

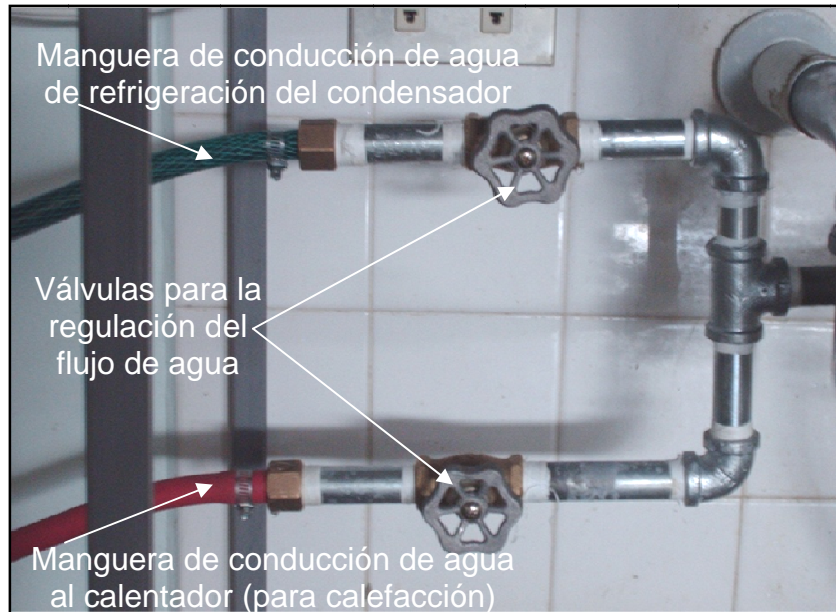


**Figura 15. Dispositivos de conducción del etanol.**

Las interconexiones entre estas mangueras con cada uno de los dispositivos (calentador eléctrico, condensador, fermentador, fuente de agua) son conexiones de cobre, bronce o acopladores manuales rápidos. En el caso del fermentador, éste se une a sus mangueras respectivas a través de acopladores manuales rápidos; esto permite quitar o poner rápidamente las mangueras manualmente, de manera sencilla, de acuerdo a la actividad que se desee realizar. El calentador eléctrico se enlaza con sus respectivas mangueras por medio de conexiones de bronce fijas y en el caso del condensador, este se une a sus mangueras respectivas mediante conexiones de cobre fijas.

La fuente de agua (Figura 16) también cuenta con conexiones de bronce para unirse a sus respectivas mangueras y además cuenta con válvulas para la regulación del flujo de agua. La fuente de agua cumple la tarea de aportar a todos

los dispositivos del sistema, que así lo ameriten, el agua necesaria para su desempeño. Es de hacer notar, que todas y cada una de las conexiones y acopladores se adaptan con exactitud al diámetro de cada manguera.



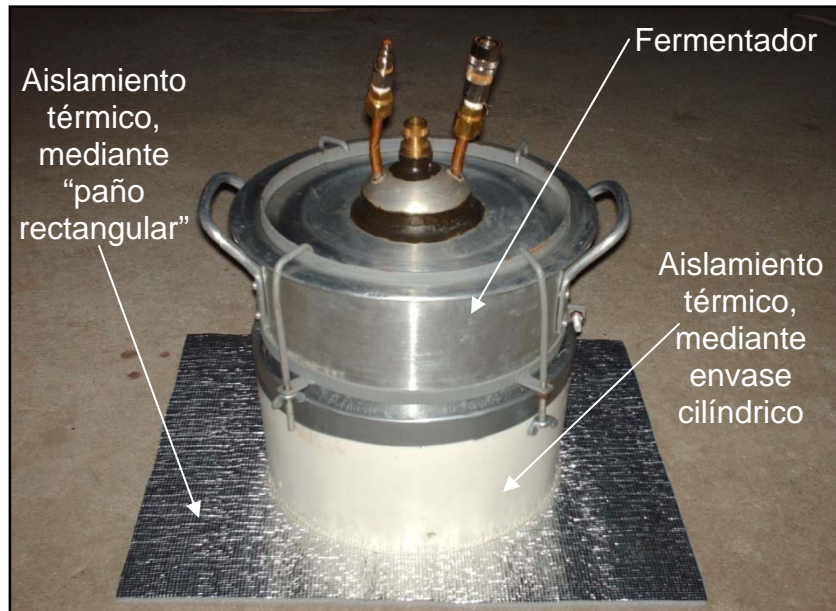
**Figura 16. Red de distribución de la fuente de agua.**

### **3.5 Dispositivos de aislamiento térmico**

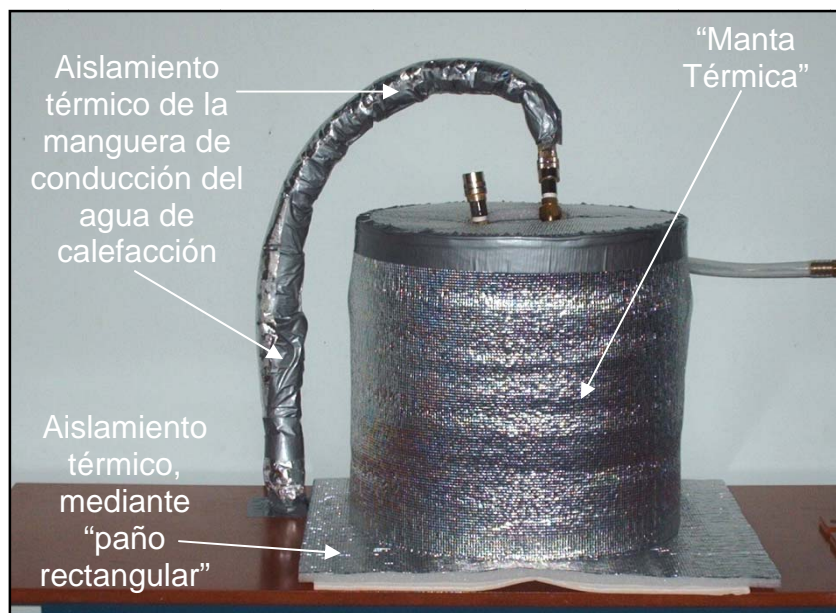
Debido a las “pérdidas de energía” en forma de calor disipado al medio ambiente, las cuales pueden impedir el objetivo de alcanzar las temperaturas deseadas, fue necesario aislar el bioreactor y parte del sistema de conducción de agua de calefacción. En el caso del fermentador, éste se aisló mediante un envase de forma cilíndrica (Figura 17), de material plástico de aproximadamente 0,28 metros de diámetro y 0,15 metros de altura; éste envase cilíndrico fue recubierto internamente con un material aislante (fibra de vidrio); que se colocó abierto en su cara superior y cerrado en la inferior. En la mesa o banca donde descansa el

reactor, fue colocado un paño de forma rectangular de material aislante; el cual posa libre; con aproximadamente 0,01 metros de espesor; 0,47 metros de largo y 0,40 metros de ancho; este paño tiene el objetivo de cubrir o tapar la cara abierta de la “manta térmica” y proteger a la banca del calor. En lo que respecta a la “manta térmica” antes descrita; el fermentador fue cubierto; además de todo lo anterior, con una de éstas. Su función es aislar el bioreactor, impidiendo pérdidas de energía en forma de calor. (Figura 18); hecha de material aislante de aproximadamente 0,01 metros de espesor; de forma cilíndrica, de 0,34 metros de diámetro externo y 0,335 metros de altura aproximadamente; abierta en su cara inferior y cerrada en la superior; salvo un orificio que se realizó para los conductos; este orificio tiene aproximadamente 0,10 metros de diámetro.

El conducto de transporte del agua de calefacción que va desde el calentador eléctrico, hasta el fermentador; fue aislado igualmente, usando para ello fibra de vidrio, recubriendo la respectiva manguera y sujetando dicho material aislante con cinta adhesiva.



**Figura 17. Dispositivos de aislamiento térmico.**



**Figura 18. Manta térmica.**

### 3.6 Calibración del equipo de fermentación

La calibración de equipo fermentativo consistió en la realización de una serie de pruebas con la finalidad de establecer algunos parámetros que permiten mantener

la temperatura constante del reactor durante el proceso de fermentación y la temperatura de condensación, durante el referido proceso, para producir eficazmente la conversión del etanol hidratado de fase gaseosa a la fase líquida.

La calibración, antes mencionada, del bioreactor consistió en determinar el caudal promedio que al circular por el sistema de refrigeración/calefacción mantiene la temperatura constante tanto para el proceso de fermentación, como para la condensación.

La calibración del condensador se basó en el monitoreo de la temperatura del agua de refrigeración que circula por él y en la medición de caudal; esto con el objetivo de establecer o comprobar que verdaderamente el agua de refrigeración en el interior del condensador, tiene una temperatura menor que la del etanol hidratado evaporado; garantizando con esto, la transferencia de calor del etanol hidratado al agua refrigerante y la consecuente conversión del alcohol hidratado a la fase líquida.

Las calibraciones antes descritas, se realizaron mediante cuatro pruebas; cada una de ellas con diferentes aberturas de la válvula o llave de paso (1/6 de vuelta, 1/4 de vuelta, 1/3 de vuelta y 1/2 vuelta) del sistema de distribución de agua. Se midió la temperatura del fermentador y el caudal (mediante método volumétrico) que circula en el sistema, a intervalos de 10 minutos, para cada una de las aberturas de válvula antes mencionada. Se determinó el caudal promedio para cada una de las aberturas de la válvula y finalmente se construyeron las “curvas de calibración

del bioreactor”; un gráfico que muestra el comportamiento de la temperatura en el transcurso del tiempo; para cada uno de los caudales promedios, de las diferentes aberturas de válvula. Estas curvas permiten seleccionar el caudal para la obtención de una determinada temperatura. Es importante añadir que en esta prueba de calibración se usó agua como sustrato para el llenado del fermentador, hasta alcanzar el nivel de su capacidad útil de almacenamiento (0,009 metros cúbicos).

Para la calibración del condensador, se realizó una sola prueba, en la cual se midió la temperatura y el caudal (mediante método volumétrico) del agua de refrigeración, a intervalos de 10 minutos. Se construyó la respectiva “curva de calibración”. En el caso de este dispositivo, puesto que la temperatura de la fuente de agua es de aproximadamente 29 °C y permanece casi constante, sin variar significativamente en el transcurso del tiempo, independientemente del caudal, no representa gran importancia la realización de varias pruebas para calibrar dicho dispositivo por lo cual esta prueba, constituye la mejor referencia.

### **3.7 Ensayo de destilación y condensación del etanol mediante el sistema de refrigeración/calefacción**

El sistema de refrigeración/calefacción se puede emplear para la redestilación del etanol, es decir, suministrar calor a través del serpentín del referido sistema, una vez que se produjo la primera separación de alcohol hidratado del sustrato. Para probar este sistema como dispositivo de redestilación, se realizó una prueba para tal fin; en la misma se usó una solución de alcohol etílico diluido en agua, de

volumen conocido y concentración conocida de etanol. Se procedió entonces a su destilación y condensación. El procedimiento para la ejecución de este ensayo consistió en colocar en el bioreactor la solución de alcohol etílico, con las características y parámetros conocidos de volumen y concentración del alcohol; para su destilación, se monitoreó y controló la temperatura y el caudal de circulación de agua (mediante método volumétrico); realizando mediciones cada 10 minutos de ambas variables; con la finalidad de mantener el caudal de agua de calefacción y en consecuencia la temperatura del fermentador, dentro de los rangos establecidos para la destilación del etanol hidratado.

Se construyó la curva de destilación para una solución de etanol de concentración conocida; un gráfico que muestra el comportamiento de la temperatura del fermentador en el transcurso de tiempo en el que ocurre la destilación y cuyo comportamiento se compara con la temperatura de ebullición del etanol y la temperatura de ebullición del agua; con el fin de evaluar y verificar mediante ésta gráfica, el correcto desenvolvimiento del proceso de destilación. Por último se determinó la cantidad de alcohol hidratado destilado y la eficiencia de destilación del fermentador.

### **3.8 Ensayo de fermentación alcohólica y destilación**

Para evaluar y verificar el diseño y el funcionamiento del equipo construido, se realizaron varios ensayos del proceso de fermentación alcohólica. En estas pruebas se utilizó la levadura de la especie *Saccharomyces cerevisiae*, como microorganismo encargado de la fermentación.

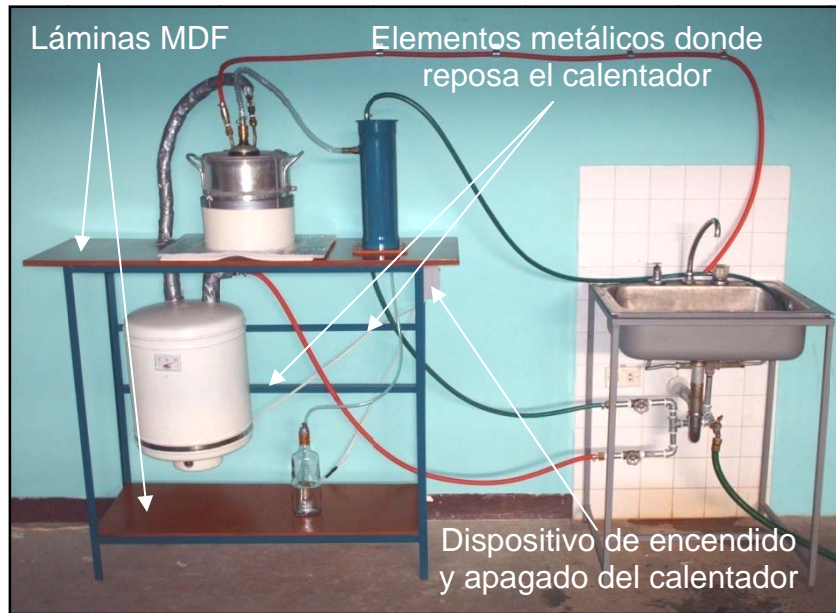
El medio o sustrato de fermentación consistió en sacarosa y panela de caña de azúcar (ambas en igual proporción) disueltas en agua destilada (se usa agua destilada para evitar posible contaminación del medio). Las concentraciones del medio de cultivo son conocidas y tomadas de la literatura existente por lo tanto se trabajó bajo los esquemas de concentración de azúcar recomendados, para el buen desenvolvimiento del proceso fermentativo. Ésta solución se preparó; para permitir la adecuada solubilidad de la sacarosa en el agua destilada; calentado el medio y agitando el sustrato, mientras se agregaba gradualmente el azúcar; producto entonces del calor aplicado y de la agitación del medio, se produce una mejor solubilidad de la sacarosa en el agua destilada. Finalmente se llevó el sustrato hasta una temperatura de 373,15 °K, para evitar posible contaminación del medio por algún microorganismo.

Se colocaron las levaduras directamente en el fermentador, se cerró éste (para mantener las condiciones de anaerobiosis) y se monitoreo el comportamiento del fermentador con respecto a la temperatura; manteniendo ésta en el rango recomendado para el microorganismo o agente fermentativo. Una vez concluida la fermentación, se procedió a destilar y condensar el etanol hidratado producido en el bioreactor, mediante la metodología de destilaciones sucesivas, antes descrita; para finalmente cuantificar la cantidad de alcohol hidratado producido en el proceso de fermentación.



### **3.9 Banca de soporte de los elementos del sistema**

Los elementos (calentador eléctrico, condensador, bioreactor, recipiente de almacenamiento de etanol, etc.) que conforman las partes del sistema de fermentación diseñado y construido; reposan sobre una banca construida para tal fin. Ésta banca (Figura 19) fue construida con ángulos metálicos y tubos rectangulares huecos metálicos. La banca posee dimensiones de 1 x 0,4 x 1 metros y es de color azul. Todas las partes metálicas de la banca fueron unidas mediante el uso de soldaduras. Es de hacer notar que el calentador eléctrico posa sobre dos elementos metálicos (un ángulo y un tubular) de 1 metro de largo cada uno; unidos a la banca para tal fin. La banca está constituida además por dos laminas de madera para el soporte de varios de los elementos o las partes antes mencionadas; éstas láminas están unidas a los elementos metálicos de la banca mediante tornillos y las mismas poseen dimensiones de 1,2 x 0,435 x 0,015 metros, la que se encuentra en la parte superior de la banca; y 1 x 0,4 x 1 metros, la lámina que se encuentra en la parte inferior de la banca. Ambas láminas son de color “caoba”. La lámina de la parte inferior de la banca, reposa sobre elementos metálicos tubulares; mientras que la lámina de la parte superior de la banca reposa sobre ángulos metálicos. El calentador eléctrico posee su dispositivo de encendido y apagado a un costado de dicha banca.



**Figura 19. Banca construida para el soporte de los elementos del sistema de fermentación.**

## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1 Calibración del equipo de fermentación

Se realizaron varios ensayos o pruebas con la finalidad de establecer el comportamiento de la temperatura del bioreactor en el transcurso del tiempo, con respecto al caudal promedio que circula por el sistema de refrigeración/calefacción, para cada una de las aberturas de válvula del sistema de distribución de agua. Todo ello para mantener, regular y controlar de manera exitosa la temperatura del sustrato en el bioreactor durante los procesos fermentativos, que así lo ameriten. Se realizaron mediciones temperatura y caudal (mediante método volumétrico) cada 10 minutos, como se especificó en la metodología). En la tabla 4 se observan las diferentes aberturas de válvula del sistema de distribución de agua y su respectivo caudal promedio; y en la tabla 5 se presentan las mediciones de temperatura del bioreactor en el transcurso del tiempo para cada uno de los caudales promedios.

**Tabla 4: Caudales promedios para cada una de las aberturas de la válvula del sistema de distribución de agua**

Diferentes aberturas de la válvula	Caudal promedio (m <sup>3</sup> /s)
1/6 de vuelta	0,00000252
1/4 de vuelta	0,000007523
1/3 de vuelta	0,00002679
1/2 de vuelta	0,0000894

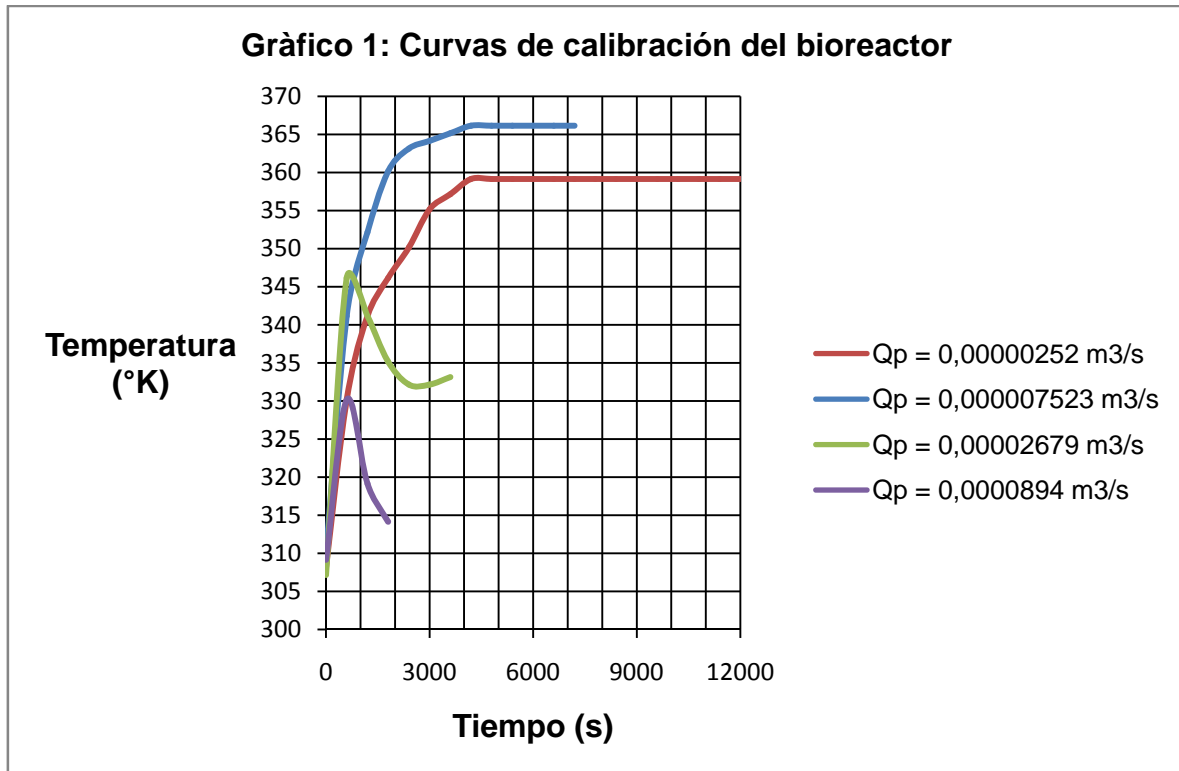
**Fuente: datos generados por el autor**

**Tabla 5: Mediciones de la temperatura del bioreactor en el transcurso del tiempo para diferentes caudales promedio**

Tiempo (s)	Diferentes caudales promedios (m <sup>3</sup> /s)			
	0,00000252	0,000007523	0,00002679	0,0000894
	Temperatura (°K)	Temperatura (°K)	Temperatura (°K)	Temperatura (°K)
0	308,15	310,15	307,15	309,15
600	330,15	341,15	346,15	330,15
1200	341,15	352,15	341,15	319,15
1800	346,15	360,15	335,15	314,15
2400	350,15	363,15	332,15	—
3000	355,15	364,15	332,15	—
3600	357,15	365,15	333,15	—
4200	359,15	366,15	—	—
4800	359,15	366,15	—	—
5400	359,15	366,15	—	—
6000	359,15	366,15	—	—
6600	359,15	366,15	—	—
7200	359,15	366,15	—	—
7800	359,15	—	—	—
8400	359,15	—	—	—
9000	359,15	—	—	—
9600	359,15	—	—	—
10200	359,15	—	—	—
10800	359,15	—	—	—
11400	359,15	—	—	—
12000	359,15	—	—	—

**Fuente: datos generados por el autor**

Para interpretar y analizar adecuadamente los datos de la tabla 5, que describe el comportamiento de la temperatura del bioreactor en el transcurso del tiempo, en función de los diferentes caudales promedios ( $Q_p$ ), se realizaron las respectivas “curvas de calibración del bioreactor” (Gráfico 1).



En la gráfico 1 se puede observar que para todos los caudales hay un periodo de calentamiento de aproximadamente 1500 segundos; sin embargo, para los caudales mayores ( $0,00002679$  y  $0,0000894 \text{ m}^3/\text{s}$ ) al llegar a  $346,15$  y  $330,15 \text{ }^\circ\text{K}$  (puntos máximos de temperatura); respectivamente, la temperatura no se mantiene y comienza a disminuir. En los caudales menores se observa el incremento de temperatura, antes señalado, no obstante, después de dicho incremento, la temperatura se mantiene constante en el tiempo, luego de alcanzar

el punto máximo. Todo esto permite concluir que los caudales menores generan valores más altos de temperatura; que al llegar a un máximo, permanecen constantes en el tiempo; mientras que caudales mayores generan aumentos bruscos de temperatura, hasta llegar a un máximo, para luego disminuir considerablemente y no lograr mantenerse en el tiempo en niveles relativamente altos de temperatura. De todo lo anterior se deriva que los caudales más bajos constituirían los empleados en el proceso de fermentación; para mantener más o menos constante, un parámetro tan importante como la temperatura.

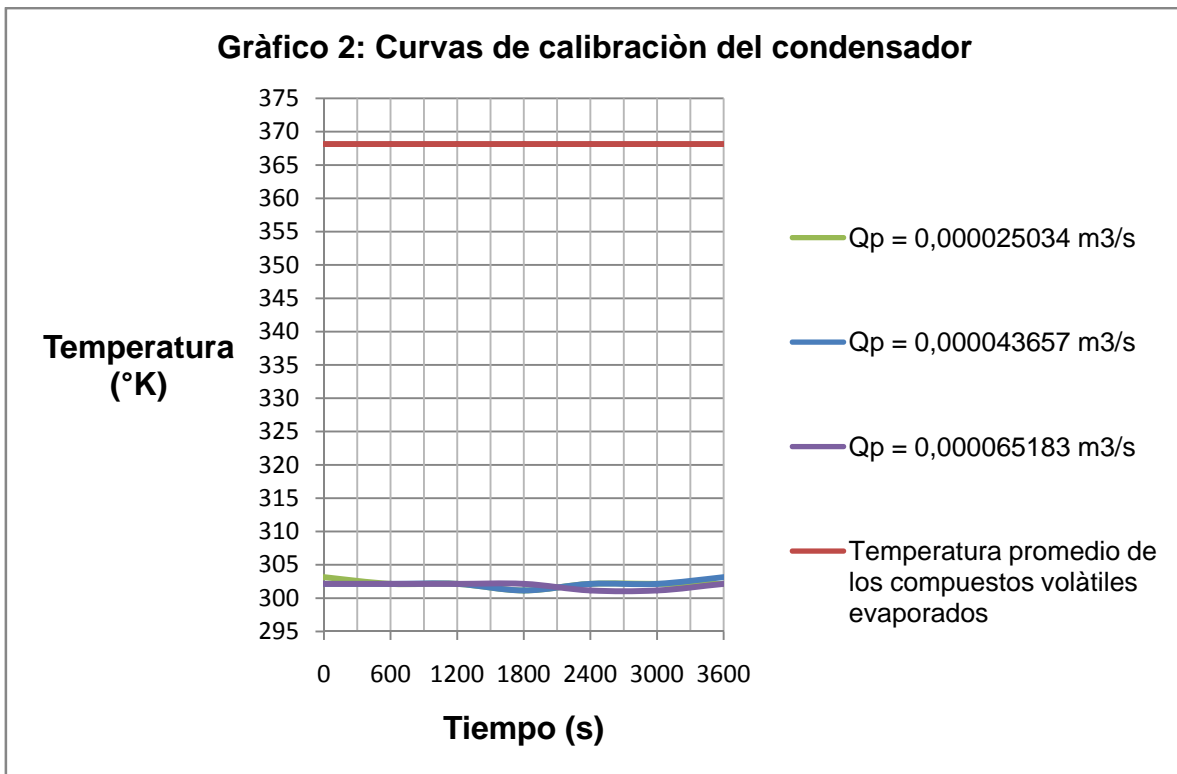
En los ensayos para la calibración del condensador cuyo objetivo es asegurar que el sistema de condensación mantenga la temperatura adecuada para el proceso de condensación del etanol hidratado. En la tabla 6 se presentan las mediciones de temperatura del agua de refrigeración en el transcurso del tiempo, para diferentes caudales promedios.

**Tabla 6: Mediciones de temperatura del agua de refrigeración del condensador en el transcurso del tiempo, para diferentes caudales promedio**

Tiempo (s)	Diferentes caudales promedios (m <sup>3</sup> /s)		
	0,000025034	0,000043657	0,000065183
	Temperatura (°K)	Temperatura (°K)	Temperatura (°K)
0	303,15	302,15	302,15
600	302,15	302,15	302,15
1200	302,15	302,15	302,15
1800	301,15	301,15	302,15
2400	302,15	302,15	301,15
3000	302,15	302,15	301,15
3600	302,15	303,15	302,15

**Fuente: datos generados por el autor.**

Del mismo modo que se hizo en el caso de las “curvas de calibración del bioreactor”, para interpretar y analizar adecuadamente el comportamiento de la temperatura del agua de refrigeración del condensador en el transcurso del tiempo, en función de los diferentes caudales promedios ( $Q_p$ ), se realizaron las respectivas “curvas de calibración del condensador” (Gráfico 2).



La condensación del etanol hidratado se produce con la circulación de agua de refrigeración en el interior de la camisa cilíndrica del condensador. Las curvas de calibración del condensador (Gráfico 2) permiten inferir que independientemente del caudal de agua de refrigeración que circule por el sistema de condensación; la temperatura permanece prácticamente constante y alrededor de 302,15 °K, sin variaciones significativas a lo largo del tiempo. Además, se determinó que la temperatura del sistema de condensación, se encuentra muy por debajo de la temperatura de los compuestos volátiles que se evaporan durante el proceso de destilación; lo que garantiza el cambio de fase de gas a líquido del etanol hidratado, durante los procesos simultáneos de destilación y condensación; esto quiere decir, que el alcohol hidratado que se va extrayendo del fermentador en



forma gaseosa es inmediatamente convertido en etanol hidratado líquido, en el equipo de condensación.

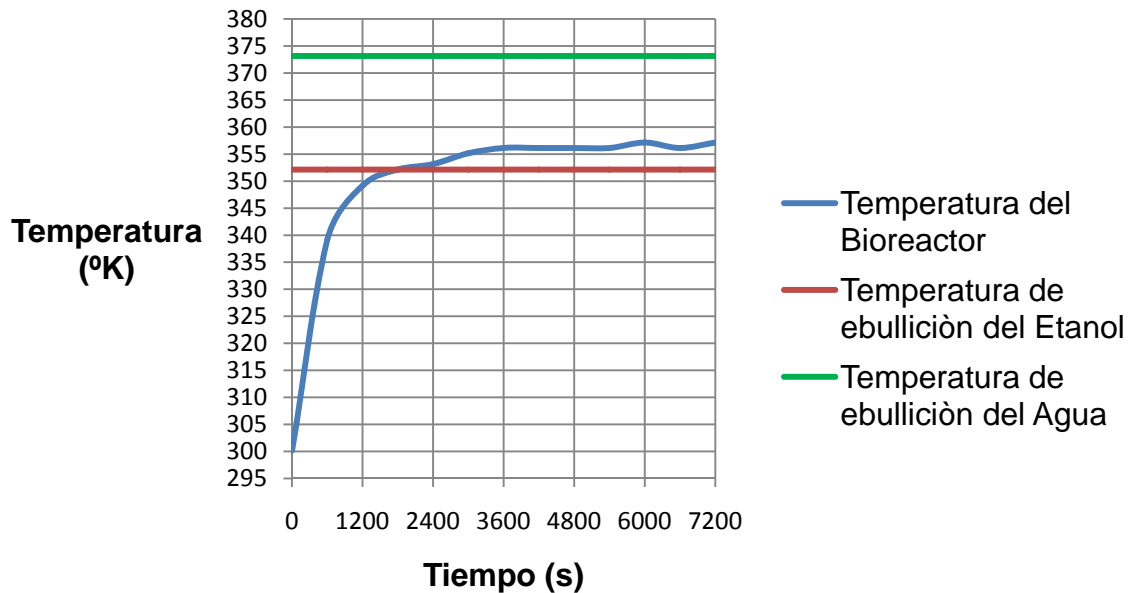
#### **4.2 Ensayo de destilación y condensación del etanol mediante el sistema de refrigeración/calefacción**

Para estudiar la posibilidad de usar el sistema de refrigeración/calefacción como un mecanismo de redestilación del etanol hidratado, una vez ocurrida la primera destilación; se realizó este ensayo. Para ello se dispuso de una solución del alcohol etílico, que en principio tenía un volumen total de 0,0015 metros cúbicos. Se determinó entonces que la concentración inicial del etanol en la solución fue del 40%; es decir, 0,0006 metros cúbicos de etanol.

La solución antes descrita (ron comercial) se colocó en el reactor y se procedió a su destilación y condensación simultánea. Se realizaron mediciones de temperatura del ron en el bioreactor, cada 10 minutos, con un caudal de agua de calefacción, establecido en los ensayos previos. De esta manera se mantuvo un caudal promedio del agua de calefacción alrededor de los  $0,00000785 \text{ m}^3/\text{s}$  (es de hacer notar que se mantuvo este caudal promedio puesto que se aproxima a la opción de caudal seleccionado para mantener la temperatura del fermentador en niveles adecuados para el éxito del proceso de redestilación.

El gráfico 3, muestra el comportamiento de la temperatura del fermentador en el transcurso del tiempo para el caudal promedio antes descrito.

**Gráfico 3: Curva del ensayo de destilación/condensación, usando el sistema de refrigeración/calefacción**



Una vez que ya no se pudo extraer más etanol hidratado de la solución, es decir, que cesó la circulación de los gases a través de los conductos; concluyó este ensayo. Al medir la cantidad de etanol hidratado destilado de la solución de ron comercial, se obtuvo un valor de  $0,000153 \text{ m}^3$ . Considerando el alcohol destilado, como etanol de alta concentración, el porcentaje de destilación obtenido, fue del 25,5 %.

De este ensayo se deriva la posibilidad real y cierta de usar el sistema de refrigeración/calefacción como un mecanismo para redestilar la solución de etanol hidratado; que se produce en el proceso de fermentación.

### **4.3 Ensayo de fermentación alcohólica y destilaciones sucesivas**

Para evaluar y verificar el correcto funcionamiento del equipo de fermentación diseñado y construido, se realizó una prueba de fermentación alcohólica; con la correspondiente destilación, mediante la metodología de destilaciones sucesivas, antes descrita. Para ello preparó un sustrato, no esterilizado, con 0,009 m<sup>3</sup> de agua destilada; con una concentración de azúcar alrededor del 10% (p/v); añadiendo para tal fin 0,45 kilogramos de sacarosa e igual cantidad de panela de caña de azúcar. Esta azúcar fue disuelta en el agua destilada calentando el sustrato mediante estufa y agitando la mezcla. Una vez disuelto el azúcar se procedió a cerrar herméticamente el fermentador, solo dejando abierto el orificio central para evitar las presiones por aumento de la temperatura y se calentó el medio hasta una temperatura de 373,15 °K; con el fin de disminuir drásticamente la posibilidad de contaminación de la mezcla por microorganismos patógenos, que puedan afectar el crecimiento de las levaduras.

Una vez realizadas estas acciones se procedió a inocular el fermentador con levadura comercial de la especie *Saccharomyces cerevisiae*. Las levaduras se colocaron en el medio de cultivo en una proporción de 6 kilogramos de levadura fresca por cada metro cúbico de caldo enriquecido o sustrato (Bolaños y otros, 2003). Luego se agitó la mezcla para distribuir uniformemente las levaduras en el sustrato. Colocadas las levaduras en el reactor, se cerró el fermentador mediante los mecanismos de ajuste de éste, para mantener las condiciones anaeróbicas propias del proceso de fermentación alcohólica. Dejando el orificio central como único escape para la salida de los gases; entre los que destaca el CO<sub>2</sub>, generado

como producto de la actividad de las levaduras y el cual en ciertas concentraciones, inhibe la fermentación.

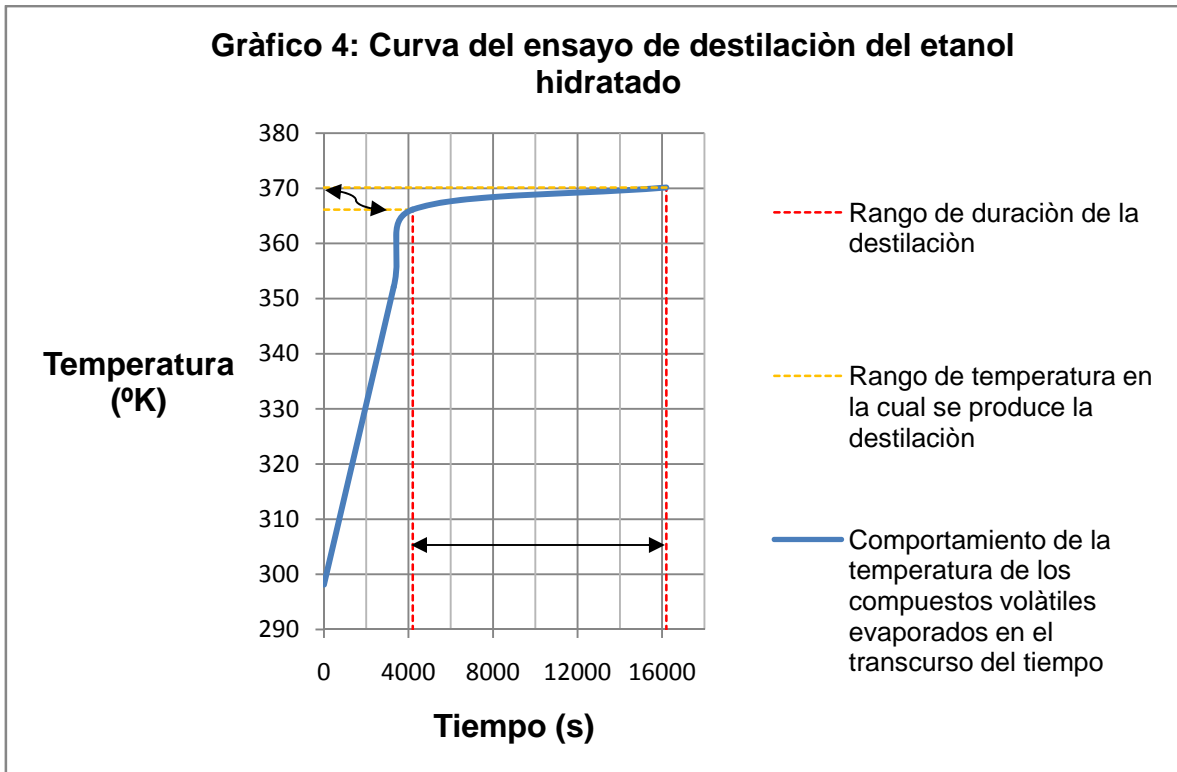
La fermentación se detuvo al detectar la presencia de etanol y lo que sucedió a los 3 días, es importante señalar que para la realización de la práctica respectiva se recomienda observar el crecimiento bacteriano para establecer este lapso. Durante el proceso fermentativo se monitoreo la temperatura del sustrato en el interior del fermentador; manteniéndose ésta alrededor de los 303,15 °K; idónea para el proceso fermentativo; debido a que la temperatura normal de cultivo de las levaduras se sitúa entre los 298,15 y 303,15 °K, que permiten efectivamente el crecimiento de la mayor parte de las mismas (Abril y Casp, 2003); con lo cual no hubo necesidad de usar el sistema de refrigeración/calefacción para el control de la temperatura del reactor.

Es importante señalar que durante las noches la temperatura ambiental disminuye un poco con respecto a la temperatura diurna, con lo cual se hizo necesario aislar fermentador durante las noches mediante los dispositivos térmicos antes mencionado (manta térmica, etc.), aminorando los efectos de las bajas temperaturas sobre el correcto desempeño de la fermentación.

Desarrollado con éxito el proceso fermentativo, se procedió a destilar el etanol presente en la solución. La destilación se basa en la premisa de que una vez transferido calor al bioreactor, el componente más volátil de la mezcla (en este caso el alcohol) se va a encontrar en mayor proporción en el vapor formado, que

en el líquido, de manera que si el vapor condensa y hervimos el líquido condensado, en el siguiente vapor formado habrá aumentado la proporción de alcohol. De esta forma, por medio de varias destilaciones sucesivas podrían separarse ambos líquidos (García y otros, 2006). En este sentido se procedió agitando la mezcla para homogeneizar la concentración de etanol en la solución. Se dividió la mezcla de ésta primera destilación en dos partes iguales, cada una de 0,0045 m<sup>3</sup>, debido a que la ebullición de un volumen mayor de la mezcla podría saturar la capacidad del fermentador y producir situaciones indeseadas.

Se realizaron las conexiones respectivas de mangueras; se abrió la válvula respectiva para la circulación del agua de refrigeración del condensador; para asegurar el cambio de fase del etanol hidratado, de gas a líquido. Se colocó el fermentador; cerrado herméticamente, sobre la estufa eléctrica; calentándolo hasta producir la evaporación de los compuestos volátiles. Los cuales al circular por el conducto respectivo, llegaban hasta el condensador; para luego cambiar a la fase líquida, saliendo finalmente del condensador y siendo recogidos en un envase para tal fin. Se monitoreó la temperatura de estos compuestos evaporados (principalmente agua y etanol); observándose en la gráfica 4 el comportamiento de la temperatura de los compuestos volátiles en el transcurso del tiempo y puntualizándose además, los rangos de temperatura y tiempo en los cuales se produce la destilación del etanol hidratado.



De ésta curva se infiere que el rango de temperatura de destilación de los compuestos volátiles (principalmente agua y etanol) que se evaporan; producto del calor transferido al fermentador, está entre los 366,15 y 370,15 °K; y la duración del proceso de destilación es de aproximadamente 12000 s. Es necesario señalar que en la práctica, la destilación del etanol hidratado se da por concluida al observar una disminución importante de la cantidad de solución que fluye a través de los conductos respectivos, aunado a un aumento de la temperatura de los compuestos volátiles que se están evaporando; debido a que se conoce, que la mayor cantidad de etanol se destila en los inicios del proceso; basada ésta aseveración en que la destilación del alcohol etílico puede dividirse en tres fases; a saber:

- ✓ *Cabeza*: es el principio del destilado, posee gran porcentaje de metílico, alcohol dañino para la salud.
- ✓ *Corazón*: es la parte intermedia del destilado, el alcohol y las sustancias obtenidas son de gran calidad.
- ✓ *Colas*: es el final del destilado donde se encuentran todas las impurezas.

Normalmente sólo se utiliza el corazón del destilado, esto supone 1/3 aproximadamente del total de la destilación (García y otros, 2003).

De la primera destilación se obtuvo alrededor de 0,0010 m<sup>3</sup> de etanol hidratado, para cada una de las divisiones de mezcla, señaladas anteriormente, para un total de 0,002 m<sup>3</sup> de etanol hidratado en la primera destilación. Finalmente la solución de etanol hidratado obtenida en la primera destilación fue redestilada para concentrar aun más la cantidad de alcohol. En la segunda destilación o redestilación se obtuvo aproximadamente 0,0005 m<sup>3</sup> de etanol hidratado a una mayor concentración de que la solución anterior.

## CAPITULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 5.1 CONCLUSIONES

Los objetivos planteados en este trabajo de investigación se lograron exitosamente, a saber:

- ✓ Se construyó el fermentador anaeróbico para la producción de etanol a escala de laboratorio. Con una capacidad útil de 0,009 m<sup>3</sup> de sustrato y con una producción de etanol hidratado alrededor de 0,0005 m<sup>3</sup> en cada proceso fermentativo.
- ✓ Se construyó el sistema de destilación y condensación para la separación del etanol del sustrato fermentado, utilizando la metodología de destilaciones sucesivas, para concentrar el alcohol en solución acuosa.
- ✓ Se verificó y evaluó el funcionamiento de todas y cada una de las partes y elementos del equipo construido; mediante las pruebas y los ensayos establecidos par tal fin; comprobando con ello, el buen desempeño de equipo construido, lográndose satisfactoriamente la producción de etanol hidratado deseado.



- ✓ Se elaboró una guía o manual para la operación y mantenimiento del equipo construido; con el fin de aportar a estudiantes, profesores e investigadores, un instrumento para el manejo y mantenimiento adecuado y satisfactorio del equipo de fermentación alcohólica construido.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

Se recomienda:

- ✓ Evaluar la posibilidad de construir una “columna de destilación” o “torre de fraccionamiento” para el equipo construido; con el objeto de mejorar el proceso de destilación y condensación del etanol, al aumentar los niveles de concentración de dicho alcohol en la solución destilada.
- ✓ Tomar acciones conducentes al cambio las válvulas de la red de distribuciones de la fuente de agua por válvulas más precisas, para una mejor regulación de los caudales de agua que circulan por los diferentes sistemas del equipo de fermentación alcohólica.
- ✓ Incluir en la respectiva práctica de laboratorio sobre fermentación alcohólica; además de la realización de la fermentación y consecuente destilación del etanol; la realización de los ensayos inherentes a calibración de los elementos o partes que conforman el equipo de fermentación; contribuyendo con ello a la solida formación académica de los estudiantes en lo referente al proceso de producción de alcohol etílico.

- ✓ Hacer esfuerzos para mejorar la dotación del Laboratorio de Energía y Mecanización Agrícola, en lo que respecta a instrumentos tales como: microscopios, alcoholímetros, etc., necesarios para un óptimo desempeño de las actividades de docencia e investigación, en el estudio de las fermentaciones alcohólicas.

## BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

ABRIL, José y Ana CASP. (2003). *Procesos de conservación de alimentos*. Ediciones Mundi-Prensa Libros. 494 págs.

ALONSO M. José Javier. (2004). *Las posibilidades energéticas de la Biomasa en la Comunidad Autónoma de Madrid*. Revista Observatorio Medioambiental. Universidad Complutense de Madrid. Núm. 7: pp. 195-220. España.

BAUTISTA, M; L. GARCÍA; J. BARBOZA y L. PARRA. (2001). *El agave tequilana weber y la producción de tequila*. Revista Acta Universitaria. Universidad de Guanajuato. Agosto, año/vol.11, número 002. Guanajuato, México. pp. 26-34.

BAUTISTA, M; L. GARCÍA; R. SALCEDO y L. PARRA. (2001). *Azúcares en agaves (agave tequilana weber) cultivados en el estado de Guanajuato*. Revista Acta Universitaria. Universidad de Guanajuato. Abril, año/vol. 11, número 001. Guanajuato, México. pp. 33-38.

BLANCO S. Fernando. (2004). *Aumento de la demanda de empleo en energías renovables*. Revista Galega de Economía. Universidad de Santiago de Compostela. Junio-Diciembre, año/vol. 13, número 002. Santiago de Compostela, España. pp. 1-11.

BOLAÑOS, N; C. HERRERA y G. LUTZ. (2003). *Química de alimentos. Manual de laboratorio*. Editorial de la Universidad de Costa Rica. San José de Costa Rica. 144 págs.

BUENO, A; A. CALZADA y M. SÁNCHEZ. (2000). *El inicio de la replicación del ADN*. Ciencia al Día. Internacional. Febrero, Vol. 3, número 1. pp. 1-15.

CARDONA, C.; M. MONTOYA; J. QUINTERO y Ó. SÁNCHEZ. (2005). *Evaluación económica del proceso de obtención de alcohol carburante a partir de caña de azúcar y maíz*. Revista Universidad Eafit. Julio-Septiembre, año/vol. 41, número 139. Medellín, Colombia. pp. 76-87.

CEPAL. (2006). Costos y precios para Etanol combustible en América Central. Documento en línea. Consultado el 3/12/2007. Disponible en: [www.eclac.org/publicaciones/xml/9/24459/L716.pdf](http://www.eclac.org/publicaciones/xml/9/24459/L716.pdf)

DANIELS, Alfonso. (2007). *Etanol brasileño, la solución que nadie quiere ver*. Revista Política Exterior. Julio-Agosto, número 118. pp. 100-107.

GARCÍA, F; P. GARCÍA y M. GIL. (2003). *Bebidas*. Cengage Learning Editores. 200 págs.

GARCÍA, J; J. GARCÍA y C. D'OCON. (2006). *Fundamentos y técnicas de análisis bioquímico*. Cengage Learning Editores. 422 págs.

LOPÉZ L. Alejandro. (2002). *La política medioambiental de la Unión Europea en materia de cambio climático*. Revista Observatorio Medioambiental. Universidad Complutense de Madrid. Vol. 5: 163-191. España.

MINISTERIO DE TRABAJO Y ASUNTOS SOCIALES DE ESPAÑA. (2007). *Fichas internacionales de seguridad química, Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo*. Documento en línea. Consultado el 29/11/2007. Disponible en: [www.instituto-nacional-de-seguridad.es](http://www.instituto-nacional-de-seguridad.es).

MOLINA, D.; C. PINTO; F. RUEDA y J. TORRES. (2002). *Estudio de la mezcla de gasolina con 10% de etanol anhídrido. Evaluación de propiedades fisicoquímicas*. Ciencia, tecnología y futuro. Diciembre, Vol. 2, número 3. Colombia. pp. 71-82.

MONSALVE, John; Victoria MEDINA y Ángela RUÍZ. (2006). *Producción de etanol a partir de la cáscara de Banano y de almidón de Yuca*. Revista Dyna. Universidad Nacional de Colombia. Noviembre, año/vol. 73, número 150. Medellín, Colombia. pp. 21-27.

OCAMPO D. William Andrés. (2006). *¿Es la biogasolina una alternativa ambiental en Colombia?*. Revista de la facultad de Ingeniería. Universidad de Antioquia. Revista N° 38. Colombia.

PÉREZ, Berta C.; Sonia Amparo OSPINA y Rubén Darío GODOY. (2004). *Cultivos de alta densidad celular por retención interna: aplicación a la fermentación continua de etanol*. Revista Colombiana de Biotecnología, Vol. 6, N° 2.

PLÁ DE LA ROSA, Juan Luis. (2001). *El uso racional de la Energía y las Energías Renovables en España: perspectivas de futuro*. Revista Observatorio Medioambiental. Universidad Complutense de Madrid. Número 4, pp. 441-454. España.

POSSO, Fausto. (2002). *Energía y ambiente: pasado, presente y futuro. Parte dos: sistema energético basado en energías alternativas*. Revista Geoenseñanza. Universidad de los Andes, año/vol. 7, número 1-2. pp. 54-73. San Cristóbal, Venezuela.

ROCA, R. Álvaro; Mauricio GARRÓN B. y Pablo CISNEROS G. (2007). *Focalización de los subsidios a los combustibles en América Latina y el Caribe. Análisis y propuesta*. Artículos Técnicos. OLADE (Organización Latinoamericana de Energía). Documento en línea. Disponible en: [www.olade.org/documentos/publicaciones](http://www.olade.org/documentos/publicaciones). Consulta: 16/06/2007.

SÁNCHEZ, Óscar J. y Carlos A. CARDONA. (2005). *Producción biotecnológica de alcohol carburante I: obtención a partir de diferentes materias primas*. Revista Interciencia. Noviembre, año/vol. 30, número 011. Caracas, Venezuela. pp. 671-678.

SCHOIJET, Mauricio. (2002). *Historia de la Energía*. Revista Elementos: Ciencia y Cultura. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Marzo-Mayo, año/vol. 9, número 045. Puebla, México. pp. 51-57.

VÁZQUEZ, H.J. y O. DACOSTA. (2007). *Fermentación alcohólica: una opción para la producción de energía renovable a partir de desechos agrícolas*. Revista Ingeniería. Investigación y Tecnología. Universidad Nacional Autónoma de México. Octubre-Diciembre, año/vol. VIII, número 004. Distrito Federal, México. pp. 249-259.

WISEMAN, Alan. (1986). *Principios de biotecnología*. Editorial Acribia, S.A. Zaragoza- España.

## ANEXOS

### GUIA DE OPERACIÓN Y MATENIMIENTO DEL FERMENTADOR ANAERÓBICO PARA LA OBTENCIÓN DE ETANOL, A ESCALA DE LABORATORIO

#### **Materiales para el ensayo de fermentación alcohólica**

Para la realización del ensayo de fermentación alcohólica es necesario contar con los siguientes materiales:

- ✓ 0,45 kilogramos de sacarosa (azúcar comercial)
- ✓ 0,45 kilogramos de panela o papelón de caña de azúcar
- ✓ 0,009 metros cúbicos de agua destilada
- ✓ 0,054 kilogramos de levadura comercial (*Saccharomyces cerevisiae*)
- ✓ Jabón o detergente

#### **Manual para la operación del equipo**

La puesta en marcha del equipo de fermentación alcohólica; se requiere de la realización de los siguientes pasos:

- ✓ Una vez limpio y seco, se procede a colocar el reactor en su lugar respectivo en la banca de soporte de los elementos del equipo de fermentación. Para realizar el ensayo de fermentación alcohólica añadir al bioreactor 0,009 m<sup>3</sup> de agua destilada; 0,9 kg de azúcar (dividida ésta en 0,45 kg de sacarosa y 0,45 kilogramos de panela de caña de azúcar). Posterior al agregado del azúcar al agua destilada; diluir dicha azúcar mediante la agitación de la mezcla y calentando el sustrato en la estufa.



- ✓ Diluida el azúcar en el agua destilada; se coloca la tapa al fermentador y se cierra éste. Se calienta la mezcla hasta alcanzar la temperatura de 373,15 °K con el fin de esterilizar la mezcla y el fermentador, para evitar posible contaminación por microorganismos; presentes tanto en la mezcla, como en el reactor.
  
- ✓ Concluida la esterilización, se ubica el bioreactor en su sitio respectivo en la banca de soporte y se procede a refrigerar el fermentador mediante el sistema de refrigeración/calefacción; en este caso es necesario acoplar al reactor, las mangueras respectivas para tal fin. La refrigeración se realiza hasta alcanzar una temperatura alrededor de los 303,15 °K (temperatura idónea para las levaduras). Seguidamente se destapa el bioreactor y se inocula el medio con 0,054 Kg de levadura comercial de la especie *Saccharomyces cerevisiae*; se agita la mezcla para distribuir uniformemente las levaduras en el sustrato y se cierra nuevamente el bioreactor para conservar las condiciones de anaerobiosis inherentes al proceso de fermentación alcohólica; solo dejando el orificio central, como único mecanismo para la salida de los gases (CO<sub>2</sub> principalmente), producidos durante dicho proceso.
  
- ✓ Durante los 3 días que dura el proceso de fermentación, es necesario monitorear la temperatura del sustrato en el bioreactor (al menos de 3 veces durante el día). Es necesario colocarle al fermentador todos los

elementos (manta térmica, etc.), para su aislamiento térmico durante las noches, ya que disminuye un poco la temperatura ambiental. Durante el día la temperatura del ambiente es idónea, por lo cual no es necesario colocarle al fermentador los elementos de aislamiento térmico.

- ✓ Finalizado el proceso de fermentación (el olor característico del etanol es un indicador de que ha cesado el proceso), se pasa de manera inmediata a la etapa de destilación del etanol. Se utiliza entonces la metodología de destilaciones en serie o destilaciones sucesivas. En primer término, se abre el reactor y se agita la mezcla para homogenizar el etanol en la solución. Se divide entonces la mezcla a destilar en dos partes iguales de  $0,0045 \text{ m}^3$  cada una. Posteriormente se coloca la primera parte de la mezcla que se va destilar en el fermentador; se cierra éste y se coloca la respectiva manguera para la conducción del etanol hidratado desde el reactor hasta el condensador. Se coloca la manguera de salida del agua de refrigeración del condensador en el drenaje y se abre la respectiva válvula del sistema de distribución de agua, para la circulación del agua de refrigeración al condensador. Luego se coloca el fermentador sobre la estufa eléctrica, calentándolo hasta lograr la evaporación de los compuestos volátiles presentes en la mezcla (entre los cuales está el etanol hidratado). Simultáneamente con la evaporación del etanol hidratado se produce la condensación del mismo. Para la recolección de éste se debe colocar el recipiente destinado para tal fin en la manguera de salida del etanol

hidratado en fase líquida. Se da por finalizada la destilación cuando ocurre una disminución importante del caudal de etanol hidratado que circula por el sistema, aunado a un aumento de la temperatura de los compuestos volátiles. Todo esto se da aproximadamente cuando el volumen de etanol hidratado en el recipiente alcanza alrededor de los 0,0010 m<sup>3</sup>.

- ✓ Este mismo procedimiento de destilación se repite para la otra mitad de la mezcla fermentada. Y finalmente el total de ésta primera destilación (0,002 m<sup>3</sup>) se redestila para aumentar la concentración del etanol en la solución, utilizando el procedimiento de destilación anteriormente descrito. La redestilación debe darse por concluida cuando se alcanza un volumen aproximado de 0,0005 m<sup>3</sup> de etanol hidratado recolectado.

### **Manual para el mantenimiento del equipo**

El mantenimiento adecuado del equipo debe cumplir con los siguientes requisitos:

- ✓ Antes de cualquier acción lavar bien con agua y jabón el fermentador propiamente dicho (incluyendo la tapa del bioreactor y su respectivo serpentín de tubería de cobre) y el envase destinado a la recolección del etanol. Luego secar bien todas las partes que fueron sometidas a limpieza.
- ✓ Una vez finalizado el ensayo de fermentación alcohólica, se lavan con agua y jabón todos y cada uno de los implementos y elementos del equipo

utilizados en el desarrollo del ensayo, y se colocan adecuadamente en sus lugares respectivos en la banca de soporte de dichos elementos.