en la parte inferior tiene un inserto metálico de peso apropiado, que hace que el

hidrómetro se hunda en la solución de prueba hasta una profundidad que origina que el vástago calibrado sobresalga por encima del líquido. Los hidrómetros son muy usados para determinar la gravedad específica de los líquidos donde la rapidez es más importante que la exactitud. La determinación debe realizarse a 20 °C o de lo contrario se deben emplear tablas de corrección para temperatura (Bautista y otros, 2001). Otra unidad de medición utiliza es el °GL, que significa Grados Gay Lussac. Un grado GL equivale a 12 litros de alcohol por cada 100 litros de medio de cultivo (Vázquez y otros, 2007).

### **2.13 Las Levaduras**

Las levaduras son microorganismos eucariotas que cuando se encuentran en un medio rico en azúcares, proliferan y producen grandes cantidades del alcohol y CO<sub>2</sub> (Bautista y otros, 2001).

El microorganismo más utilizado para la obtención de Etanol es la levadura *Saccharomyces cerevisiae*, que convierten las hexosas en etanol en condiciones anaeróbicas, generando 2 moles del compuesto portador de energía en los seres vivos, el adenosín trifosfato (ATP), por cada mol de hexosa consumida, además de 2 moles de etanol. Este microorganismo tiene también la capacidad de convertir las hexosas en CO<sub>2</sub> aeróbicamente, por lo que en dependencia de las concentraciones de O<sub>2</sub> en el medio de cultivo y de la fuente de carbono, se puede favorecer uno de los dos procesos. Las levaduras tienen la ventaja adicional de tolerar concentraciones relativamente altas de etanol (hasta 150g/L). (Sánchez y otros, 2005).

Cualquier proceso microbiano debe ser monitoreado para asegurarse de que se está realizando adecuadamente. En la mayoría de los casos es necesario no solamente medir el crecimiento de la levadura y formación del producto, sino también controlar el pH, temperatura y concentración de biomasa y producto (Bautista y otros, 2001). En la figura 3, se observa una imagen microscópica de la levadura *Saccharomyces cerevisiae*.

**Figura 3: Micrografía electrónica de barrido de *Saccharomyces cerevisiae***



**Fuente:** (Bueno y otros, 2000).

## **CAPITULO III**

### **MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1 Fermentador anaeróbico para la producción de etanol**

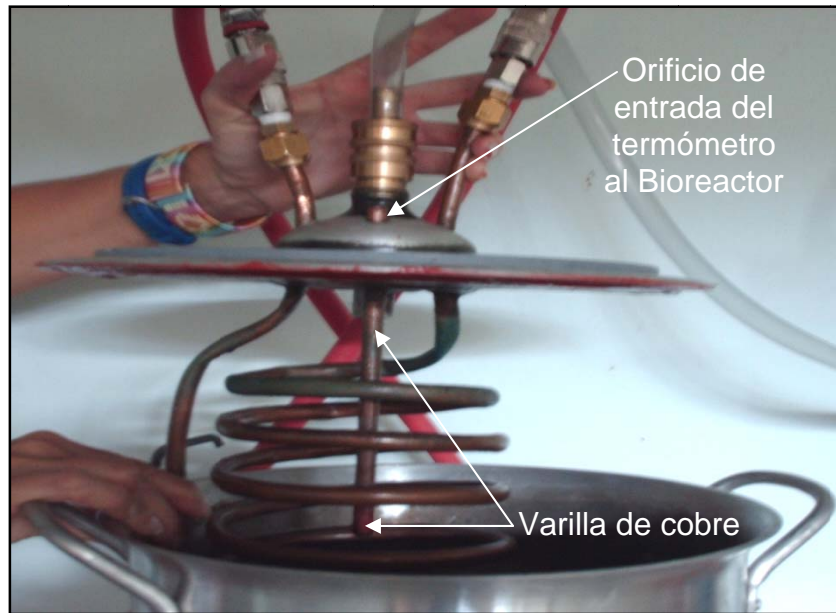
Para la construcción del fermentador anaeróbico para la producción de etanol se utilizó un recipiente o envase de forma cilíndrica que permite las condiciones de anaerobiosis, en el cual se produce el proceso de fermentación. El mismo se construyó de material de aluminio por su versatilidad, relativo poco peso y soporta los niveles de temperatura para el acondicionamiento del sustrato y destilación del etanol. Las dimensiones del reactor anaeróbico son de aproximadamente 0,24 metros de altura y 0,245 metros de diámetro; con una capacidad total de aproximadamente 0,0113 metros cúbicos y una capacidad útil de aproximadamente 0,009 metros cúbicos. Para mantener el proceso anaerobio, el fermentador posee un anillo metálico (construido de pletina metálica con dimensiones de 0,0127 metros de ancho x 0,003175 metros de espesor) de donde se sujetan cuatro ganchos, cada uno de estos con sus respectivos tornillos de sujeción (Figura 4); los cuales al ser ajustados ejercen presión y sujetan la tapa del fermentador; mediante el anclado de estos ganchos en otro anillo (construido también de pletina de igual dimensiones que el anterior), que se encuentra libre en la tapa del bioreactor, impidiendo con esto la entrada de aire al sistema. A través de éste mecanismo se realiza también la alimentación del sustrato, aflojando los tornillos de sujeción de los ganchos y retirando la tapa del fermentador.



**Figura 4. Anillos metálicos, ganchos y tornillos de sujeción del bioreactor.**

En la tapa del reactor construido, se perforaron cinco orificios; tres de los cuales poseen un diámetro aproximado de 0,01 metros cada uno. Uno de estos tres orificios se perforó con la finalidad de monitorear la temperatura del sustrato en el proceso de fermentación alcohólica. Se colocó en este orificio una varilla de cobre de aproximadamente 0,19 metros de longitud y un diámetro aproximado de 0,00635 metros; a través de la cual se introduce el termómetro y se logra llegar hasta el sustrato; sin que entre el aire al sistema, manteniendo las condiciones anaerobias y aislando el sustrato de posibles fuentes de contaminación (Figura 5).

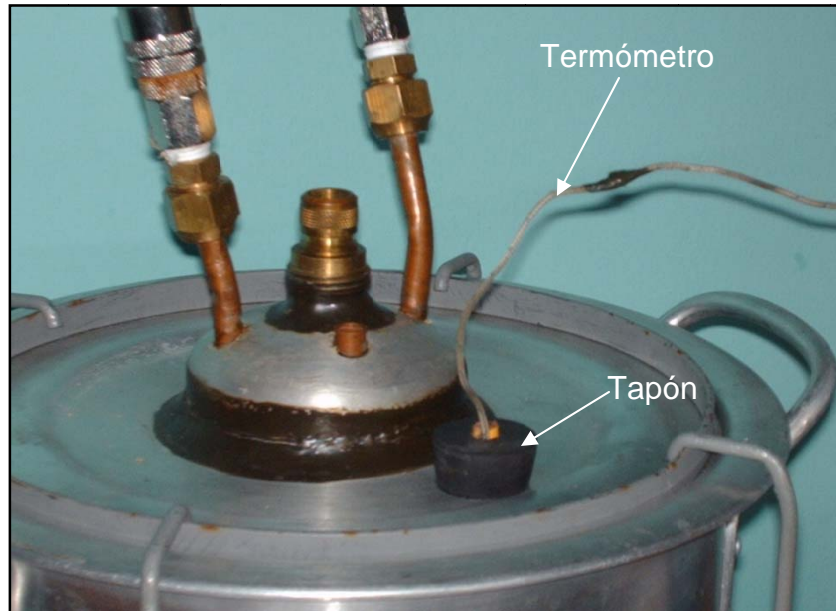




**Figura 5. Dispositivo para el monitoreo de la temperatura del sustrato en los procesos de fermentación.**

Otro orificio; de aproximadamente 0,026 metros de diámetro, fue perforado también en la tapa del fermentador con la finalidad de monitorear la temperatura de los compuestos volátiles (en fase gaseosa) en el interior del bioreactor; gases que se forman durante el proceso de destilación del etanol (Figura 6). El monitoreo de ésta temperatura permite controlar, desarrollar y asegurar de manera exitosa el proceso de destilación del etanol. En el orificio antes mencionado, se colocó un tapón con forma de cono truncado, de material de caucho. Este tapón posee a su vez un orificio, a través del cual es posible introducir el termómetro, quedando éste ajustado al tapón. El ajuste del termómetro al tapón; aunado además, a la forma cónica que presenta el mismo, impide: el escape por evaporación de los compuestos volátiles durante el proceso de destilación, la entrada de aire al

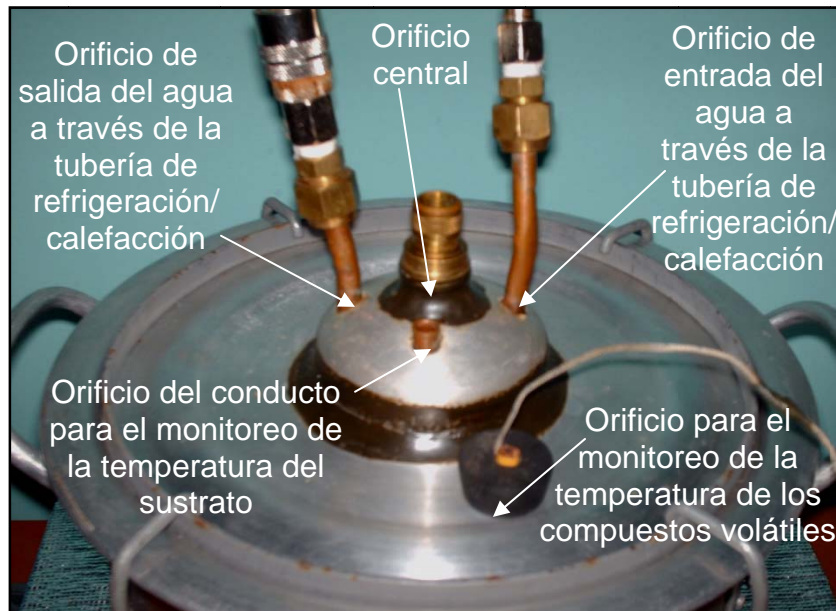
bioreactor durante el proceso de fermentación y la posible contaminación por no aislar el sustrato de las condiciones externas.



**Figura 6. Monitoreo de la temperatura de los compuestos volátiles en el interior del bioreactor durante el proceso de destilación.**

Uno de los cinco orificios antes señalados, se perforó en el centro de la tapa del reactor (Figura 7), con un diámetro aproximado de 0,018 metros; por medio de éste se puede introducir una pipeta para la toma de muestras, el agregado de sustancias, el monitoreo y control de parámetros durante el proceso fermentativo, como: pH, cantidad y el estado de crecimiento de las levaduras, entre otros. Este orificio permite además, extraer el alcohol en forma gaseosa durante la destilación, una vez ocurrida la fermentación.

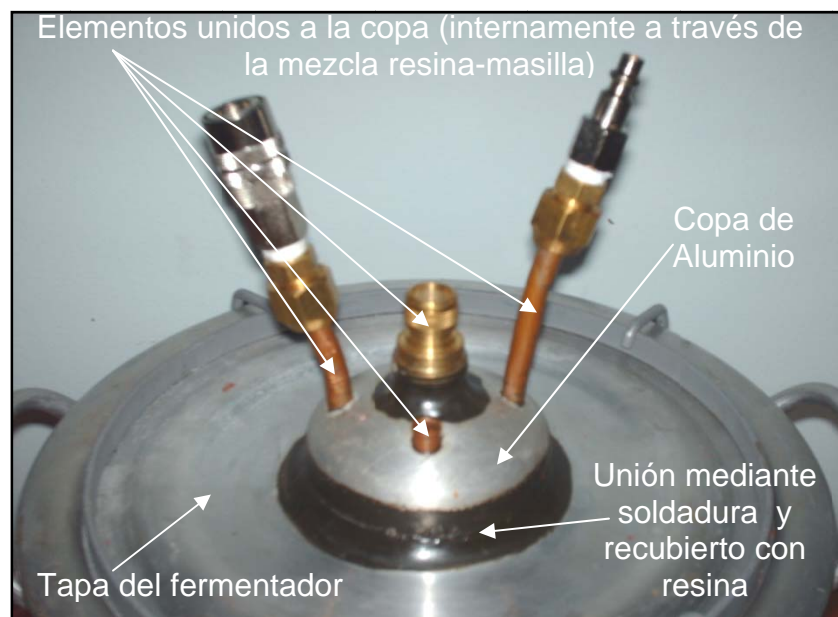
Los dos orificios restantes, de las cinco perforaciones realizadas; representan respectivamente: la entrada y la salida de la tubería de conducción de agua (sistema de refrigeración/ calefacción) al interior del reactor (Figura 7). En el caso que se necesite enfriar (producto del calor metabólico generado por la actividad de las levaduras) o calentar el sustrato (en fermentaciones donde se requiera un aumento de la temperatura por diferentes razones); esto se hará mediante la mencionada tubería de conducción; diseñada y construida como elemento del sistema de refrigeración/calefacción; cuyo sistema cumple la función de control de la temperatura del bioreactor.



**Figura 7. Orificios en la tapa del fermentador.**

En la tapa del fermentador anaeróbico se realizó una perforación de aproximadamente 0,095 metros de diámetro, en la cual se adosó el sistema de refrigeración/calefacción; mediante una copa de aluminio, en la cual se realizaron

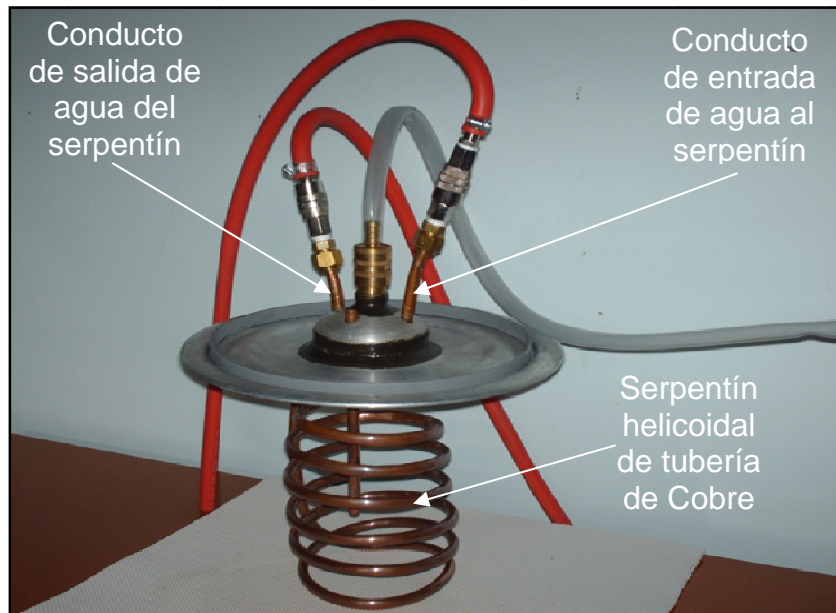
cuatro de los cinco orificios existentes; puesto que el orificio restante (para el monitoreo de la temperatura de los compuestos volátiles) se realizó en la tapa del fermentador propiamente dicha. Esta unión entre la tapa del fermentador y la copa de aluminio (Figura 8), se hizo mediante una unión fija de soldadura de aluminio. Para mantener la unidad, firmeza e inmovilidad de todos y cada uno de los elementos de cobre que permanecen unidos a la copa, se aplicaron dos capas de resina y entre éstas, una capa de masilla, en el interior de la copa de aluminio. Ésta mezcla (resina-masilla) producto del endurecimiento de la misma, mantiene firme la unidad de todas las partes; además de soportar las temperaturas propias de los procesos fermentativos y del proceso de destilación.



**Figura 8. Copa de aluminio adosada a la tapa del fermentador.**

### 3.2 Sistema de refrigeración/calefacción

En el interior del fermentador se encuentra un conducto, por el cual circula el agua de refrigeración o de calefacción, según sea el caso, durante el proceso fermentativo. Es un sistema de tubería de cobre (seleccionado por su elevada conductividad térmica). La tubería de cobre tiene forma de serpentín helicoidal (Figura 9), con una entrada y una salida al reactor; la tubería permanece fija y adosada a la tapa del reactor, mediante la copa de aluminio antes descrita. La longitud de este serpentín helicoidal es de aproximadamente 3,30 metros y el mismo posee un diámetro aproximado de 0,00635 metros.



**Figura 9. Sistema de refrigeración/calefacción.**

El sistema de refrigeración/calefacción sirve en primer lugar, como sistema de enfriamiento; el agua que circula por la tubería, actuando como fluido de trabajo, disipa el calor generado en el interior del envase, ya que, el proceso fermentativo

puede alcanzar temperaturas indeseables, producto de la actividad metabólica de las levaduras. En segundo término, el sistema de refrigeración/calefacción es un mecanismo para regular y controlar la temperatura del bioreactor en los diferentes procesos de fermentación; en los que sea necesario mantener algún parámetro o rango específico de temperatura. En el sistema de refrigeración/calefacción; la entrada y la salida del fluido de trabajo (agua) se realiza por la tapa del reactor y su instalación es de manera hermética para asegurar las condiciones de anaerobiosis.

El sistema de refrigeración/calefacción está constituido por una fuente de calor; un “calentador eléctrico” (Figura 10) que produce el calentamiento del fluido de trabajo (agua); este calentador posee una capacidad de aproximadamente 0,010 metros cúbicos. Los diámetros internos de los conductos de salida y entrada del calentador son de 0,015 metros aproximadamente y los diámetros externos de aproximadamente 0,02 metros. El calentador funciona con una corriente eléctrica de 15 amperios y una diferencia de potencial o voltaje de 220 Voltios; lo que resulta en una potencia eléctrica de 3300 vatios.