



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN
INGENIERIA

CENTRO DE INVESTIGACION EN ENERGIA

Desarrollo y Caracterización de un Fermentador-Destilador
para la producción de Bioetanol

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERIA

ENERGIA - FUENTES RENOVABLES

P R E S E N T A:

Luis Fernando Santis Espinosa

T U T O R:

DR. Sebastian Pathiyamattom Joseph



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dra. Eapen Delfeena

Secretario: Dr. Pathiyamattom Joseph Sebastián

Vocal: Dr. Gamboa Sánchez Sergio Alberto

1^{er} Suplente: Dr. Saldaña Trinidad Sergio

2^{do} Suplente: M.C. Campos Álvarez José

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN ENERGÍA - UNAM

TUTOR DE TESIS:

Dr. Sebastian Pathiyamattom Joseph

FIRMA

A

Rosita, a mi Bebé y Fernandito

A mis hermanos Anita, Bethy y Alfredo

A mis tios Manuel, Luis, Chus y Amada

*A mis primos Rafa, Alex, Toño, Aurora, Blanqui,
Gaby, Manuelito y Pancho*

*Y sobre todo a mis padres Fernando y Vicki, a mi tío Manuel y a mis abuelitos
Alejandro y Maria.*

A todos ustedes gracias por el apoyo y amor que me han brindado.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, al Centro de Investigación en Energía.
A la Unidad Administrativa de Posgrado (UAP).

Al jurado revisor de tesis:

Dra. Eapen Delfeena

Dr. Pathiyamattom Joseph Sebastián

Dr. Gamboa Sánchez Sergio Alberto

Dr. Saldaña Trinidad Sergio

M.C. Campos Álvarez José

A mis profesores: Dr. Sebastian P. Joseph, Dra. Nini R. Mathews, Dr. Fabio Manzini, Dr. Sergio Gamboa, Dr. Issac Pilatowsky, Dr. Ramon Tovar, Dr. Raul Rectchman y M.I. José Campos.

A mi director de tesis el Dr. Sebastian Pathiyamattom Joseph por haberme aceptado en su grupo y brindado apoyo y amistad en todo momento.

Al Dr. Sergio Saldaña por su valioso apoyo, observaciones y sugerencias para el mejoramiento de este trabajo.

A la Dra. Peggi Alvarez por su valiosa ayuda y tiempo dedicado en la realización de este trabajo.

A la Dra. Delfeena Eapen por su apoyo y observaciones en la realización de este trabajo.

A mis amigos de laboratorio Laura, Bianca, Toñita, Fabian, Edgar, Andres, Edgar* y Lorena* (*Posdoc.). A todos mis compañeros del Centro de Investigación en Energía (CIE).

Al M.C. Onesimo por su valioso apoyo en las evaluaciones de los materiales.

A mi país y su pueblo por el apoyo otorgado con la beca para realizar este trabajo mediante CONACYT.

A todas aquellas personas e instituciones que de alguna manera participaron en la realización de este trabajo. Gracias.

Índice general

Nomenclatura	7
Resumen	9
1. Introducción	11
1.1. Antecedentes	12
1.2. Justificación	12
1.3. Objetivos	13
1.3.1. Objetivo general	13
1.3.2. Objetivos específicos	13
1.4. Metas	14
2. Marco Teórico	15
2.1. Contexto Energético Mundial	15
2.1.1. Oferta y Demanda de energía	16
2.2. Consumo y Producción Nacional de Energía	17
2.2.1. Producción de energía primaria	19
2.2.2. Oferta nacional de energía	19
2.3. Bioenergía	21
2.3.1. Los Biocombustibles	21
2.3.2. Bioetanol	23
2.3.3. Materias primas y viables para la producción de bioetanol	24
2.3.4. Proceso de obtención de bioetanol	25
2.4. Producción de Bioetanol en México	27
2.5. El Bioetanol como Combustible	28

3. Desarrollo Experimental	31
3.1. Diseño y Desarrollo del Fermentador	31
3.1.1. Características principales del fermentador	32
3.2. Diseño y Desarrollo del Destilador	34
3.2.1. Características principales de destilador	34
3.3. Metodología Experimental para la Producción de Bioetanol	36
3.3.1. Preparación de inóculos	36
3.3.2. Siembra de levadura <i>Saccharomyces c.</i> en el medio de cultivo sólido . . .	39
3.3.3. Activación de levadura <i>Saccharomyces c.</i> para en el sustrato	40
3.4. Fermentación	41
3.4.1. Técnica de conteo de levaduras	43
3.5. Destilación	48
4. Resultados	49
4.1. Resultados y Discusiones	49
5. Conclusión	55
5.1. Conclusión	55
5.2. Perspectivas	55
A. Imágenes de los reactores	57

Índice de figuras

2.1. Producción mundial de energía primaria 2008, 12,369.0 Mtep.[1]	15
2.2. Oferta total mundial de energía primaria 2008, 12,267.4 Mtep. [1]	16
2.3. Consumo mundial de energía por energético 2008, 8,428.4 Mtep.[1]	16
2.4. Consumo total mundial de energía por sector 2008, 8,428.4 Mtep.[1]	17
2.5. Estructura de la producción de energía primaria 2009, 9,852.9 PJ.[2]	20
2.6. Rutas para la producción de bioetanol.[3]	25
3.1. Vista frontal del diseño del reactor de fermentación en 2D.	31
3.2. Vista frontal del diseño del reactor de Destilación en 2D.	34
3.3. Esquema de preparación de inóculos.[4]	36
3.4. Esquema de preparación del medio de fermentación.[4]	41
3.5. Cámara para el conteo de levaduras	44
3.6. Estructura de cuadros de la cámara Neubauer	45
3.7. Recuento por grupos en cámara Thoma y Neubauer, ejemplo.	46
3.8. Curva de crecimiento.[4]	47
4.1. Reactor de Fermentación.	49
4.2. Reactor de Destilación.	50
4.3. Levadura <i>Saccharomyces c.</i> iniciales.	51
4.4. Población de levaduras <i>Saccharomyces c.</i>	52
4.5. Comportamiento experimental de parámetros obtenidos en la fermentación, tales como: temperatura, pH, % SST.	53
A.1. Reactor de fermentación.	57
A.2. Moreductor acoplado al reactor.	57
A.3. Reactor de destilación.	58
A.4. Tapa del reactor de destilación.	58
A.5. Serpentin.	59

A.6. Condensador acoplado al reactor de destilación.	59
A.7. Reactores de fermentación-destilación.	60

Índice de cuadros

2.1. Consumo nacional de Energía (PJ)[2]	18
2.2. Consumo final total de Energía (PJ)[2]	18
2.3. Energía primaria en México (PJ).[2]	19
2.4. Oferta interna bruta de energía (PJ).[2]	20
2.5. Propiedades y características físicas del bioetanol.[3],[5]	24
2.6. Tasa de producción de bioetanol de diferentes materias primas. *Considerado tres cosechas por año.[6]	27
3.1. Símbolos y abreviaturas (preparación del inóculo)	37
3.2. Materiales (preparación del inóculo)	37
3.3. Reactivos (preparación del inóculo)	37
3.4. Equipos (preparación del inóculo)	38
3.5. Símbolos y abreviaturas (siembra de levadura)	39
3.6. Materiales (siembra de levadura)	39
3.7. Equipos (siembra de levadura)	39
3.8. Símbolos y abreviaturas (activación del sustrato)	40
3.9. Equipos (activación del sustrato)	40
3.10. Símbolos y abreviaturas (fermentación)	43
3.11. Reactivos (fermentación)	43
3.12. Materiales (fermentación)	44
3.13. Equipos (fermentación)	44
3.14. Símbolos y abreviaturas (destilación)	48
3.15. Materiales (destilación)	48
3.16. Equipos (fermentación)	48
4.1. Concentración de datos experimentales	51
4.2. Energía consumida en el sistema	53

4.3. Energía final obtenida. Tomando en cuenta que el poder calorífico del bioetanol de $22,350.00 \frac{KJ}{Kg}$. [3]	53
4.4. Rendimiento obtenido	54
4.5. Concentración final	54

Nomenclatura

Abreviatura

Definición

PEMEX	Petróles Mexicanos
SENER	Secretaria Nacional de Energía
GEI	Gases de Efecto Invernadero
MDL	Mecanismo de Desarrollo Limpio
CERs	Certified Emission Reductions (Reducciones Certificadas de Emisión)
.	
FAO	Food and Agriculture Organization (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación)
.	
AEAC	Alcohol Etílico Anhidro Combustible
AEHC	Alcohol Etílico Hidratado Combustible
FFV	Flexible Fuel Vehicle (Veículo de combustible flexible)
MTBE	Metil Ter-butil Éter
TBA	Ter Butil alcohol
TAME	Teramil Metil Éter
SAGARPA	Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación
.	

Símbolos

Significado

PJ	Petajoules
Mtep	Millones de toneladas equivalentes de petróleo
mlts	Millones de litros
°C	Grados Celsius
° GL	Grados Gay Lussac
pH	potencial de Hidrógeno
g	Gramos
l	Litros
ml	Mililitros
m	Metros
cm	Centímetros
pulg	Pulgadas
rpm	Revoluciones por minuto
atm	Atmosferas

Resumen

El bioetanol es uno de los principales biocombustibles obtenido a partir de materia orgánica, actualmente empleado como combustibles en el sector del transporte, este biocombustible además de contar con la característica de obtenerlo a partir de biomasa, resulta interesante emplearlo como fuente de energía limpia y renovable.

En el presente trabajo se estudia el desarrollo, construcción y caracterización de reactores para la producción del bioetanol. Se diseñó los reactores tomando en cuenta los parámetros cinéticos involucrados en el proceso de fermentación y destilación. Se emplea un sistema de medidores para el monitoreo y control de los parámetros cinéticos durante la producción del bioetanol en ambos reactores.

Se llevó a cabo la construcción del reactor de fermentación empleando materiales en acero inoxidable. En este mismo sentido se realizó el desarrollo y construcción del reactor de destilación al igual que el reactor de fermentación todo en acero inoxidable empleando características necesarias para el control del proceso de destilación.

Se desarrolló una metodología del proceso de obtención del biocombustible, se llevó a cabo la preparación del inóculo y crecimiento de las levaduras *Saccharomyces cerevisiae* de la cepa Y2034, con la finalidad de tener levaduras frescas y vivas para realizar la conversión de azúcares a bioetanol mediante la acción metabólica de estas levaduras.

Se llevó a cabo el acondicionamiento del sustrato y el reactor de fermentación, las condiciones de operación fueron: ajuste de la temperatura entre 30 a 35 °C, pH de 4.5 a 5, medio anaerobio, agitación homogénea, estos parámetros son necesarios para el crecimiento óptimo de la levadura, durante la fermentación.

Se realizó la separación del bioetanol de la mezcla resultante de la fermentación, esto con el reactor de destilación por medio de una destilación simple. Finalmente, se llevó a cabo el análisis de cromatografía de gases y conocer la concentración y composición del producto final.

Introducción

Durante el 2008-2009 la crisis económica global desestabilizó los mercados energéticos de todo el mundo, siendo el ritmo al que se recupere la economía global el factor clave que marcará la evolución del sector de la energía en los próximos años.[7]

Los hidrocarburos representan el 55 % del consumo mundial de energía. Son esos combustibles los que permiten la existencia de los medios de transporte rápidos y eficientes que tenemos hoy, así como gran parte de las actividades industriales. Actualmente nadie discute que estos no van a durar más que algunas décadas: como combustibles fósiles, sus reservas son finitas, la seguridad de abastecimiento es problemática para muchos países que los importan y su uso es la principal fuente de los gases que están provocando cambios climáticos y el calentamiento global.[3]

La Secretaría de Energía publicó el en ultimo Balance Nacional de Energía 2009 hasta la fecha, que presenta las estadísticas energéticas a nivel nacional sobre el origen y destino de las fuentes primarias y secundarias de energía durante 2009, entre los resultados se destaca la producción de energía primaria que totalizó 9,852.9 PJ, un retroceso de la producción primaria del 12.7 % con respecto a 2008.[2]

El agotamiento de los combustibles fósiles hace imperativa la investigación de nuevas formas de producir energía así mismo el fomento y uso de nuevos combustibles. Es preciso, entonces, encontrar sustitutos para esos combustibles y nada más racional que producirlos en base a materia orgánica renovable. Una fuente de energías nuevas es la biomasa que supone la obtención de biocombustible desde fuentes vivas. Uno de estos biocombustibles es el bioetanol o alcohol etílico producido a partir de la fermentación de los azúcares que se encuentran en los productos vegetales (cereales, caña de azúcar, remolacha), el que debidamente procesado ha comenzado a penetrar como biocombustible en el mercado internacional a demas de ser un excelente sustituto para la gasolina, principal combustible usado en automóviles en el mundo.

En el caso del bioetanol que se produce por la fermentación de los azúcares contenidos en la materia orgánica de las plantas. En este proceso se obtiene el alcohol hidratado, con un contenido aproximado del 5 % de agua, que tras ser deshidratado se puede utilizar como biocombustible. El bioetanol mezclado con la gasolina produce un biocombustible de alto poder energ'etico con características muy similares a la gasolina pero con una importante reducción de las emisiones contaminantes en los motores tradicionales de combustión. El bioetanol se usa en mezclas con la gasolina en concentraciones del 5 % o el 10 %, E5 y E10 respectivamente, que no requieren modificaciones en los motores actuales.[8]

El bioetanol a diferencia de otras fuentes alternativas de energía renovables, es de fácil manejo por ser un fluido de características versátiles, por lotanto esto prodria aprovecharse de una manera sustentable tanto para México como para otros países en el cual su abastecimiento energético se encuentre en declive, claro para ello se deben tomar ciertas medidas y con estricto cuidado de no comprometer las fuentes alimentarias de la población.

1.1. Antecedentes

En el contexto de la Convención Marco sobre el Cambio Climático, en el año 1997 se adoptó el Protocolo de Kyoto, que regula y fija obligaciones para 39 países, en su mayoría desarrollados, para rebajar sus emisiones de GEI en un promedio de 5 a 2%, en el período 2008 - 2012, tomando como base las emisiones del año 1990. Entre las alternativas para la reducción de emisiones de GEI, el Protocolo de Kyoto propone el llamado Mecanismo de Desarrollo Limpio. Este mecanismo ofrece a los países desarrollados la posibilidad de reducir emisiones de GEI fuera de sus fronteras, financiando distintos tipos de proyectos en países en desarrollo. Los beneficios económicos que adquieren los proponentes de proyectos que aplican MDL provienen de la obtención de las CERs o más conocidos como Bonos Verdes.

De esta manera el Protocolo de Kyoto crea oportunidades tanto en el sector ambiental como en otros sectores de la economía, principalmente por la vía de proyectos de sustitución de combustibles fósiles, de mejora de procesos tecnológicos, de captación y eliminación de GEI y de forestación.

Es por medio de los MDL que se han enfocado en el desarrollo de proyectos basando en energía renovable, debido a que los proyectos de biocombustible son proyectos de energía renovable, estos forman parte de los MDL.[9]

El protocolo de Kyoto y por consecuencias los MDL sucesos de la implantación de un programa que fue lanzado en 1997, el Proálcool (Proalcohol-Programa Nacional del Alcohol).

La crisis del petróleo en los años 70 motivó al gobierno a desarrollar una forma alternativa de reemplazar la gasolina. Nace entonces el bioetanol, un combustible obtenido a partir de la fermentación del jugo de la caña de azúcar, melaza o ambas. En los años 80, un 85% de los coches funcionaba exclusivamente con alcohol. La producción de etanol de aquella década llegó a superar la producción de azúcar por las plantas industriales. El proceso de fermentación que hasta entonces se restringía a la fabricación del aguardiente o bioetanol como subproducto de la fabricación del azúcar pasa a ocupar un lugar destacado en el escenario empresarial. En función de ello, se ha sugerido procesos que involucran conceptos de ingeniería. En gran parte, se comprendieron los fenómenos biológicos que involucraban la fermentación para que de esta manera obtener mayores rendimientos de producción de bioetanol.[10]

1.2. Justificación

No es necesario conocer a fondo las consecuencias tanto de la obtención como el uso de la energía de hidrocarburos para darse cuenta de los impactos que han venido ocasionando anualmente los altos costos que se han reflejado en los últimos años que cada vez van en aumento, para darnos cuenta de la necesidad que se tiene de producir fuentes de energías viables y como consecuencia de alguna forma sustituir la dependencia de los hidrocarburos como materia prima. Por otro lado la idea de producir energía limpia y sobre todo de manera sustentable es la que muchos investigadores comparte, existen países que desde hace un par de décadas han optado e invertido en el desarrollo de nuevas formas de producir energía.

El interés mundial por el desarrollo de los biocombustibles se empezó a incrementar hacia mediados de la década pasada (2005), en el marco de una preocupación más amplia para el desarrollo de fuentes nuevas de energía, que permitan avanzar en la superación del modelo energético actual,

basado en los combustibles fósiles. En ese escenario destaca Brasil, cuyo programa de bioetanol de caña de azúcar presenta resultados interesantes, desde la investigación de variedades de caña de mayor rendimiento, hasta la fabricación de motores que funcionan con cualquier mezcla de gasolina y etanol.

La bioenergía representa una de las alternativas para el desarrollo sustentable en México siempre y cuando se desarrollen conocimientos necesarios y emprendedores para aprovechar al máximo los recursos sin comprometer otros sectores esenciales para la sociedad y de esta manera establecer un modelo energético capaz de atender las demandas urgentes como; uso de combustibles sustentables a bajo costo, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la calidad de la vida humana. Además de ello, esta vía puede proporcionar una nueva dinámica agro industrial para el país, capaz de otorgar seguridad energética y traer nuevas perspectivas de crecimiento económico.

El bioetanol se puede utilizar en motores vehiculares, puro o en mezclas con gasolina, con buen desempeño y empleando esencialmente el mismo sistema de distribución y almacenaje existente para la gasolina. La experiencia brasileña en este campo puede y debe ser una referencia para el país y contextos similares. En los últimos años son muchos los países en condiciones de promover la producción y el uso del bioetanol de caña de azúcar, aplicando el ejemplo de Brasil a sus características y potenciales.

En México se pueden desarrollar cultivos para biocombustibles que no necesariamente compiten con los alimentos, colaborando en el desarrollo sostenible de áreas que podrían incorporarse a la producción agrícola, sin tampoco desplazar fronteras forestales. Por otro lado se requiere de investigación para el máximo aprovechamiento durante todo el ciclo de la caña de azúcar así como una metodología y equipos que permita controlar y realizar de forma óptima el proceso de obtención del bioetanol. Todos los aspectos hasta aquí relacionados constituyen la base y la justificación para llevar a cabo la investigación planteada en la sección de los objetivos.

Hay ciertamente mucho que hacer y desafíos por superar para la expansión de los sistemas bioenergéticos, pero los beneficios serán proporcionales, en la medida en que se determine un desarrollo energético consistente y saludable. La producción y el uso del bioetanol de caña de azúcar ofrecen la perspectiva concreta de una realidad energética más sostenible.[3]

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Desarrollo y Caracterización de un equipo de Fermentación-Destilación que permita controlar las mediciones de los parámetros cinéticos involucrados en el proceso de producción del Bioetanol.

1.3.2. Objetivos específicos

- Llevar a cabo el desarrollo y construcción del reactor de fermentación y destilación.
- Implementar los sistemas de medición de parámetros
- Establecer el proceso de fermentación.

- Establecer la metodología para la producción del bioetanol.
- Evaluar la calidad del bioetanol obtenido.

1.4. Metas

- Desarrollar un sistema de fermentación/destilación con las características necesarias para controlar los parámetros cinéticos en la producción del bioetanol.
- Acoplar los reactores de fermentación/destilación para el proceso de obtención de bioetanol.
- Montar el sistema de producción de bioetanol utilizando jugo de caña de azúcar como materia prima.

Marco Teórico

2.1. Contexto Energético Mundial

De acuerdo con información de la Agencia Internacional de Energía, en 2008 la producción mundial de energía primaria totalizó 12,369.0 Mtep, 3.2% mayor a lo producido en 2007. La producción mundial de carbón y sus derivados, gas natural y renovables aumentó 5.8%, 4.0% y 3.4%, respectivamente. También hubo crecimientos, aunque menores, en la producción mundial de crudo (1.1%) y nucleoenergía (0.4%). Como se puede observar en la Figura 2.1, 32.7% de la producción mundial correspondió a crudo, 27.6% a carbón y sus derivados, 21.2% a gas natural, 12.9% a energías renovables y 5.8% a nucleoenergía.

Al igual que en 2007, los países con mayor producción primaria fueron China, Estado Unidos, Rusia, Arabia Saudita e India, con participaciones de 16.1%, 13.8%, 10.1%, 4.7% y 3.8%, respectivamente. México se situó en el décimo lugar en ambos años. En 2008 aportó 1.9% de la energía total producida en el mundo, mientras que en 2007 su participación fue de 2.0%. [1]

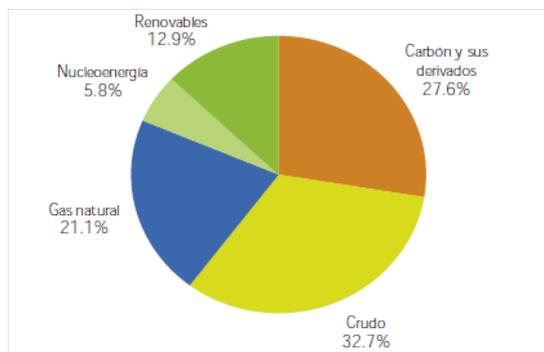


Figura 2.1: Producción mundial de energía primaria 2008, 12,369.0 Mtep.[1]

En 2008 según informes de PEMEX se exportó un volumen cercano a 4,746.1 Mtep, 1.8% mayor a 2007. Esto fue motivado principalmente por el incremento en el volumen de exportaciones de gas natural (4.7%), carbón (1.9%) y biomasa y desechos (52.6%).

Las exportaciones de biomasa y desechos crecieron de forma considerable; no obstante, su participación en las exportaciones totales fue marginal (0.2%). Los mayores exportadores en 2008 fueron Arabia Saudita, Rusia, Irán, Emiratos Árabes Unidos y Nigeria.

En 2008 las importaciones totales de energía crecieron 1.0%, como resultado principalmente del crecimiento de 3.4% en las importaciones de gas natural. Los países con mayores niveles de importación fueron Estados Unidos, Japón, Alemania, China y Corea del Sur.

2.1.1. Oferta y Demanda de energía

La oferta total de energía a nivel mundial sumó 12,267.4 Mtep en 2008, 1.9 % por arriba de lo ofertado en 2007.

Estados Unidos, China, Rusia, India y Japón fueron los países con mayor oferta, mientras tanto la oferta total de energía per cápita a nivel mundial fue de 1.8 tep por habitantes, 0.5 % mayor que en 2007. En 2008 Qatar fue el país con mayor oferta de energía per cápita (18.8 tep por habitante). Como se muestra en la Figura 2.2, la oferta total de energía mundial en 2008

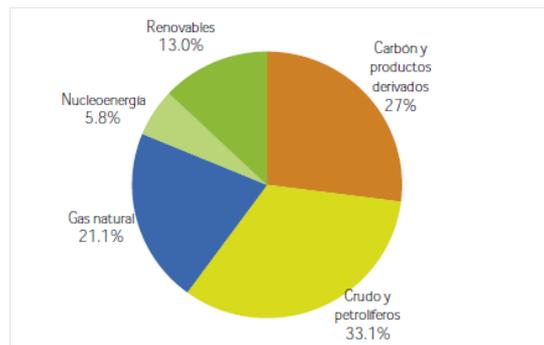


Figura 2.2: Oferta total mundial de energía primaria 2008, 12,267.4 Mtep. [1]

se compuso por crudo y petrolíferos (33.1 %), carbón y sus productos derivados (27.0 %), gas natural (21.1 %), renovables (13.0 %) y nucleoenergía (5.8 %). Destacaron los aumentos anuales de 3.9 % en la oferta de carbón y sus productos derivados, 3.5 % renovables y 2.5 % gas natural. La oferta de crudo y petrolíferos disminuyó 0.5 % de 2007 a 2008.

El consumo de energía a nivel mundial aumentó 1.7 % durante 2008 con respecto a los niveles de consumo registrados en 2007, al totalizar 8,428.4 Mtep. En cuanto al comportamiento por energético, los mayores crecimientos en el consumo fueron los de energía solar y eólica y carbón, con 19.8 % y 12.6 % respectivamente.

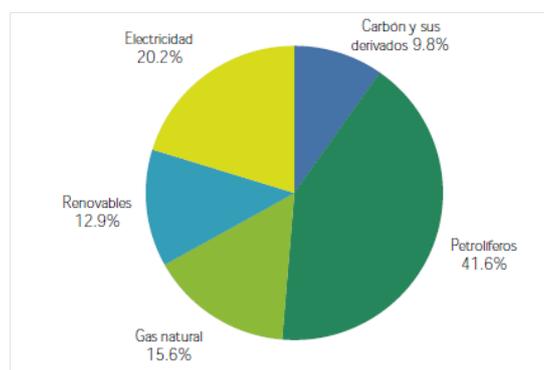


Figura 2.3: Consumo mundial de energía por energético 2008, 8,428.4 Mtep.[1]

Estados Unidos fue el mayor consumidor de energía en 2008, con una participación de 18.3 %, pese a que su población representó menos de 5.0 % del total mundial. China, Rusia, India y Japón ocuparon la segunda, tercera, cuarta y quinta posición, respectivamente. Estos cinco

países produjeron en conjunto 50.3% del PIB mundial en 2008 y consumieron 48.3% de la energía a nivel mundial.

Como se muestra en la figura 2.3 los petrolíferos fueron los que dominaron el consumo en 2008, motivado en gran medida por la demanda del sector transporte y el industrial. No obstante, el consumo de petrolíferos cayó 0.8%.

Por otro lado el sector industrial consumió la mayor parte de la energía a nivel mundial en 2008, con una participación de 28.0% del total. Este sector mostró una variación de 2.8% respecto a 2007, impulsada por el crecimiento en la demanda de carbón y de electricidad, cuya participación fue de 25.7%, como se observa en la siguiente figura.

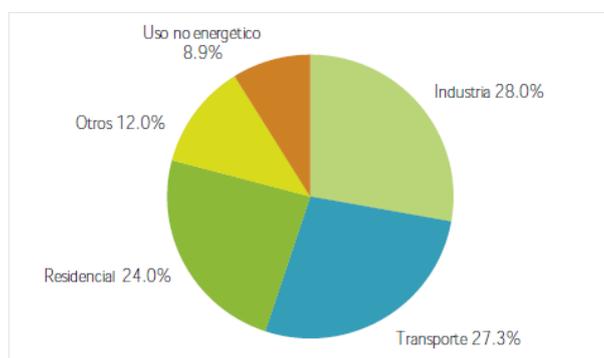


Figura 2.4: Consumo total mundial de energía por sector 2008, 8,428.4 Mtep.[1]

El transporte, segundo sector en importancia, aumentó su consumo 0.4% anual. Este crecimiento marginal se vio motivado por la caída de 0.3% en la demanda de petrolíferos, los cuales representaron 93.5% del consumo. Cabe destacar que el uso de biomasa en este sector mostró un crecimiento de 34.9%.

El consumo en el sector residencial creció 2.5% anual, del cual 39.8% correspondió a biomasa, 20.7% a gas natural y 19.6% a electricidad, estos tres energéticos mostraron crecimientos de 1.6%, 2.2% y 3.2%, respectivamente.

2.2. Consumo y Producción Nacional de Energía

El consumo de energía total per cápita en 2009 fue 76.7 GJ por habitante, 1.3% inferior a 2008, esta caída derivado del menor consumo de energía. El consumo nacional de energía, el cual es equivalente a la oferta interna bruta total, cayó a una tasa de 0.5% de 2008 a 2009, derivado en mayor medida por la menor demanda de combustibles para consumo final, como puede observarse en el siguiente cuadro 2.1.

En 2009 el consumo final total de energía, que representó 58.1% del consumo nacional, disminuyó 6.5%, derivado a la menor demanda de combustibles del mercado nacional. El consumo no energético, es decir la energía primaria y secundaria que se utiliza como materia prima, creció 2.6% y representó 2.8% del consumo nacional.

El consumo energético, el cual se refiere a los combustibles primarios y secundarios utilizados para satisfacer las necesidades de energía de los sectores transporte, industrial, residencial, comercial, público y agropecuario, abarcó 55.4% del consumo nacional de energía.

	2008	2009	Variación	Estructura	
			Porcentual (%) 2009/2008	Porcentual (%) 2008	2009
Consumo nacional	8,291.08	8,246.96	-0.5	100	100
Consumo sector energético	2,565.06	2,826.55	10.2	30.9	34.3
Consumo transformación consumo propio	1,532.26 853.86	1,805.05 837.04	17.5 -2.0	18.5 10.3	21.9 10.1
Pérdidas por distribución	178.93	184.45	3.1	2.2	2.2
Recirculaciones	556.42	627.88	12.8	6.7	7.6
Diferencia estadística	40.18	-2.71	-	0.5	0.0
Consumo final total	5,129.23	4,795.24	-6.5	61.9	58.1
Consumo no energético	221.33	227.17	2.6	2.7	2.8
Consumo energético	4,908.10	4,568.07	-6.9	59.2	55.4

Cuadro 2.1: Consumo nacional de Energía (PJ)[2]

El Consumo final de energía en 2009 que es la suma del consumo no energético y el consumo energético mostró una disminución de 6.5% respecto a 2008, al totalizar 4,795.2 PJ, como se muestra en el siguiente cuadro 2.2.

	2008	2009	Variación	Estructura	
			Porcentual (%) 2009/2008	Porcentual (%) 2008	2009
Consumo final total	5,129.43	4,795.24	-6.5	100	100
Consumo no energético total	221.33	227.17	2.6	4.3	4.7
Petroquímica de Pemex	110.05	115.78	5.2	2.1	2.4
Otras ramas	111.28	111.39	0.1	2.2	2.3
Consumo energético total	4,908.10	4,568.07	-6.9	95.7	95.3
Transporte	2,433.35	2,224.50	-8.6	47.4	46.4
Industrial	1,402.93	1,283.62	-8.5	27.4	26.8
Residencial, comercial y público	922.68	913.42	-1.0	18.0	19.0
Agropecuarios	149.15	146.53	-1.8	2.9	3.1

Cuadro 2.2: Consumo final total de Energía (PJ)[2]

El consumo no energético, que representó 4.7% del consumo final, aumentó 2.6%, como resultado del crecimiento de 3.1% anual en el uso de productos no energéticos, que aportaron más del 80% de este consumo. El consumo de los sectores transporte, industrial, residencial, comercial, público y agropecuario conformó el consumo energético total y totalizó 4,568.1 PJ en 2009, lo que implicó un aporte de 95.3% del consumo final total.

En 2009 el consumo final energético disminuyó 6.9%, lo anterior fue impulsado en gran medida por la menor demanda de combustibles en los sectores transporte e industrial, resultado de la crisis financiera.

El sector transporte consumió 48.7%, por lo tanto se mantuvo como el principal consumidor de energía en México. El sector industrial le siguió en importancia, con una participación en el consumo de 28.1%. Los sectores residencial, comercial y público emplearon 16.7%, 2.7% y 0.6%, respectivamente, de la energía para consumo final. Por su parte, el sector agropecuario consumió 3.2% de la energía final.

2.2.1. Producción de energía primaria

En 2009 la producción nacional de energía primaria totalizó 9,852.9 PJ, 4.2 % menor a la registrada en 2008, como se puede apreciar en el siguiente cuadro 2.3.

	2008	2009	Variación	Estructura Porcentual	
			Porcentual (%) 2009/2008	2008 %	2009 %
Total	10,284.55	9,852.92	-42	100	100
Carbón	229.30	212.00	-7.5	2.2	2.2
Hidrocarburos	9,278.03	8,920.38	-3.9	90.2	90.5
Petróleo crudo	6,520.85	6,058.73	-7.1	63.4	61.5
Condensados	91.45	86.08	-5.9	0.9	0.9
Gas natural	2,665.74	2,775.57	4.1	25.9	28.2
Nucleoenergía	106.64	112.75	5.7	1.0	1.1
Renovables	670.58	607.80	-9.4	6.5	6.2
Hidroenergía	140.01	95.20	-32.0	1.4	1.0
Geoenergía	162.83	155.53	-4.5	1.6	1.6
Energía solar	5.62	6.75	20.2	0.1	0.1
Energía eólica	0.94	0.91	-2.2	0.0	0.0
Biomasa	361.18	349.40	-3.3	3.5	3.5
Bagazo de caña	99.13	88.73	-10.5	1.0	0.9
Leña	262.05	260.68	-0.5	2.5	2.6

Cuadro 2.3: Energía primaria en México (PJ).[2]

En buena medida, la caída de 7.1 % en la producción de crudo, principal energético primario, motivó la menor producción de energía primaria. Este comportamiento se debió en parte a la declinación en la producción del Activo Integral Cantarell, segundo en importancia, al aportar 26.3 % de la producción nacional observada desde 2005. De dicho año a 2009, la tasa de decrecimiento promedio de Cantarell fue 23.4 % anual, misma que se agudizó en 2009, al caer 34.3 % respecto a 2008.

Como se puede apreciar en la figura 2.5, la producción de hidrocarburos continuó predominando la canasta de energía primaria en México en 2009, con una participación de 90.5 %, al sumar 8,920.4 PJ. De dicha cantidad de energía, 61.5 % correspondió a crudo, 28.2 % a gas natural y el 0.9 % restante a condensados; destacando la pérdida de 2.4 puntos porcentuales en la participación del petróleo crudo de 2008 a 2009, mismos que fueron absorbidos por el gas natural.

2.2.2. Oferta nacional de energía

En 2009 la disponibilidad interna de energía total disminuyó a una tasa de 0.5 % anual, resultado de la menor producción y la disminución en las importaciones de energía como se puede observar en el siguiente cuadro. La relación producción entre oferta interna bruta, que mide el grado en que la producción nacional satisface los requerimientos de energía del país, fue superior a uno, indicando que la mayor parte de la oferta fue cubierta con la producción nacional. No obstante, en la relación se observó una contracción de 3.7 % respecto a 2008, al ubicarse en 1.19, derivado de la disminución en la producción primaria.

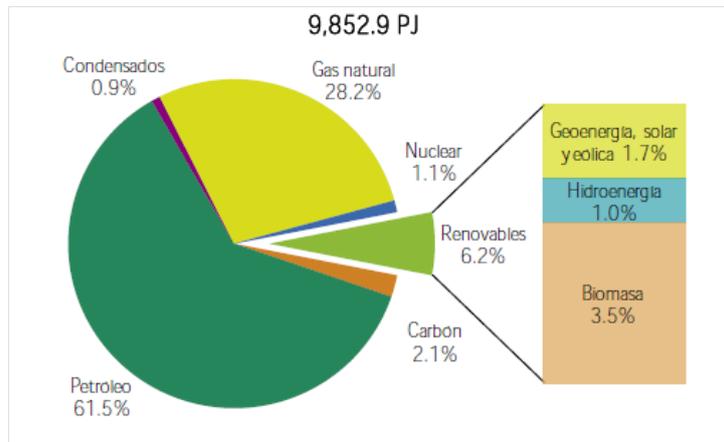


Figura 2.5: Estructura de la producción de energía primaria 2009, 9,852.9 PJ.[2]

	2008	2009	Variación Porcentual (%) 2009/2008
Total	8,291.08	8,246.96	-0.5
Producción	10,284.55	9,852.92	-4.2
De otras fuentes	627.75	717.09	14.2
Importación	1,812.14	1,660.35	-8.4
Variación de Inventarios	-135.68	-107.35	-20.4
No aprovechada	-540.37	-428.37	-20.7
Exportaciones	-3,757.30	-3,447.10	-8.3

Cuadro 2.4: Oferta interna bruta de energía (PJ).[2]

En 2009 fue necesario importar 1,660.4 PJ, es decir 20.1 % de la oferta interna bruta de energía total. Esta relación entre las importaciones y la oferta interna bruta mostró una disminución de 1.7 puntos porcentuales respecto a 2008.

En 2009 la oferta interna bruta de energías renovables totalizó 603.6 PJ, cifra 9.3 % menor a la de 2008. La caída en la producción de leña, geoenergía, hidroenergía, bagazo de caña y energía eólica afectó de forma directa en la oferta de estos combustibles. Su aportación a la oferta total pasó de 8.0 % en 2008 a 7.3 % en 2009.

2.3. Bioenergía

La conversión de energía solar en energía química, que se realiza en los vegetales durante la fotosíntesis, es uno de los fenómenos más fascinantes de la naturaleza. Esta conversión de energía solar a energía química se llevaba a cabo mediante una tasa de alta eficiencia.[6] En la planta iluminada por el sol, la fugaz radiación solar se transforma en productos estables, absolutamente esenciales a la vida en nuestro planeta. Y, desde el inicio de la vida, fue el mundo vegetal lo que garantizó la energía y materias primas de amplio uso. Tras la breve interrupción en los últimos siglos, durante los cuales la energía solar fosilizada pasó a ser ambiciosamente explotada y utilizada, en forma de carbón, petróleo y gas natural, la energía fotosintética vuelve, lentamente, a ser la protagonista principal.

La energía química es la forma de energía que se genera a través de reacciones químicas en las que tienen lugar cambios de composición, transformándose los reactivos en productos, generalmente con liberación de calor. Por ejemplo, la energía química que está disponible en los alimentos y en los combustibles, se usa en los procesos vitales de los animales y de las personas, así como para mover vehículos, entre otros fines.

Un caso particular de energía química es la bioenergía, que se puede definir como cualquier forma de energía asociada a formas de energía química acumulada mediante procesos fotosintéticos.

En general, se denomina bioenergía a los recursos naturales que provienen de la biomasa y que se pueden procesar para obtener formas bioenergéticas más elaboradas y adecuadas para el uso final. Por lo tanto, serían ejemplos de fuentes de bioenergía la leña y los residuos de aserraderos, el carbón vegetal, el biogás resultante de la descomposición anaeróbica de los residuos orgánicos, así como los biocombustibles líquidos, como el bioetanol y el biodiésel.[3]

Entonces la bioenergía resulta cuando los combustibles de la biomasa de reciente origen biológico son usados para fines energéticos. Los productos secundarios en estado sólido, líquido y gaseoso son a menudo utilizados como portadores de energía.

En cuanto a sus características generales, la bioenergía tiene ventajas en cuanto a la densidad energética, la cualidad de ser transportable y su no intermitencia porque es por sí misma una forma de almacenamiento de energía, y es completamente despachable ya que pueden utilizarse en el momento en que se necesite.

La bioenergía puede proveer una amplia variedad de servicios (calefacción, alumbrado, confort, entretenimiento, información, etc.) a través de su uso para la producción de combustibles que son flexibles en el sentido de adaptarse a las diferentes necesidades de energía. Su composición química es similar a la de los combustibles fósiles, los cuales se originaron a partir de la biomasa hace millones de años, lo que además de su uso energético, crea la posibilidad de originarse a partir de la biomasa. Finalmente, el recurso disponible de la biomasa surge de una amplia variedad de materia orgánica y puede además constituirse en una fuente renovable de energía. [11]

2.3.1. Los Biocombustibles

De acuerdo con la FAO (1980) la biomasa se define como el conjunto de plantas terrestres y acuáticas, junto con sus derivados, subproductos y residuos que se producen en su transformación. Según Jiménez Gómez (1991) el término **biomasa** comprende, pues, a las materias

hidrocarbonadas, no fósiles, en la que mediante el proceso básico de la fotosíntesis se ha producido la reducción y fijación del CO_2 . La energía de la biomasa es una energía que cumple las siguientes características:

1. Es una energía autóctona, lo cual conlleva su no dependencia de otros, por lo menos en su fase de obtención.
2. Es una energía renovable, pues procede del sol.

Se entiende por biocombustible aquel combustible de origen biológico que no se ha fosilizado. Los biocombustibles se refieren específicamente a los combustibles obtenidos de la biomasa y que se usan en el sector transporte. En última instancia el origen de los biocombustibles es la energía solar que es almacenada por los seres vivos en forma de biocombustibles. Los biocombustibles se pueden clasificar atendiendo varios criterios. La clasificación en función del origen y apariencia física de los mismos.

Clasificación de los biocombustibles en función de su origen.

- Cultivos energéticos: Agrícolas y forestales (Cardo, sorgo, miscando, girasol, soja, maíz, trigo, cebada, remolacha, especies C_4 agrícolas. Y chopos, sauces, eucaliptos, robinas, acacias, especies C_4 forestales, respectivamente).
- Restos de cultivos agrícolas: Cultivos herbáceos y cultivos leñosos (Paja, restos de cereales y otras especies herbáceas. Y Olivo, vid, frutales de hueso, frutales de pepita y otras especies leñosas, respectivamente).
- Restos de tratamientos selvícolas: Podas, claras, clareos, restos de cortas finas (Especies forestales de los montes).
- Restos de industrias forestales: Industrias de primera transformación de la madera y industrias de segunda transformación.
- Restos de industrias agro-alimentarias: Especies vegetales usadas en la industria de alimentación.
- Restos de explotaciones ganaderas: Animales de granja, domésticos.
- Restos de actividades humanas: Todo tipo de biomasa sólida urbana.

Clasificación de los biocombustibles según su aspecto físico.

- Sólidos: Leñas y astillas, pajas de cereales y biomasa de cardo, biocombustibles sólidos densificados, y carbón vegetal.
- Líquidos: Líquido piroleñoso, líquido de hidrólisis, bioetanol y bioalcoholes, aditivos oxigenado, aceite vegetal y biodiesel.
- Gases: Biogás de origen muy diverso. [5]

Los biocombustibles líquidos, principalmente biodiesel y bioetanol por ser los más empleados y los recientemente más desarrollados para su producción, son procesados a partir de los cultivos agrícolas y de otras materias primas renovables de base, seguido por la producción de biogas y caso particular el biohidrogeno,

Son muchas las ventajas que tienen los biocombustibles, principalmente en relación con los fósiles, pero resulta oportuno señalar tres aspectos importantes:

1. Por ser obtenidos a partir de biomasa, su nivel de emisión de gases de efecto invernadero, y en particular de dióxido de carbono, a lo largo de todo su ciclo de vida es menor al de los fósiles, constituyendo una alternativa renovable y limpia que bajo ciertas circunstancias, posibilita la obtención de CERs, mejorando así la tasa de rentabilidad de los proyectos de inversión para producción y consumo.
2. Permiten a pequeños productores y a comunidades rurales obtener un producto de mayor valor agregado, integrándose por ejemplo bajo ciertas legislaciones para la producción y posterior transformación del de materias primas, obteniendo así recursos energéticos para proyectos de comercialización o autoconsumo, tanto en transporte como en otros procesos productivos.
3. Posibilitan integrar la producción de biocombustible como un eslabón más en la cadena de producción de materias primas, obteniendo adicionalmente al biocombustible un insumo para la elaboración de alimento para ganado, que combinado con políticas adecuadas impulsen a otros sectores. Asimismo, el desarrollo y uso de tecnologías adecuadas que permitan la obtención de un producto de calidad compatible con los estándares internacionales.

2.3.2. Bioetanol

El bioetanol o alcohol etílico que se produce a partir de la fermentación de materia rica en azúcares, es una sustancia con fórmula molecular C_2H_6O , que puede ser utilizada como combustible en motores de combustión interna con ignición a chispa (ciclo Otto) de dos maneras, básicamente:

- 1) en mezclas de gasolina y etanol anhidro; o
- 2) como etanol puro, generalmente hidratado.

El cuadro 2.5 sintetiza las principales características del bioetanol.

Según la legislación brasileña clasifica al alcohol etílico anhidro combustible y alcohol etílico hidratado combustible, considerando concentraciones en masa, el AEAC debe contener menos del 0.6 % de agua, mientras que para el AEHC esta concentración debe estar entre el 6.2 % y 7.4 %. Expresados como proporción en volumen a 20°C, estos valores corresponden, respectivamente, a una concentración máxima del 0.48 % para el etanol anhidro y una franja del 4.02 % a 4.87 % para el etanol hidratado.

El bioetanol representa una importante alternativa como combustible automotriz, ya que reporta un índice de octano superior al de la gasolina y tiene una presión de vapor inferior, lo que da como resultado menores emisiones evaporativas.

Parametros	Unidad	Bioetanol
Composición	–	C_2H_5OH
Poder calorífico inferior	KJ/Kg	28,225
	KJ/litro	22,350
Peso molecular	g/mol	46
Densidad	Kg/litro	0.792
Rango de ebullición.	°C, 1 atm.	78.17
Punto de inflamabilidad	°C	21.11
Octanaje RON (Research Octane Number)	–	102 - 130
Octanaje MON (Motor Octane Number)	–	89 - 96
Calor latente de vaporización	KJ/Kg	842 - 930
Relación aire/combustible estequiométrica	-	9
Presión de vapor	Kpa	15 - 17
Temperatura de ignición	°C	550
Contenido de azufre	% en peso	0
Solubilidad en agua	% en volumen	100
Grado alcohólico	% en volumen	99.5 - 95

Cuadro 2.5: Propiedades y características físicas del bioetanol.[3],[5]

2.3.3. Materias primas y viables para la producción de bioetanol

La biomasa a partir de las cuales es posible obtener bioetanol por medio de la fermentación alcohólica son los que contiene azúcares (glucosa, fructosa, xilosa, entre otros) o polisacáridos (almidón, celulosa, hemicelulosa). Esta biomasa se puede clasificar convenientemente en tres tipos principales. Fuentes con alto contenido de azúcares, fuentes con alto contenido de almidón, y fuentes con alto contenido de celulosa.[12]

Fuentes con alto contenido de azúcares: Son materias primas que poseen un alto contenido de azúcares simples y fermentables, como la glucosa, la fructosa, la galactosa y la sacarosa. Las más importantes incluyen caña de azúcar (usado principalmente por Brazil), frutas, melazas y azúcar de remolacha. La ventaja de utilizar este tipo de fuentes consiste en que no es necesario realizar tratamientos previos para obtener los azúcares fermentables, ya que estos se encuentran presentes. Actualmente la fuente con alto contenido de azúcares más empleada son las melazas, jarabes oscuros y de una alta viscosidad, las cuales son subproducto resultante del proceso de refinación del azúcar.

Inicialmente, el término melaza se refería específicamente al efluente final obtenido luego del procesamiento de los jugos de la caña de azúcar o de la remolacha para obtener sacarosa (azúcar común), a partir de evaporación, cristalización y centrifugación sucesivas; ahora, se reconoce como melaza a cualquier producto líquido que contenga más de 43 % de azúcares.

Fuentes con alto contenido de almidón: Son materias primas que poseen un alto contenido de almidón. Incluyen todos los cereales (maíz, arroz, trigo, centeno, cebada, etc), así como tubérculos como la yuca y la papa. Estas fuentes deben ser tratadas previamente para obtener los azúcares fermentables. En el caso de los cereales, estos deben someterse previamente a un proceso de hidrólisis del almidón, con el fin de romper este biopolímero en azúcares fermentables

que estén disponibles para los microorganismos encargados de la fermentación alcohólica. Entre los cereales que actualmente se emplean para la producción de alcohol carburante es el maíz el de mayor uso por los Estados Unidos.

Existen dos métodos primarios para este proceso: la molienda seca y la molienda húmeda. Ambos procesos tienen en su conjunto global los mismos pasos: preparación de la materia prima, la fermentación alcohólica y la recuperación del bioetanol.

Fuentes con alto contenido de celulosa: Las materias primas con alto contenido de celulosa son las fuentes más abundantes de biomasa a nivel global, y su uso ha tenido un creciente interés global. Sin embargo, la compleja composición química de estas fuentes ha planteado retos tecnológicos que aún no han podido ser satisfactoriamente superados. Las principales fuentes lignocelulósicas están conformadas por: Madera, residuos agrícolas, residuos municipales y residuos de papel.

La biomasa vegetal se compone en un 90 % de lignocelulosa, la cual está conformada por polisacáridos (celulosa y hemicelulosa) y lignina. La lignina es una molécula bastante compleja constituida por la unión de varios ácidos y alcoholes fenilpropílicos (cumarílico, coniferílico y sinapílico), todos ligados entre sí en una estructura tridimensional.[13],[14]

En la figura 2.6 se observa el esquema de las diferentes rutas para la obtención de bioetanol.

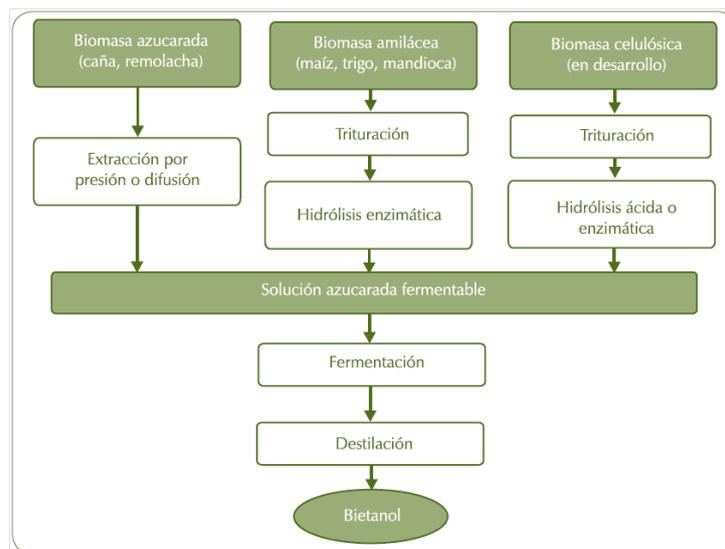


Figura 2.6: Rutas para la producción de bioetanol.[3]

2.3.4. Proceso de obtención de bioetanol

El proceso de obtención de bioetanol es un proceso complicado puesto que la transformación de los recursos biológicos como cultivos ricos en energía como la caña de azúcar, maíz o la biomasa lignocelulósica requieren de acondicionamientos o tratamientos previos para la fermentación de los microorganismos y convertirlos en bioetanol.[14]

La fermentación alcohólica comprende toda una serie de reacciones bioquímicas a través de las cuales algunos microorganismos, por medio de un conjunto de enzimas producidas por ellos (o

añadidas artificialmente), realizan una transformación de zúcares para convertirlos en bioetanol, dióxido de carbono y energía.

La reacción global general que resume al todo el proceso cuando se fermentan hexosa es como sigue:



Generalmente, los microorganismos más empleados en la obtención de bioetanol son las levaduras, aunque existen varios tipos de bacterias y hongos que también son capaces de sintetizarlo en cantidades considerables.

La levadura *Saccharomyces cerevisiae* es el microorganismo universal para la fermentación alcohólica (producción de bioetanol), usando como materia primas los azúcares que son metabolizados, en el proceso incluyen la glucosa, fructosa, mannososa, galactosa, sacarosa y maltosa. La fermentación alcohólica es un proceso biológico anaerobio (ausencia de oxígeno), excepto durante el tiempo de inoculación, durante el cual se insufla una pequeña cantidad para permitir un crecimiento limitado de los microorganismos.[15]

El rendimiento en la conversión de bioetanol se calcula como la relación entre la máxima concentración de bioetanol producido y la glucosa consumida (diferencia entre la concentración de glucosa inicial y final) y expresado como porcentaje (%) del rendimiento teórico, considerado como el rendimiento una producción de 0.511 g de bioetanol por g de glucosa.

Para el caso de la viabilidad de la levadura se calculado como la relación entre las células totales y las viables (no teñidas).[16] La eficiencia química de fermentación varía de un 80 a 90%, mientras que el líquido resultante contiene acerca de un 7 a 10 GL. de bioetanol, que tras ser destilado se lleva a cabo la separación y recuperación del bioetanol del resto de materia.[17]

El proceso de destilación es una de las más empleadas en la industria química, petroquímica, alimentaria, farmacéutica y perfumera, para la separación de los componentes que forman mezclas líquidas miscibles. La destilación es una operación unitaria de transferencia de masa, tal como la absorción o la cristalización. Los vapores obtenidos se recuperan como producto deseable y se condensan. Los vapores condensados son más ricos en el líquido o líquidos más volátiles, mientras que los fondos, o líquidos remanentes, son más ricos en las sustancias menos volátiles. Esta operación recibe también los nombres de alambicación, refinación, agotamiento, fraccionamiento y rectificación.

El proceso completo de producción de bioetanol requiere de una considerable energía de entrada usualmente para el caso de el bioetanol de caña de azúcar se emplea el bagazo resultante para suministrar el calor requerido en el proceso.

En el cuadro 2.6 se puede observar el rendimiento de bioetanol en litros por tonelada de biomasa y por hectárea de cosecha anual.

El término alcohol de grano se emplea, a veces, para indicar alcohol etílico en contraste con el alcohol metílico (CH₃OH) o metanol, que se fabrica por destilación destructiva de la madera, por síntesis o por otros medios. El alcohol de melazas es alcohol producido de melazas de azúcar de caña. El alcohol industrial es alcohol etílico usado para fines industriales.

Materia Prima	Producción (t/ha.)	Rendimiento (l/t)	Rendimiento (l/ha.)
Caña de azúcar (tallos cosechados)	80	75	6000
Maíz (grano)	3	380	1140 (3420*)
Yuca (raíz)	20	180	4500
Papa (raíz)	20	130	2600

Cuadro 2.6: Tasa de producción de bioetanol de diferentes materias primas. *Considerado tres cosechas por año.[6]

2.4. Producción de Bioetanol en México

Actualmente las fuentes de energías renovables de mayor aplicación en el país son la biomasa por el uso de la leña y del bagazo de caña. El senado de la republica ratifica la Estrategia Nacional Energía con una visión al 2024, en la que se proponen lograr las metas en los ejes rectores de seguridad energética, eficiencia económica y productiva y sustentabilidad ambiental. En los que se resalta los objetivos de diversificación de la disponibilidad energética, mejorar la eficiencia y la reducción de los impactos ambientales tanto en la producción como en el uso de la energía.

Los biocombustibles líquidos, principalmente biodiesel y bioetanol, son procesados a partir de los cultivos agrícolas y de otras materias primas renovables.

El bioetanol puede además ser producido a partir del material lignoceluloso, y el biodiesel puede ser el resultado de un avanzado proceso de conversión de cualquier existencia de material de la biomasa. Actualmente la mayor parte del biodiesel se obtiene de aceites de *Jatropha curcas*, palma africana, colza y de girasol, mientras que el bioetanol es producido principalmente a base de caña de azúcar y maíz.

Para la conversión a bioetanol en México fueron considerados como insumos: caña de azúcar, maíz, yuca, sorgo y remolacha azucarera, con las tecnología existente y, en el caso de la caña de azúcar, se realizó un analisis para la producción de bioetanol a partir del bagazo, cuya tecnología se encuentra en desarrollo.

En base en criterios de selección como: disponibilidad de tecnología madura, costos, necesidades de inversión, superficie requerida, índice de energía neta y emisiones y mitigación de gases de efecto invernadero se seleccionó a la caña de azúcar como el cultivo más prometedor de inmediato, que puede ser complementada por otros cultivos a mediano y largo plazo.

Actualmente la producción de bioetanol en México para combustibles es marginal. Esto sera posible, dentro de ciertos límites, para tener un programa de bioetanol como combustible exitoso en México sera necesario la disminución del costo de materia prima con el aumento de la escala productiva. El precio del bioetanol combustible tiende a vincularse al precio de gasolina, cuya tendencia futura es creciente, augurando así una expectativa positiva de viabilidad.[18]

Sin embargo México ha iniciado a producir etanol, en el 2010 la primera producción de etanol como biocombustible de acuerdo a la publicación por SENER se inició en Guadalajara, y que a partir de los resultados de la introducción de biocombustibles alternos en la ciudad de Guadalajara, se determinará si éstos se pueden incluir dentro de la oferta nacional. A partir de la experiencia de este programa piloto se determinará la introducción eficiente de los bioenergéticos, con un criterio de sustentabilidad.

Por otro lado como primer e importante paso para resolver este problema de la diversificación energética fue hecha por el Congreso mexicano en abril de 2007 con la Ley de Promoción y

Desarrollo de los Bioenergéticos. Que de manera general establece la diversificación energética y que en su ciclo de producción de los bioenergéticos empleen insumos sustentables desde el campo Mexicano y desarrollo Científico y Tecnológico, garantizando la seguridad y soberanía alimentaria, la reducción de gases de efecto invernadero y contribuir al desarrollo económico social. Además de proporcionará un marco legal para fomentar el uso de los biocombustibles a nivel nacional y la reducción de las importaciones de gasolina y MTBE para el escenario en que todas las gasolinas en México fueran mezclas del 10 % de etanol.[19]

Cabe mencionar que durante la creación de la *ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos* dentro de las facultades específicas que se otorgan por dependencia, destacan las de la SAGARPA, a la que se le obliga a elaborar un programa de producción sustentable de insumos para bioenergéticos y de desarrollo científico y tecnológico. Además de ser la responsable de expedir los permisos para la producción de bioenergéticos a partir del maíz, señalando que se otorgarán solamente cuando existan inventarios excedentes de producción interna para satisfacer el consumo nacional. En México somos deficitarios en la producción de maíz, por lo que, anualmente, importamos una cantidad que varía entre 6 y 8 millones de toneladas, por lo que no se podrá producir bioetanol de maíz en nuestro país ya que es un alimento en la canasta básica.[20]

La Industria de Bioetanol en México

México que es un país exportador neto de energía primaria, fundamentalmente por el volumen de exportaciones petroleras. Sin embargo no sucede lo mismo en energía secundaria, ya que se reporta un saldo negativo por las altas importaciones de gas licuado, gas natural, Coque de petróleo, Coque de carbón, pero fundamentalmente y en mayor volumen por gasolinas y naftas.

En México, desde hace varios años, se produce etanol de caña de azúcar en los diferentes ingenios del país que cuentan con destilerías, sólo que su uso es para bebidas embriagantes e industriales, no para uso combustible. Se produce, principalmente, de melazas de caña de azúcar y con una tecnología tradicional y bastante conocida.

No obstante de contar con capacidad instalada para producir mucho mayor cantidad, los ingenios del país no la utilizan, dado que la demanda es limitada y que el insumo es cíclico. En promedio, la capacidad utilizada es del 44 % respecto a la capacidad instalada; además es necesario una fuerte demanda de bioetanol es relativamente fácil hacer adecuaciones para ampliar esa capacidad, dado a que las destilerías tienen esa capacidad para una mayor producción.

Aproximadamente, la mitad de los ingenios del país cuentan con destilerías, unas más modernas que otras, pero todas pueden producir etanol 96 ° GL.[21] Por ejemplo, el Mercado Nacional de alcohol etílico, alcanzó 286 mlts. en 2009 según informes de Zafranet que es quien informa sobre la producción nacional de caña de azúcar y sus derivados, se estima que este caiga a 279 mlts., 2.5 % menos que en el 2009.

2.5. El Bioetanol como Combustible

Historicamente el primer vehículo que se diseñó fue una variante del Modelo T de Henry Ford, pensado en el uso del bioetanol como combustible obtenido a partir de la maíz.

En los últimos años se han desarrollado una serie de vehículos capaces de funcionar tanto con gasolina como con etanol o una mezcla de ambos. Se denominan FFV por sus siglas en inglés. Estos automóviles FFV están modificados para el funcionamiento en mezcla etanol/gasolina. La utilización del etanol modifica la mezcla de aire y combustible tratando de mantener la potencia y el consumo del automóvil en un valor óptimo.

El etanol, como combustible en su estado puro, es utilizado principalmente en Brasil. La mezcla que se usa más ampliamente es el E85 que está compuesto de un 85 % de etanol y un 15 % de gasolina. Desafortunadamente el etanol contiene menos energía por litro que las gasolinas, con lo que su rendimiento es menor, pudiendo llegar hasta un 30 % menos, principalmente en modelos retrasados, cuando se utiliza el E85, por otro lado el etanol tiene un octanaje mucho mayor que la gasolina. Los motores de actuales pueden funcionar con mezclas de hasta el 25 % de bioetanol anhidrido sin que sean necesarias modificaciones en el motor.

Actualmente conocemos que Brasil es el país que más ha desarrollado máquinas de combustión interna para emplear mezcla de alcohol y gasolina. Además que es el país pionero en la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar.

Otra alternativa para el uso del bioetanol como combustibles es transformarlo para su utilización en aditivo de la gasolina. Con la introducción de las gasolinas sin plomo, necesarias por el uso de catalizadores para la disminución de las emisiones nocivas, se vio afectado el número de octano de la gasolina. Para recuperar el octanaje y reducir las emisiones contaminantes se añadieron aditivos oxigenantes tales como el metanol, bioetanol, TBA o MTBE y el bioetanol es un excelente oxigenante ya que no emite sustancias tóxicas.[22]

Por otro lado, el bioetanol presenta algunas diferencias importantes con relación a los combustibles convencionales derivados de petróleo. La característica principal es el elevado contenido de oxígeno, que constituye cerca del 35 % en masa del bioetanol. Las características del bioetanol posibilitan la combustión más limpia y mejor desempeño de los motores, lo que contribuye a reducir las emisiones contaminantes, aun al mezclarlo con la gasolina. En estos casos, actúa como un verdadero aditivo para el combustible normal, mejorando sus propiedades.

De acuerdo con la norma Mexicana NOM-086-Semarnat-Sener-SCFI-2005, mientras las especificaciones de los combustibles fósiles para protección ambiental, las gasolinas que se consuman en el país deben contener 2.7 % de oxígeno en peso, para lo que Pemex utiliza MTBE y TAME. La anterior especificación, se debe aplicar a toda la gasolina Magna (octanaje mínimo de 87) que se consuma en las tres principales zonas metropolitanas del país, además de toda la gasolina Premium (octanaje mínimo de 92) que se consuma en el territorio mexicano.

La norma 086 obliga a un máximo de contenido de azufre en las gasolinas. Actualmente, la gasolina Magna que se distribuye en las zonas metropolitanas del país, contienen 421 partes por millón (ppm) y según la norma, deberían contener un máximo de 30 ppm. Esta misma obligación se realizó para el resto del país a partir de enero de 2009. Por otro lado la cantidad aproximada que se requiere de MTBE y TAME en México es de 23 mil barriles diarios (2005), pero la producción nacional sólo llegó a 10 mil 800 barriles diarios, y el resto se cubrió vía importaciones. Cabe mencionar que la capacidad de producción nacional de estos compuestos oxigenantes es de 15 mil 600 barriles diarios, pero la capacidad utilizada sólo fue del 70 %, debido a falta de suministro de metanol y butanol.

El bioetanol como combustible es un producto nuevo en México. No obstante que, aproximadamente, la mitad de los ingenios del país tienen destilerías, pero que sólo se produce mayoritari-

amente para bebidas y usos industriales. Por lo tanto, estimar la demanda es una cuestión que está íntimamente relacionada con el volumen de MTBE y TAME susceptible de ser sustituido y, posteriormente, con la cantidad que técnica, económica y socialmente se determine mezclar en la gasolina. De tal forma que, la demanda inicial tiene que ver con decisiones de políticas públicas y, específicamente, con las decisiones que tome el consumidor (mezclador) único del bioetanol: PEMEX.

El bioetanol, por lo tanto, es una demanda derivada que depende esencialmente de la demanda de gasolina y de sus perspectivas de crecimiento, que a la vez están determinada por el crecimiento de la flota vehicular y por las condiciones económicas y comerciales del país.[21]

3.1.1. Características principales del fermentador

El diseño está conformado de un cilindro de acero inoxidable de diámetro 49 cm. y 63 cm. de alto, para una capacidad volumétrica de 100 litros, cuenta con fondo cónico, agitador tipo ancla, enchaquetado de 5 cm., soporte para motor y soporte de fermentador. En el presente diseño la entrada del medio es del tipo elíptica, salida principal de solución tiene un diámetro de 1 pulg. Las entradas de solución ácida y base, así como también la salida y entrada del fluido en el enchaquetado tienen un diámetro de $\frac{1}{2}$ pulg. Los medidores de temperatura, dióxido de carbono, oxígeno disuelto y pH, tienen un diámetro de $\frac{1}{4}$ de pulg.

Descripción de los componentes del reactor de fermentación.

- Motor-Reductor: Es uno de los principales componentes del sistema de agitación con una potencia de 0.5 hp, funciona a 220 volts, con una velocidad variable de 50 -100 rpm.(Apéndice A.2)
- Eje: Una barra sólida de forma cilíndrica de 2 pulg. de diámetro con una longitud de 0.88 m. verticalmente soporta a las aspas y esta acoplado al motor-reductor.
- Agitador (aspas): Es el principal componente del sistema de agitación, de tipo ancla, son flexibles es decir pueden ser colocadas a diferentes alturas e inclinación, dependiendo de la cantidad volumétrica que sea utilizada en el proceso de fermentación, su principal función es mezclar y mantener homogéneo el medio.
- Enchaquetado: Con una separación de 5 cm. entre ambas paredes, ayuda a mantener la temperatura estable y uniforme de dentro del tanque principal que contiene la solución, haciendo circular agua a la temperatura ideal para el desarrollo de la levadura.
- Medidor de temperatura: Ayuda para el monitoreo de la temperatura durante el proceso, en caso de una elevada o baja temperatura.
- Medidor de pH: Sirve para obtener datos del medio, es decir si se encuentra en los parámetros ideales para el proceso de fermentación.
- Medidor de oxígeno disuelto: El Oxígeno Disuelto nos ayuda para control de la cantidad de oxígeno que está disuelto en el medio para el control del crecimiento de la levadura y que en otros caso es esencial para los riachuelos y lagos saludables. El nivel de oxígeno disuelto puede ser un indicador de cuánto contaminada está el agua y cuánto bien puede dar soporte esta agua a la vida vegetal y animal.
- Salida de CO₂: Sirve para evitar exceso de CO₂ en la solución.
- Entrada de la solución: Por donde se lleva a cabo el llenado del medio, de característica elíptica con diámetro de 9.1 cm. y 8 cm. respectivamente.
- Válvula de Salida de la solución: Por este se realiza el vaciado del medio después del proceso de fermentación.
- Entrada de solución ácida o básica: En el caso de que la solución no este entre el rango ideal para la levadura añadimos solución ácida o básica según sea el caso y por medio de estas válvulas se lleva a cabo la entrada de la solución.

- Válvulas de entrada y salida de agua en el enchaquetado: Es donde el fluido pasa a través del enchaquetado y por medio del mecanismo de transferencia de calor mantiene la temperatura necesaria.
- Tanque: Es el contenedor de forma cilíndrica de la solución de jugo de caña donde se lleva a cabo el proceso de fermentación.
- Medidor de nivel: nos muestra el volumen en litros existente dentro del reactor.
- Soporte para el motor: Ayuda a fijar el motor y acoplarlo al eje.
- Soporte del reactor: Con tres barras sólidas resistentes, soporta el peso del reactor, y permite fijarlo para evitar movimientos no deseados.

Para la construcción del reactor de fermentador se utiliza lámina de acero inoxidable calibre 16. Las características principales son:

Durabilidad: Largo ciclo de vida.

Higiene y Limpieza: Facilidad de limpieza y conservación, permitiendo total higiene y la garantía de la calidad. Al ser un material versátil.

Resistencia: Alta resistencia a la corrosión, alta resistencia a las altas temperaturas. Mantiene sus propiedades, incluso cuando se somete a altas y bajas temperaturas.

El reactor de fermentación es tal que las operaciones laborales durante el funcionamiento, recolección, limpieza y mantenimiento sean mínimas. El reactor es de características versátiles para la aplicación de diversas modalidades de sustratos.

caso de un proceso en el cual sea necesaria cierta cantidad de presión, para el caso del cilindro se calcula a $2 \frac{Kg}{cm^2}$ como se muestra en la siguiente ecuación.[23]

$$p = \frac{S E t}{R 0,6 t} \quad (3.2.1)$$

donde:

p = presión de diseño

S = 12, 900 (Valor del esfuerzo del material), $\frac{lb}{pulg^2}$

E = 0.60 (eficiencia de la junta), soldadura.

D = 16.53 (diámetro interior), pulg.

t = 0.06 (espesor de la pared), pulg.

Entonces la presión de diseño es:

$$p = \frac{12900 \times 0,6 \times 0,06}{16,53 \times 0,6 \times 0,06} = 28,03 \frac{lb}{pulg^2} \quad (PSI). \quad (3.2.2)$$

Por otro para la construcción del reactor de destilación se empleo lamina T-304 calibre 16 pulg., bridas T-304 con esperos de $\frac{3}{8}$ de pulg., tubo T-316 de 2 pulg. cedula 40, tubo de $\frac{1}{2}$ pulg. y tubin de $\frac{1}{8}$ todo en acero inoxidable.[24]

Los principales componentes del reator de destilación son:

- Tapa del reactor: esta pieza es del tipo gorro chino, para la salida del vapor esta sujeto un tubo de 2 pulg. de cedula 40, con un angulo de 45° acoplado al condensador. [Apéndice A.4]
- Bridas: tanto la tapa como el reactor cuentan con dos bridas para el sellado del reactor y mantener la presión, el esperos para ambas son de $\frac{3}{8}$ de pulg. estas mismas van sujetas mediante 9 tornillo de acero al carbon de 1.5 pulg. de longitud, $\frac{9}{16}$ standar.
- Valvulas: cuenta con dos valvulas de 1 pulgada para el llenado y vaciado del reactor respectivamente.
- Tanque: este cilindro cuenta con un volumen para 50 litros de mosto para destilar.
- Area de calentamiento: el cual se encuentra por debajo del reactor que este último esta sujeto por tres barras solidas de $\frac{1}{2}$ pulg. de 35 cm. de longitud y que asu vez estan soldados a la base del reactor mediante una brida de $\frac{3}{8}$ de pulg. de espesor.
- Condensador: por el cual se lleva acabo la obtención del bioetanol en su forma líquida, tiene una longitud de 45 cm., diametro de 4 pulg., cuenta con un serpentín el cual es tubin de $\frac{1}{8}$ pulg. con diametro circular de 3 pulg., longitud de 40 cm. y de 1 cm. de separación entre vuelta.[Apéndice A.5, A.6]

Las características generales del reactor son: bajo mantenimiento, facil de operar y ensamblar, resistente a la temperatura y corrosión. Por otro lado se tiene acoplado un termómetro y manómetro del tipo reloj para el manejo de los parámetros y rangos de temperatura deseados.

3.3. Metodología Experimental para la Producción de Bioetanol

3.3.1. Preparación de inóculos

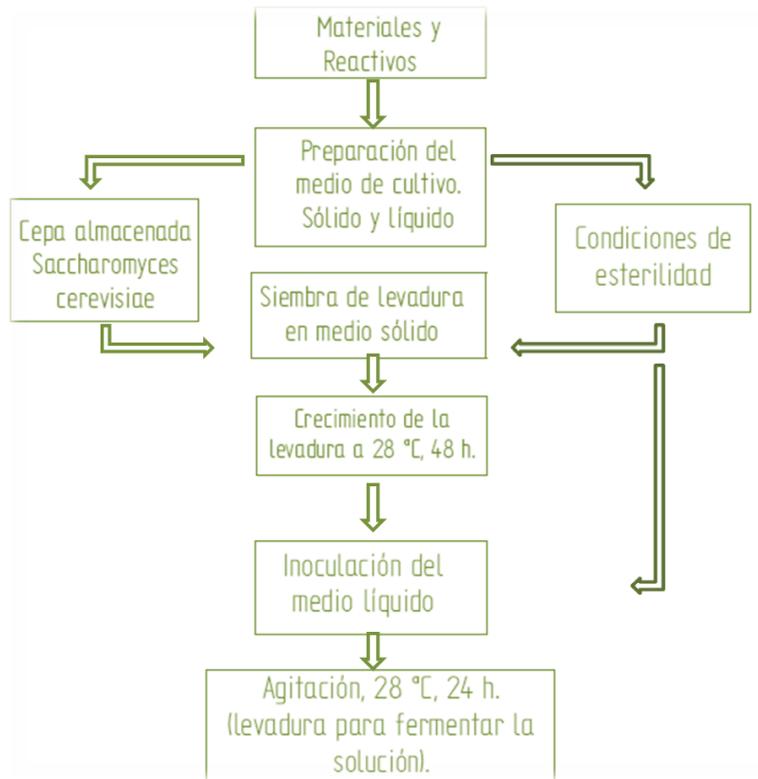


Figura 3.3: Esquema de preparación de inóculos.[4]

Fundamento: Para realizar la fermentación de sustrato de es necesario asegurar que la levadura *Saccharomyces c.* esté fresca, viva y la cantidad suficiente, por ello lleva acabo la prepaación del medio de cultivo: medio de sólido y medio líquido.

Objetivo: Obtener medio de cultivo para el crecimiento de levadura con las condiciones óptimas para su desarrollo.

Definiciones.

Sustrato: Jugo de caña de azúcar

Inóculo: Pequeña cantidad de un producto que contiene bacterias y que se toma, por ejemplo, para hacer un cultivo, una resiembra o infectar determinados animales de experimentación.

Agar: Es una mezcla de polisacáridos extraídos de un alga marina.

Peptona: producto soluble en agua que se obtiene por hidrólisis particularmente de una proteína o varias proteínas.

Medio de cultivo: Contiene nutrientes necesarios para llevara acabo la multiplicación de microorganismos, óptimo para favorecer el proceso deseado.

Medio sólido: Es todo aquel que contiene un agente gelificante. La dureza del medio depende

principalmente de dos factores: pH y composición química del medio.

Medio Líquido: Es toda aquella solución que no contiene reactivos solidificantes como el agar.

Símbolos y abreviaturas:

g	Gramos
°C	Grados Celsius
l	Litros
ml	Mililitros
Psi	Libras sobre pulgada cuadrada
h	Horas
min	Minutos

Cuadro 3.1: Símbolos y abreviaturas (preparación del inóculo)

Materiales:

Tubo de ensayo	HACH
Pipeta	PYREX
Matraz	PYREX
Vaso de precipitado	PYREX
Caja petri	PYREX
Espátula	CUNSA
Asa	–
Papel aluminio	–
Algodón	–
Papel estraza	–
Franela	–

Cuadro 3.2: Materiales (preparación del inóculo)

Reactivos:

Agar, polvo	BD Bioxon
Dextrosa Anhidra ACS	Fermont
Extracto de levadura	BD Bioxon
Peptona de caseína	BD Bioxon

Cuadro 3.3: Reactivos (preparación del inóculo)

Equipos e instrumentos:

Solución: Agua destilada, agar, dextrosa, peptona y extracto de levadura para preparar el medio de cultivo.

Preparación:

Disolver en 1 l de agua destilada los siguientes reactivos, con 20 g de peptona, 20 g de dextrosa

Parrilla (agitación y temperatura)	Thermo SCIENTIFIC
Campana de flujo laminar	Veco
Balanza analítica	OHAUS
Autoclave	CIE
Incubadora	Scorpion Scientific

Cuadro 3.4: Equipos (preparación del inóculo)

y 10 g de extracto de levadura (medio líquido). Lo anterior se realiza con agitación frecuente, temperatura aproximada de 30 °C, hasta su completas disolución. De la misma manera disolver en 120 ml de agua destilada, 2.56 g de agar, 2.56 g de dextrosa, 2.56 g de peptona y 128 g de extracto de levadura (medio sólido).

Condiciones de almacenamiento: la solución se introduce en la campana de flujo laminar por 24 h.

Procedimiento:

1. Utilizando alcohol etílico a 90 °, limpiar la mesa de trabajo antes de iniciar la práctica.
2. Para la preparación del medio sólido se utilizó un matraz de 200 ml al cual se agregó 120 ml de agua destilada, posteriormente se 2.56 g de peptona, 2.56 g de dextrosa, 2.56 g de agar y 1.28 g de extracto de levadura.
3. para preparar el medio líquido se utilizó un vaso de precipitado de 1 l al que se le agregó 1 l de agua destilada, posteriormente se adiciono 20 g de peptona, 20 g de dextrosa y 10 g de extracto de levadura.[25]
4. Con el autoclave se esteriliza el material y la soluciones a utilizar a 110 °C por 15 Psi, durante 20 min.
5. El medio sólido se colocó en cajas petri y en tubos inclinados dentro de la campana de flujo laminar, el cual se dejó reposar a 28 °C, durante 24 h.
6. De la misma manera dejar el medio líquido.[26]

Expresión de resultados: en esta etapa el resultado fue la obtención del medio de cultivo para la preparación del inóculo.

3.3.2. Siembra de levadura *Saccharomyces c.* en el medio de cultivo sólido

Fundamento: En esta práctica el contenido de nutrientes en el medio de cultivo es de suma importancia así como mantener una temperatura de 28°C en condiciones de esterilidad, estas son ideales para el crecimiento de la levadura *Saccharomyces c.*.

Objetivo: Sembrar y multiplicar el número de levaduras.

Definiciones.

Medio YPD: solución que contiene reactivos como; agar, peptona, dextrosa, extracto de levadura para la reproducir adecuada de las levaduras.

Símbolos y abreviaturas:

°C	Grados Celsius
h	Horas
ml	Militros

Cuadro 3.5: Símbolos y abreviaturas (siembra de levadura)

Materiales:

Tubo de ensayo	HACH
Caja petri	PYREX
Asa	–

Cuadro 3.6: Materiales (siembra de levadura)

Equipos e instrumentos:

Campana de flujo laminar	–
Incubadora	–

Cuadro 3.7: Equipos (siembra de levadura)

Solución: *solución YPD* para la siembra de levadura *Saccharomyces cerevisiae*. **Condiciones de almacenamiento:**

La solución se introduce en la incubadora a 28 °C durante 24 h.

Procedimiento:

1. Para evitar que el medio de cultivo se contamine se recomienda utilizar la campana de flujo laminar o un lugar que garantice la esterilidad.
2. Empleando una asa previamente esterilizada, se toma una muestra de la cepa con número Y2034 que contiene la levadura *Saccharomyces cerevisiae* .
3. Se inócula cada caja petri que contiene medio sólido con la levadura *Saccharomyces c.* que anteriormente fue realizada.

- La caja petri inóculada se introduce a la incubadora a una temperatura de 28 °C, durante 24 h para su crecimiento.

Expresión de resultados: el resultado fue el crecimiento de la levadura en el medio de cultivo previamente elaborado.

3.3.3. Activación de levadura *Saccharomyces c.* para en el sustrato

Fundamento: Para la activación de la levadura es necesario asegurar la adaptación de la cepa en el jugo de caña.

Objetivo: Activar la levadura para inocular el sustrato (jugo de caña de azúcar).

Definición.

Cepa: Conjunto de bacterias u hongos que tienen el mismo patrimonio genético.

Símbolos y abreviaturas:

g	Gramos
°C	Grados Celsius
l	Litros
ml	Mililitros
h	Horas
min	Minutos

Cuadro 3.8: Símbolos y abreviaturas (activación del sustrato)

Equipos e instrumentos:

Parrilla (agitación y temperatura)	Thermo SCIENTIFIC
Agitador magnético	Hanna instrument
Peachimetro	OAKTON

Cuadro 3.9: Equipos (activación del sustrato)

Solución:

Medio YPD líquido.

Con el medio YPD líquido previamente preparado con en la etapa anterior se procede a la inoculación.

Procedimiento:

- una vez crecida la levadura *Saccharomyces c.* en el medio sólido, procedemos a realizar la recolección de la cepa fresca de la caja petri con ayuda de un asa esteril e inocular el medio líquido.

2. Con ayuda de una parrilla con temperatura y agitador magnético se mantiene en condiciones estériles a 28 °C por 24 h.
3. Tomar datos correspondientes para asegurar la multiplicación de la levadura y vaciar la solución en el reactor de fermentación, con el sustrato previamente añadido.

Expresión de resultados: el resultado fue la activación de la levadura *Saccharomyces c.* en el medio de cultivo líquido para llevar a cabo el proceso de fermentación. Finalizado el proceso de crecimiento de la levadura en el medio líquido, se realizó el conteo de levaduras el cual fue de 1.44 millones de levaduras/ml.

Observaciones: para el caso de la siembra y activación de la levadura en un medio estéril fueron empleados los equipos tales como una cámara de guantes con una atmósfera de nitrógeno, un horno manteniendo a temperatura de 28 °C.

3.4. Fermentación

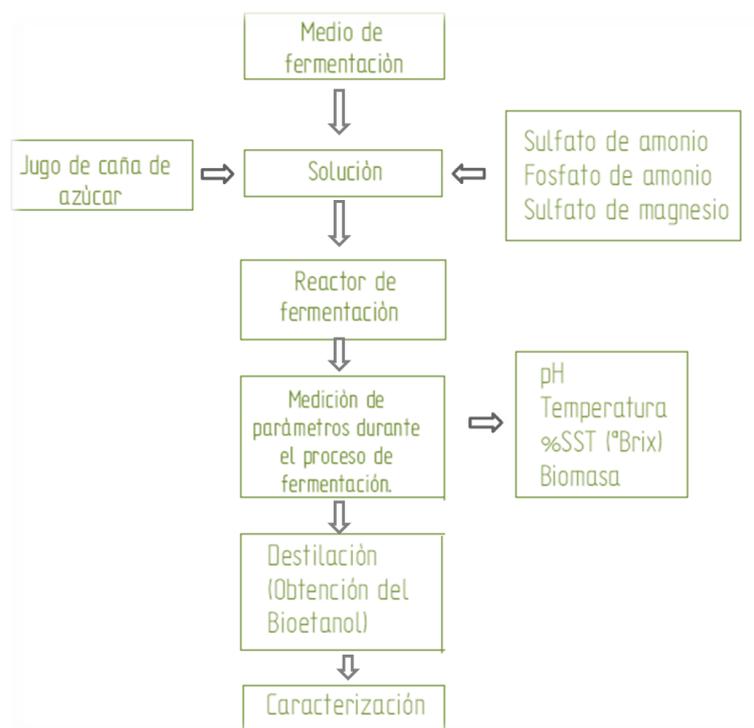


Figura 3.4: Esquema de preparación del medio de fermentación.[4]

Parámetros importantes en el proceso de producción de bioetanol.

Temperatura

La temperatura es uno de los parámetros esenciales para en el proceso de una fermentación. La temperatura ideal de la levadura es entre 28 y 32 °C, bajo este rango de temperatura la levadura presenta un mayor crecimiento, aun que se puede presentar el caso en que la temperatura varia de ± 2 °C de el rango óptimo, por lo tanto la levadura tiende a retardar su crecimiento y reducir la producción celular, es decir su productividad. A fin de obtener rendimientos óptimos, las fermentaciones deben ser llevadas a cabo en un margen estrecho de temperatura y a ser posible constante.

pH

La mayor parte de las levaduras se desarrojan optimamente entre pH 4.5 y 5. Pero durante el crecimiento en un reactor de fermentación, los metabolitos celulares son liberados al medio, lo que puede originar un cambio del pH del medio de cultivo. Por lo tanto se debe controlar el pH del medio de cultivo y añadir ácido o una base cuando éste no se encuentre en el rango de crecimiento óptimo y mantener constante el pH. Por supuesto que esta adición del ácido o base debe ser mezclarse rápidamente de tal manera que el pH del medio de cultivo sea homogéneo en todo el reactor. [27],[28]

% SST

Son sólidos solubles totales (SST) y la unidad de medida son los °Brix. Es uno de los parámetros en el cual se conoce la concentración de azúcar en la solución, al iniciar el proceso de fermentación se debe realizar una medición para serciorsarse que se cuenta con una cantidad suficiente de azucares para la producción del bioetanol, para el caso del jugo de caña de azúcar generalmente se encuentra en un rango de 14 a 22 %.

Proceso de fermentación

Fundamento: Para la realización de esta práctica es necesario asegurar que exista un ambiente aeróbico en el reactor de fermentación para que se lleve a cabo el proceso de metabolización de los azúcares.

Objetivo: Mantener los parametros de medición en los valores óptimos para llevar a cabo la metabolización de los azúcares contenido en el jugo de caña azúcar por acción de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* durante todo el proceso.

Definiciones.

Fermentación: es la descomposición de sustancias orgánicas, es por tanto el efecto del crecimiento de levaduras sobre la materia organica resultando en el medio de cultivo empleado, el bioetanol(para el caso de jugo de caña de azúcar).[29]

Mosto : fermentado de jugo de caña azúcar.

Símbolos y abreviaturas:

Reactivos:

Materiales:

°C	Grados Celsius
l	Litros
ml	Mililitros
h	Horas
min	Minutos

Cuadro 3.10: Símbolos y abreviaturas (fermentación)

Fosfato de amonio Monob. ACS	Fermont
Sulfato de amonio ACS	Fermont
Hidroxido de sodio	Fermont
Hidroxido de Potasio	Fermont
Ácido sulfúrico	Fermont

Cuadro 3.11: Reactivos (fermentación)

Equipos e instrumentos:

Solución: *Jugo de caña de azúcar* solución para realizar la fermentación en el reactor.

Procedimiento:

1. Vaciar el de jugo de caña de azúcar y mantener en agitación durante el proceso.
2. Agregar los reactivos 100 g de sulfato de amonio, 200 g de fosfato de amonio y Ácido sulfúrico para ajustar el pH. Asegurarse que las condiciones de pH y temperatura (4.5-5 y 30-35 °C) se encuentre en los rangos óptimos para el crecimiento de la levadura.
3. Tomar lectura de datos a cada 3 h (°Brix, pH , Temperatura y Biomasa) durante el proceso de aproximadamente 48 h.

Observaciones: Cuando el pH de la solución no se encuentra en las condiciones óptimas para el crecimiento de la levadura *Saccharomyces c.* (4.5 - 5), agregamos un ácido o base según sea el caso.

Por otro lado según la consentación de azúcares al inicio del proceso será el tiempo de que tarde el proceso que generalmente es de 36 horas, la lectura de datos nos proporcionará información para detener el proceso.

Expresión de resultados: el resultado fue la obtención de mosto, mezcla agua-bioetanol.

3.4.1. Técnica de conteo de levaduras

Para conocer el comportamiento de las levaduras se realiza un conteo de las mismas al inicio del proceso de fermentación y así tener un control e información de los parámetros cinéticos de las levaduras.

La técnica de conteo directo de levaduras es un proceso sencillo pero requiere de una determinada paciencia para no equivocarse y conseguir un buen resultado. Para el recuento de levaduras existe la CÁMARA THOMA Y NEUBAUER IMPROVED generalmente empleadas para el recuento, ambas con características propias pero para el mismo fin.

Pipeta	PYREX
Matraz	PYREX
Vaso de precipitado	PYREX
Probeta	PYREX
Espátula	CUNSA
Franela	–
Agua destilada	–

Cuadro 3.12: Materiales (fermentación)

Reactor de fermentación	–
Termómetro	Metron
Peachimetro	Thermo SCIENTIFIC
Refractómetro	SPER SCIENTIFIC
Camara de Neubauer	HAUSSER SCIENTIFIC
Microscopio	–
Micropipeta	DISCOVERY Comfort

Cuadro 3.13: Equipos (fermentación)



Figura 3.5: Cámara para el conteo de levaduras

En este caso se emplea la Cámara Neubauer improved sus datos básicos son :

- Cuadro grande central (formado por 400 cuadros pequeños): $1\text{mm}^2/400$ cuadros.
- Cuadro mediano (formado por 16 cuadros pequeños): $0.2\text{ mm} \times 0.2\text{ mm}$.
- Cuadro pequeño: $0.05\text{ mm} \times 0.05\text{ mm} = 0.0025\text{ mm}^2$.
- Líneas separadoras: 0.025 mm .

En la figura 3.5 se puede observar la cámara para conteo celular, para ambas cámaras la apariencia es similar, la diferencia reside en los cuadros laterales marcados con una \bar{L} como se ve en la figura 3.6.

Éstos sirven para recuento de otros microorganismos celulares. Para el caso del tiraje, no existe diferencia alguna porque se utiliza el cuadro central.

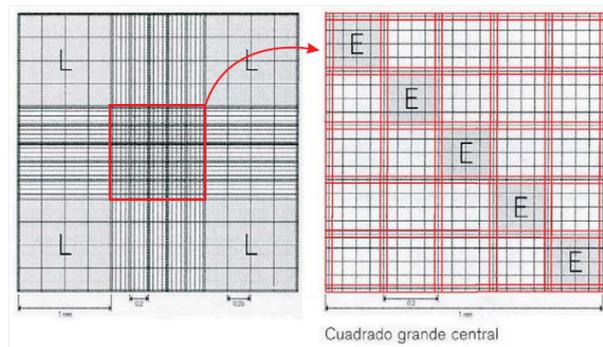


Figura 3.6: Estructura de cuadros de la cámara Neubauer

En los siguientes puntos se describe como utilizar la cámara para el conteo.

Preparación de la muestra:

1. Lavar la cámara y el cubre objeto con agua destilada y alcohol 96 %.
2. Secar bien con papel suave.
3. Poner el cubreobjetos encima de la cámara
4. Homogeneizar removiendo bien el cultivo en donde residen las levaduras
5. Tomar con pipeta una muestra
6. Poner la punta de la pipeta en una de las dos ranuras de la cámara y, por capilaridad, las levaduras se distribuirán en la cámara
7. Si se crea una cámara de aire repetir la operación desde el principio.
8. Fijar la cámara de recuento en la platina del microscopio para realizar la observación microscópica
9. Esperar unos minutos antes de contar para que las levaduras se depositen en la cámara

Preparativos del microscopio: El conteo se realizó con la ayuda de un microscopio electrónico. Se aconseja trabajar a 400 aumentos.[30]

Contabilizar levaduras totales (recuento): Se aconseja siempre hacer la media de levaduras contenidas en varios grupos de cuadros. Para ambos modelos de cámaras empleadas, el procedimiento es el mismo. En la figura 3.7 se presenta un ejemplo para contabilizar las levaduras contenidas en los grupos de 25 y 16 cuadros cámara Thoma y Neubauer respectivamente.

En el conteo de levaduras con la cámara Neubauer que son grupos de 16 cuadros y se obtuvo los siguientes datos:

- grupo 1 (G1) de 16 cuadros 28 levaduras
- grupo 2 (G2) de 16 cuadros 30 levaduras

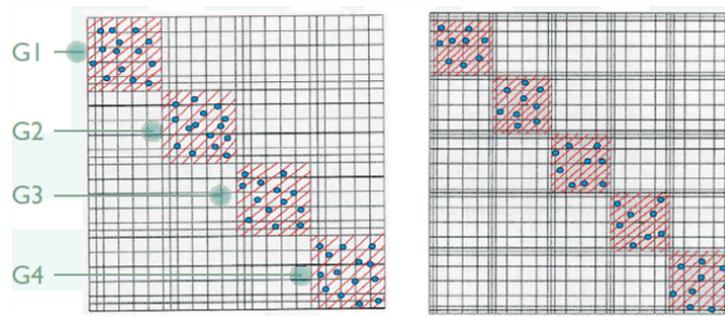


Figura 3.7: Recuento por grupos en cámara Thoma y Neubauer, ejemplo.
[30]

grupo 3 (G3) de 16 cuadros 27 levaduras
 grupo 4 (G4) de 16 cuadros 29 levaduras
 grupo 5 (G5) de 16 cuadros 31 levaduras

Por lo tanto obtenemos la media y empleando la ecuación siguiente obtenemos las levaduras totales.

Media $28 + 30 + 27 + 29 + 31 / 5 = 29$ levaduras en 16 cuadros.

$$\frac{X \text{ levaduras}}{Y \text{ cuadros}} \times \frac{\# \text{ cuadros camara}}{\text{volumen camara}} \times \frac{1000 \text{ mm}^3}{1 \text{ cm}^3(\text{o } 1 \text{ ml})} = X \text{ millones de levaduras/ml.} \quad (3.4.1)$$

[30]

Volumen útil de la cámara Neubauer = $0,2 \text{ mm} \times 0,2 \text{ mm} \times 0,1 \text{ mm} \times 25 = 0,1 \text{ mm}^3$
 Cualquiera de las dos cámaras se utiliza la misma fórmula.

Si se encontraron 29 levaduras en 16 cuadros los cálculos serían como prosiguen:

$$\frac{29 \text{ levaduras}}{16 \text{ cuadros}} \times \frac{400 \text{ cuadros}}{0,1 \text{ mm}^3} \times \frac{1000 \text{ mm}^3}{1 \text{ cm}^3(\text{o } 1 \text{ ml})} = 7,25 \text{ millones de levaduras/ml.} \quad (3.4.2)$$

Para las siguientes muestras en la proximas horas del proceso de fermentación se obtendra una muestra con mayor población de levaduras por lo tanto se realiza el conteo viables de estas.

procedimiento:

Contabilizar levaduras viables (% de levaduras viables)

1. Mezclar una gota pequeña de colorante con una gota pequeña de mosto en fermentación en el porta objetos normal.
2. Se tapa con un cubre objeto
3. Se visualiza en un microscopio
4. Las levaduras teñidas están muertas y los no teñidas están vivas.

5. Se cuentan todas las levaduras contenidas en cada campo y se hace una lista de vivas y muertas y a partir de aquí se calcula el porcentaje de viables.
6. Para el calculo del % de viables se cuentan las vivas respecto el total.[30]

$$\frac{\# \text{ vivas}}{\text{Total}} = \# \longrightarrow X \% \text{ viables}$$

Observación.

El colorante puede ser azul de metileno o bien utilizar rodamina. Ésta tiene un color rosado suave por lo que hace más simple el recuento. Ambos colorantes pintan las levaduras muertas.

Comportamiento la levadura durante la fementación.

Para conocer el comportamiento que tiene la levadura durante el proceso de fermentación se conocen etapas de desarrollo o curva de crecimiento. Curva de crecimiento que consta de cuatro etapas.

1. Fase lag o de adaptación: en esta etapa los microorganismos adaptan su metabolismo a las nuevas condiciones ambientales (de abundancia de nutrientes) para poder iniciar el crecimiento.
2. Fase exponencial o logarítmica: en ella la velocidad de crecimiento es máxima y el tiempo de generación es mínimo. Durante esta fase los microorganismos consumen los nutrientes del medio a velocidad máima.
3. Fase estacionaria: en ella no se incrementa el número de microorganismos (ni la masa u otros parámetros del cultivo), mantenido una misma población. La fase estacionaria tiene gran importancia porque probablemente represente con mayor fidelidad el estado metabólico real de los microorganismos en muchos ambientes naturales.
4. Fase de muerte: principalmente se genera una reducción del número de microorganismos viables del cultivo.

Curva de crecimiento de la levadura en sus diferentes fases

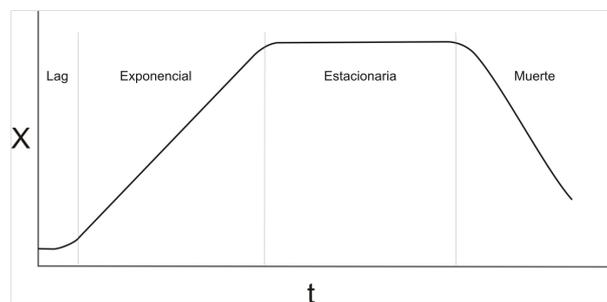


Figura 3.8: Curva de crecimiento.[4]

Donde: X es la población de levaduras y t es el tiempo.

Nota: Los resultados obtenidos durante el proceso de producción del bioetanol así como el crecimiento de la levadura se presenta en el siguiente capítulo.

3.5. Destilación

Obtención del Bioetanol

Fundamento: Para la realización de esta etapa es necesario mantener la temperatura a la cual se evapora el bioetanol (78.1 °C).

Objetivo: Obtener bioetanol a partir del proceso de destilación simple.

Definición.

Destilación: Proceso por el cual un líquido se calienta hasta que sus componentes más volátiles pasan a la fase de vapor, luego se condensan para recuperar dichos componentes.

Símbolos y abreviaturas:

°C	Grados Celsius
l	Litros
ml	Mililitros
h	Horas
min	Minutos

Cuadro 3.14: Símbolos y abreviaturas (destilación)

Materiales:

Matraz	PYREX
Vaso de precipitado	PYREX

Cuadro 3.15: Materiales (destilación)

Equipos e instrumentos:

Reactor de destilación	–
Termómetro	Metron
Bomba P/circulación de agua	LITTLE GIANT

Cuadro 3.16: Equipos (fermentación)

Solución:

Jugo de caña de azúcar fermentado (mosto).

Expresión de resultados: El resultado fue la obtención de Bioetanol.

Observaciones: es importante mantener el rango de temperatura a 78 - 80 °C durante 2 h aproximadamente, posteriormente elevar la temperatura en un rango de 80 - 85 °C durante 2.5 h y por último mantener la temperatura a 90 °C durante 1.5 h. Para los tres rangos de temperaturas generalmente realizamos el cambio de rango cuando hay ausencia de flujo en la salida del condensador, por lo tanto en este sentido detenemos el proceso.

Resultados

4.1. Resultados y Discusiones

En esta primera etapa se obtuvieron resultados de la construcción del reactor de fermentación y destiación, como se pueden observar en las siguientes figuras.



Figura 4.1: Reactor de Fermentación.

Ambos reactores están diseñados para que funcione asépticamente durante numerosos días, así como para las operaciones de más larga duración.

El reactor de fermentación proporciona un sistema adecuado de agitación homogéneo para cubrir las necesidades metabólicas de los microorganismos. Cuenta con valvulas para el monitoreo del pH, valvulas para la toma de muestras así y cuenta con un sistema para mantener la temperatura deseada.

En el reactor de fermentación construido es posible establecer un proceso fermentativo en el que se puede obtener las distintas fases de crecimiento de la levadura *Saccharomyces c.* este



Figura 4.2: Reactor de Destilación.

puede considerarse como el crecimiento de poblaciones de muchos millones de células. Como es conocido la levadura *Saccharomyces c.* consume glucosa y fructuosa (sacarosa) dos hexosas fáciles de asimilar y realizar la conversión a bioetanol.

Como siguiente etapa se desarrollo el reactor de destilación , cuenta con valvulas para el llenado y vaciado del medio, termometro para el monitoreo de la temperatura, asi como tambien un condensador acoplado a la salida del vapor para la recuperación del producto final. por lo tanto se realizó la actividad de destilción una ves que finalizón el proceso de fermentación del medio para ello se hizo circular el medio con la ayuda de una bomba.

Posteriormente empleamos calentaiento al espacio físico que contiene el medio hasta llegar a la temperatura de vaporización del bioetanol, bajo este sistema se obtuvo el bioetanol en tres diferentes rangos de teperatura:

El primer rango fue de 78.17 a 80 °C. en el cual se obtubo 2.5 litros de destilado en un tiempo de 2 horas.

Para el segundo rango fue entre 80 y 85 °C en este caso se obtuvo mayor producto con 5.6 litros en un tiempo de 2.5 horas y

el último rango que fue de 90 °C en un espacio de 1.5 horas se obtuvieron 2.9 litros.

Para los tres casos se determino cancelar ó incrementar los rangos de temperatura, unas ves que en la salida del consensador el flujo era nulo o casi nulo.

Durante el proceso de fermentación se realizaron mediciones a cada 3 horas en un lapso de 36 horas tiempo aproximado de la fermentación y que tarda la levadura en lograr su máximo crecimiento y así poder conocer la variación de los parámetros con respecto al tiempo, los resultados se muestran en la siguiente cuadro.

Como se ilustra en el cuadro 4.1 , el resultado obtenido sobre la reducción de azúcares, fue una diferencia de 12 °Brix llegando a obtener una baja concentración en aproximadamente 35 horas. Como se ilustra en el cuadro 4.1 la fementación se inicio con 18 °Brix y se redujo hasta 6 °Brix. Para el caso de el pH se mantubo en un valor de 4, un rago aceptable de para la levaduras teniendo como resultado el crecimiento de las mismas y metabolixandolos azúcares.

Tiempo (Horas)	Temperatura (°C)	pH	SST (°Brix)	Biomasa
00.00 (12:00 pm.)	30	4.17	18.1	29
01.45 (01:45 pm.)	31	3.99	17.8	0.0
04.45 (04:45 pm.)	33	3.92	15.0	0.0
07.45 (07:45 pm.)	33	3.83	14.6	0.0
10.45 (10:45 pm.)	33	3.69	13.3	0.0
13.45 (01:45 am.)	33	3.70	12.7	0.0
16.45 (04:45 am.)	32	3.74	11.9	0.0
19.45 (07:45 am.)	31	3.70	10.9	0.0
22.45 (10:45 am.)	32	3.75	9.9	0.0
25.45 (01:45 pm.)	32	3.74	8.9	0.0
28.45 (04:45 pm.)	33	3.73	8.0	0.0
31.45 (07:45 pm.)	33	3.68	7.6	0.0
34.45 (10:45 pm.)	32	3.79	6.1	0.0

Cuadro 4.1: Concentración de datos experimentales

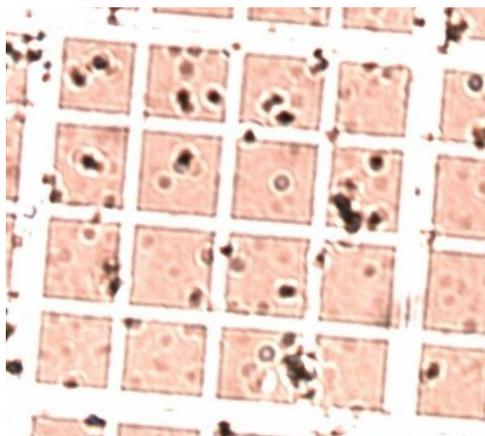
Así mismo se estabilizó la temperatura a 32 °C aproximadamente un parámetro importante e ideal para la reproducción de la levadura *Saccharomyces c.* y la conversión de bioetanol.

Por otro lado, para conocer el número de levaduras iniciales se realizó el conteo mediante la técnica de conteo directo de células utilizando una cámara de Neubauer y un microscopio, permitió conocer la cantidad de levaduras contenidas en la solución.

Observación.

Para la concentración de la biomasa solo se obtuvieron datos iniciales debido a que no se contaban con equipos para realizar la actividad de manera viable ya que es necesario mantener en todo momento la esterilidad de la muestra. Por lo cual solo se realizó el conteo inicial el cual fue de 7.25 millones de levaduras/ml.

En la figura 4.3 se puede observar que las levaduras iniciales en los difernetes cuadros de la cámara de Neubauer son escasas. Esto se llevó a cabo con la ayuda de un microscopio electrónico que cuenta con la característica de obtener la imagen.

Figura 4.3: Levadura *Saccharomyces c.* iniciales.

Así mismo se analizó una muestra más para observar la población de las levaduras después de las 13:45 horas de haber iniciado el proceso de fermentación en la figura 4.4 se puede diferenciar claramente la densidad de población de levaduras respecto a las iniciales.

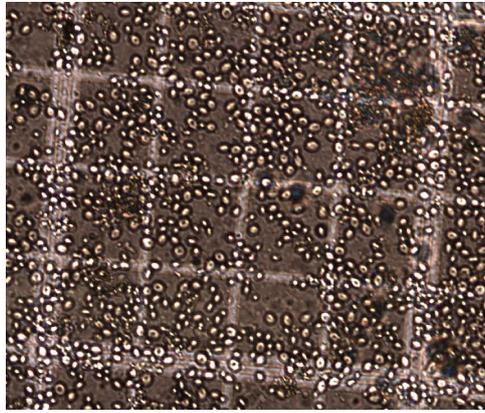


Figura 4.4: Población de levaduras *Saccharomyces c.*

Esta técnica además permite conocer cuándo la concentración de las levaduras empieza a decaer por lo tanto dejan de reproducirse y de esta manera saber cuándo detener el proceso de fermentación, en caso de que el objetivo sea la reproducción de biomasa saber el momento ideal para aprovechar las levaduras antes de que lleguen a la fase de muerte. Por lo tanto de esta manera poder reducir los gastos energéticos que se generan en el proceso como son: el sistema de agitación, el sistema de control de temperatura y así minimizar el consumo energético.

Comportamiento experimental de los parámetros de mediciones

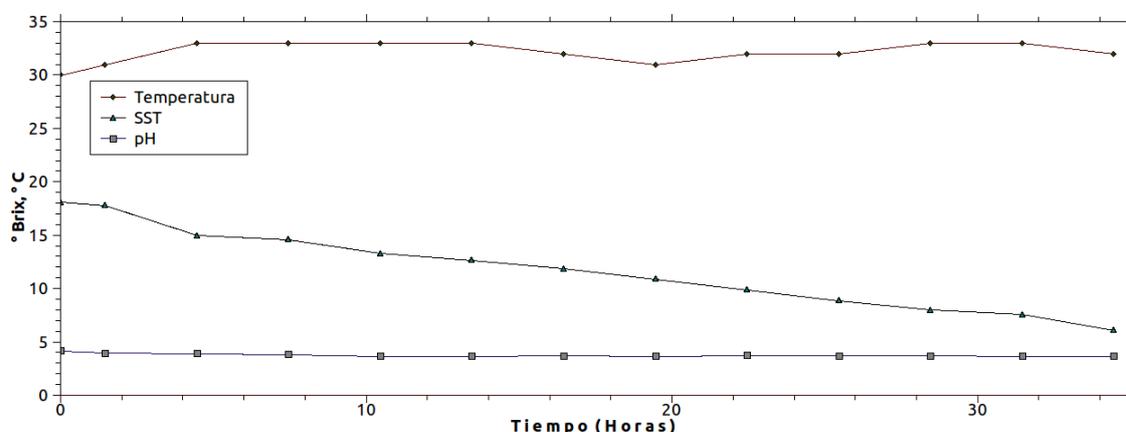


Figura 4.5: Comportamiento experimental de parámetros obtenidos en la fermentación, tales como: temperatura, pH, % SST.

Para conocer tanto la energía obtenida como la consumida en el sistema de producción se realizó una análisis de energía en el proceso de obtención del bioetanol, la energía consumida por equipos empleados se describe en el siguiente cuadro:

Cargas	Tiempo de uso (horas)	Consumo de equipos(kwh)	Consumo (MJ)
Parrilla(agitación y temperatura)	24	1.068	3.8448
Moto-reductor	34.45	0.37	45.887
Bomba P/circular agua	40.45	0.2159	31.439
Resistencia	2.4	0.1016	0.365
Quemador (gas LP)	~ 6	-	66 (1.5 kg)
Energía Consumida	-	-	147.535

Cuadro 4.2: Energía consumida en el sistema

Litros fermentados	Litros de bioetanol obtenidos	Energía final de salida (MJ)
100	~ 11	245.85

Cuadro 4.3: Energía final obtenida. Tomando en cuenta que el poder calorífico del bioetanol de $22,350.00 \frac{KJ}{Kg}$. [3]

Como resultado la energía final de salida obtenemos una relación de 1.6, mayor que la suministrada en los reactores y la que se emplea en el proceso de crecimiento de la levadura para obtener el bioetanol, cabe mencionar que este análisis es únicamente la energía consumida en los reactores durante el proceso de producción, sin embargo para un análisis de energía de todo el ciclo de vida de la producción habría que tomar en cuenta los gastos energéticos de cultivo, transporte, entre otros.

Sin embargo, existen resultados de investigaciones para el análisis para la evaluación del ciclo de vida los cuales son positivos para la producción de bioetanol a partir de la caña de azúcar. [31]

En el caso del proceso de destilación a se obtuvo un rendimiento aproximado de 10 % del total del medio fermentado.

Jugo de caña de azúcar	Bioetanol
100 litros	~ 11

Cuadro 4.4: Rendimiento obtenido

En cuanto al estudio realizado por medio de cromatografía de gases que es un factor muy importante para conocer los elementos y porcentajes finales en la muestra de bioetanol analizada.

Muestras	Bioetanol ($\frac{g}{l}$)
1 (Hasta 80 °C)	482.5
2 (de 80 a 85 °C)	415.7
3 (85 a 90 °C)	329.3

Cuadro 4.5: Concentración final

Conclusión

5.1. Conclusión

Como parte de las conclusiones del presente trabajo y como primera etapa se construyeron los reactores de fermentación y destilación, así mismo se llevaron a cabo la implementación de los sistemas de mediciones correspondientes a cada reactor, con esto se concluye parte de los objetivos planteados en el proceso de trabajo.

En el reactor de fermentación se pudo monitorear los parámetros establecidos del proceso de fermentación tales como: pH, %SST y temperatura. Dichos parámetros se monitorearon para la obtención de bioetanol con los valores para cada equipo de medición con: pH 4, 6 °Brix finales, temperatura promedio de 32 °C.

Se concluye que en el fermentador construido se pueden establecer las condiciones mínimas para un proceso fermentativo y observar la cinética de crecimiento de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* en sus diferentes fases.

Así mismo se desarrolló una metodología apropiada para llevar a cabo el proceso y se establecieron las condiciones mínimas de la producción de bioetanol a partir del jugo de caña.

Por otro lado se desarrolló el reactor de destilación que durante el proceso de obtención del bioetanol, se pudo realizar el control de temperatura para la evaporación del bioetanol. Para el caso del condensado del bioetanol se obtuvieron resultados favorables para el condensado de vapor del bioetanol, llevando con esto la recolección del bioetanol en su estado líquido.

La pureza del bioetanol en los productos de la destilación fue determinada por un análisis de cromatografía de gases. En el cual se observa el bioetanol con arriba de un 95 % de pureza, por otra parte se realizó una pequeña combustión del líquido obtenido (bioetanol) y como resultado fue la combustión del mismo.

5.2. Perspectivas

Como trabajos futuros se pretende implementar un sistema automático para control y lecturas de los parámetros de medición involucrados tanto en el proceso de fermentación como destilación así como también integrar ambos reactores para facilitar el manejo de la solución en ambos reactores.

Aidcionar un medidor de oxígeno disuelto y para contemplar la reacción bilogicas de los microorganismos.

Utilizar colectores solares para mantener la temperatura necesaria en la etapa de fermentación, como también estudiar la viabilidad para acoplar un sistema fotovoltaico para cubrir los gastos de energía eléctrica que se generan en el consumo del sistema de agitación.

En el proceso de destilación se requiere un estudio detallado para el sistema de evaporación y mantener el rango de temperatura óptimo para garantizar un producto de alta pureza.

por ultimo se necesita realizar un analisis del subproducto de la destilación y estudialo para la prodición de bigás que este último puede ser empleado en alguna etapa de la conversión del bioetanol que se requiera este tipo de energía.

Imágenes de los reactores



Figura A.1: Reactor de fermentación.



Figura A.2: Moreductor acoplado al reactor.



Figura A.3: Reactor de destilación.



Figura A.4: Tapa del reactor de destilación.



Figura A.5: Serpentin.



Figura A.6: Condensador acoplado al reactor de destilación.



Figura A.7: Reactores de fermentación-distilación.

Bibliografía

- [1] AIE. Energy Balances of OCDE countries - Energy Balances of Non-OCDE countries, 2010.
- [2] SENER.Secretaria de Energía. Balance nacional de energia 2009. Mexico DF., 2010.
- [3] Coordinacion BNDES y CGEE. *Bioetanol de Cana de Azucar: energia para el desarrollo sostenible*. Rio de Janeiro, 1ra. edition, 2008.
- [4] Pérez Sari nana Bianca Yadira y Santis Espinosa Luis Fernando. Producción de bioetanol a partir de caña de azúcar. Master's thesis, Univerisidad Politécnica de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez Chiapas, 2008.
- [5] *Los Biocombustibles*. Madrid, Barcelona, México, 2002.
- [6] T.S.G. LEE and E.A. BRESSAN. The potential of ethanol production from sugarcane brazil. *Sugar Tech*, 8:195 – 198, 2006.
- [7] International Energy Agency. *World Energy Outlook*. France, 2010.
- [8] Cabrera J.A. Informe. CIEMAT, 2006.
- [9] CEO Argentina. Biocombustibles. Hot Tpoics No. 5., 2007.
- [10] Gladys Choy. Biocombustibles: Desarrollos recientes y su impacto en la balanza comercial, los términos de intercambio y la inflación en el Perú. BCRP Working Paper Series, LIMA., 2008.
- [11] Instituto de Investigaciones Legislativas del Senado de la República. Nuevas energías renovables: Una alternativa energética sustentable para México. MÉXICO,DF., 2004.
- [12] Anoopn Singh Poonam Singh Nigam. Production of liquid biofuels from renewable resources. *Progress in Energy and Combustion Science*, 37:52–68, 2011.
- [13] Carlos Ariel Cardona Óscar Julián Sánchez. Producción biotecnológica de alcohol carburante i: Obtención a partir de diferentes materias primas. *Interciencia*, 30:671–678, 2005.
- [14] Carlos A. Cardona and Óscar J. Sánchez. Fuel ethanol production: process design trends and integration opportunities. *Bioresource Technology*, 98:2415 – 2457, 2007.
- [15] *Biofuels Engineering Process Technology*. United States of America., 2008.

- [16] José A. Teixeira Lucília Domingues. Francisco B. Pereira, Pedro M.R. Guimarães. Optimization of low-cost medium for very high gravity ethanol fermentations by *saccharomyces cerevisiae* using statistical experimental designs. *Bioresource Technology*, 101:7856 – 7863, 2010.
- [17] A Faaij T. Poot A. Walter J.D. Van den Wall Bake, M. Junginger. Explaining the experience curve: cost reductions of brazilian ethanol from sugarcane. *Biomass and Bioenergy*, 33:644 – 658, 2009.
- [18] Secretaria de Energía. Potenciales y viabilidad del uso de bioetanol y biodiesel para el transporte en México. 2006.
- [19] Omar Masera Jorge Islas, Fabio Manzini. A prospective study of bioenergy use in México. *Energy*, 32:2306 – 2320, 2007.
- [20] Cámara de Diputados del H. Congreso de la Unión. Ley de promoción y desarrollo de los bioenergéticos. México, D.F., 2008.
- [21] Becerra Pérez Luis Armando. La industria del etanol y sus perspectivas de desarrollo en México. Master's thesis, Universidad Nacional Autónoma de México, Mexico D. F., Octubre 2008.
- [22] Juan Mauel García Camús y José Ángel García Laborda. Biocarburantes líquidos: biodiesel y bioetanol. Technical report, CIEM, 2006.
- [23] Eugene F. Megyesy. *Manual de Recipientes a presión: diseño y cálculo*. México, D.F., 1ra. edition, 1992.
- [24] TEMA. *STANDARDS OF THE TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURERS ASSOCIATION*. TarryTown, New York, eighth edition, 1999.
- [25] H. Sinin K. Makino A.A. Saleh, A.B.M.H. Sharif and H.H. Masjuki. Bioethanol production from woody biomass by recombinant *saccharomyces cerevisiae* expressing thermostable enzyme. *Biomed*, 21:306 – 309, 2008.
- [26] Badal C. Saha and Jonathan Woodward. *Fuel and chemicals from Biomass*. United States of America., 1997.
- [27] Mohamed A. Abdel-Naby Abdel-Mohsen S. Ismail and Ahmed F. Abdel-Fattah. Production hemicellulitic enzymes by fungi. *Agricultural Wastes*, 18:283–288, 1986.
- [28] Takashi Endo Shinichi Yuno Alba P.S. Bon. Ayla SanÁna da Silva, Hiroyuki Inoue. Production hemicellulitic enzymes by fungi. *Bioresource Technology*, 101:7402–7409, 2010.
- [29] Barry C. Axcell Elizabeth J. Lodolo, Johan L.F. Kock and Martin Brooks. The yeast *saccharomyces cerevisiae*-the main character in beer brewing. *FEMS Yeast Res*, 8:1018 – 1036, 2008.
- [30] GAB Sistemática Analítica S.L. Sant Jordi, 30. moja-olèrdola 08734. bcn [Spain].
- [31] Ester van der Voet Lin Luo and GJalt Huppes. Life cycle assessment and life cycle costing of bioethanol from sugarcane in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13:1613–1619, 2009.