

Diseño de un fotobiorreactor *Airlift* a escala banco

Diego Rubio Fernández^{*}, Jennifer Alexandra Sierra Herrera^{**}, Steven Ruiz Fonseca^{***}, Juan Andrés Sandoval Herrera[†]

Grupo de investigación BIOTECFUA

FECHA DE ENTREGA: 1 DE NOVIEMBRE DE 2013

FECHA DE EVALUACIÓN: 20 DE ENERO DE 2014

FECHA DE APROBACIÓN: 28 DE MARZO DE 2014

Resumen En este trabajo se evaluó un Fotobiorreactor tipo *Airlift* (FBR) a escala banco para el cultivo y generación de biomasa microalgal. El proceso de evaluación se desarrolló en diferentes etapas desde el análisis de variables de diseño, selección de materiales, ensamblaje del equipo y pre-experimentación.

El equipo comprende cuatro subsistemas: presión, temperatura, agitación y lumínico; cada uno de estos es descrito de acuerdo con los parámetros relevantes que garantizan el adecuado diseño teórico de los mismos. El funcionamiento del equipo fue verificado lo que permitió la determinación de las condiciones y rangos de operación básica del fotobiorreactor.

Abstract This paper evaluates a bench-scale airlift photobioreactor (PBR) for the culture and generation of microalgal biomass. The evaluation process was developed in different stages from the analysis of design variables, selection of materials, equipment assembly, and pre-experimentation. The equipment has four sub-systems: pressure, temperature, mixing, and light. Each one of those is described according to the relevant parameters that guarantee their adequate theoretical design. The functioning of the equipment was verified and this allowed us to determine the conditions and ranges of the photobioreactor basic operation.

Palabras Clave: fotobiorreactor *Airlift*, biomasa, microalgas.

Keywords: Airlift photobioreactor, biomass, microalgae.

^{*} Biólogo. MsC en Ciencias Biología, Universidad Nacional de Colombia. Docente Investigador Tiempo Completo Grupo BIOTECFUA, Universidad de América Bogotá, Colombia. diego.rubio@profesores.uamerica.edu.co

^{**} Ingeniero Químico. Programa de ingeniería química, facultad de ingenierías. Universidad de América, Bogotá, Cundinamarca, Colombia. electronico:ingjash@gmail.com

^{***} Ingeniero Químico. Programa de ingeniería química, Facultad de Ingenierías. Universidad de América, Bogotá, Cundinamarca. Colombia. steven90rf@hotmail.com

[†] Ingeniero Químico. Master en Formulación y Tecnología del Producto, Universidad Internacional de Andalucía, España. Docente universidad de América. Co-director del proyecto. juan.sandoval@profesores.uamerica.edu.co

1. Introducción

El concepto fundamental de fotobiorreactor se centra en equipos que permiten cultivos libres de contaminación y con la capacidad de proveer las condiciones básicas ideales para microorganismos fotótrofos como microalgas (Molina et al, 1999;). Al contextualizar la definición en aspectos más técnicos, se pueden definir los fotobiorreactores (FBR) como contenedores o recipientes transparentes que tienen como ventajas operativas la capacidad de monitoreo de las condiciones de los cultivos y en algunos casos el control riguroso de las variables que intervienen en el proceso de producción, la disminución de la probabilidad de contaminación de los cultivos, el potencial de uso en procesos ambientales como la filtración de aguas, la captura de CO_2 , acoplados con la obtención de biomasa y de compuestos de alto interés industrial [5,14,30].

El conocimiento actual a nivel de fotobiorreactores es extenso, generado a partir de problemas cada vez más particulares y específicos como la aplicación de dinámica de fluidos al diseño de fotobiorreactores [18], la captura de CO_2 y el tratamiento de aguas acoplada al escalamiento de biorrefinerías, aplicación de dinámica de fluidos computacional para definir las condiciones de iluminación de la biomasa, transferencia de CO_2 a la biomasa, la transferencia de luz, la interacción entre modelos fotosintéticos y procesos de producción de biomasa, entre otros.

Sin embargo, las aplicaciones de cultivo en fotobiorreactor a nivel industrial es decir, en biorrefinerías, son aún limitadas debido principalmente a los costos operativos de los procesos que en muchas oportunidades no pueden competir con otro tipo de cultivos como el de la palma de aceite, ni con el precio del petróleo en caso de aplicaciones de biocombustibles [22]. El diseño de fotobiorreactores implica la aplicación de conceptos biológicos [22] y su interacción desde el punto de vista de diseño e ingeniería.

Estos fundamentos teóricos se tuvieron en cuenta para desarrollar un proceso de diseño y puesta en marcha de un FBR a escala banco. Se inicia con la identificación de los tipos, las configuraciones, los parámetros y variables que afectan el funcionamiento del FBR. Seguido de la selección de los materiales para su construcción, ensamble y ajuste de las condiciones de operación del mismo, analizado a partir de principios teóricos.

2. Materiales y métodos

2.1. Selección del material de los tubos concéntricos

En general los fotobiorreactores se fabrican en materiales de construcción que cumplan con características de alta transparencia, flexibilidad, durabilidad, toxicidad nula, resistencia a productos químicos, resistencia a la intemperie y bajo costo (Tabla 1); así mismo, que presenten otra serie de propiedades físicas, mecánicas, químicas y térmicas [2,29].

En el presente trabajo se compararon cualitativamente tres materiales para la construcción del equipo: el acrílico, el polietileno y el vidrio flotado con base

en las principales propiedades de cada material (cuadro 1) los cuales fueron seleccionados por el efecto sobre el medio de cultivo y el crecimiento de biomasa: el calor específico, la conductividad térmica, transmisión de luz, la energía retenida en las paredes del material.

Propiedad	Valor (1 a 5)	Acrílico rígido [26]	Polietileno alta densidad [27]	Vidrio flotado [28]
Calor específico (J/kg K)	2	1465	2936,7	750
Conductividad térmica (W/m K)	3	0,18	0,29	1
Transmisión de luz (%)	5	92	80	90
Densidad (kg/m^3)	3	1180	[945 a 960]	2500
Energía Retenida (MJ kg m^{-1})	3	13,5	72,8	15,9

Cuadro 1. Propiedades de los materiales de construcción.

2.2. Diseño base y dimensionamiento del fotobiorreactor

El diseño base de fotobiorreactores hace referencia a su configuración geométrica [5]. Desde este punto de vista las configuraciones son básicamente en forma rectangular o de panel plano y en forma de cilindro o reactores tubulares, buscando una relación adecuada superficie-volumen que permita maximizar el paso de luz en el espacio del fotobiorreactor.

Los reactores tipo *Airlift* son una variación de los reactores tubulares. La principal diferencia entre los reactores *Airlift* y las columnas de burbujeo radica en el tipo de flujo del fluido o mezcla gas-líquido. En la columna de burbujeo o en el FBR tubular, no se controla el patrón generado por la interacción entre el gas y el líquido. Por el contrario, en los reactores tipo *Airlift* (ARL), diseño que cuenta con dos tubos concéntricos, el cilindro interior *riser* permite canalizar el flujo de aire y por lo tanto de la mezcla gas-líquido, generándose flujo ascendente.. El cilindro externo *downcomer*, genera un espacio para el flujo descendente del líquido posterior a su desgasificación. En otras palabras, los procesos de transferencia de luz y transferencia de masa se dan de forma separada en el FBR-ARL.

Así mismo, este tipo de diseño tiene una influencia significativa en la dinámica de fluidos del reactor y por lo tanto en el rendimiento y la productividad de biomasa [18]; y al ser sus patrones hidrodinámicos más definibles, se hace posible desarrollar modelos predictivos con una buena confiabilidad. Por tal motivo, en este caso de estudio se seleccionó el diseño de un fotobiorreactor *Airlift* (FBR-ARL), con configuración de tubos.

Para las consideraciones de diseño del FBR-ARL se emplearon ecuaciones que permitieron el dimensionamiento del equipo especificando el diámetro del *riser* y *downcomer*, el volumen y altura total, así como el volumen y la altura de operación. Por lo tanto el procedimiento de cálculo se inició estableciendo como consideración inicial el diámetro del *riser* (D_r), teniendo en cuenta la viabilidad de manipulación y la disponibilidad del material en el mercado con las medidas requeridas.

La adecuada selección del diámetro del *riser*, tiene un efecto significativo en las medidas del diámetro y altura del *downcomer*, puesto que el aumento o la disminución de estas influyen directamente en la distribución de luz dentro del FBR-ARL, los fenómenos de transferencia y la productividad volumétrica del FBR. Las siguientes consideraciones son la evidencia física de dicha influencia: si existe aumento, se pueden presentar sucesos tales como: aumento en las zonas oscuras, mala distribución de aire dentro del área de transferencia; debido a que la mayoría de gas permanece mayor tiempo en el canal de ascenso aumentando su acumulación en la parte superior y por ende, la formación excesiva de espuma. Por el contrario, si se presenta disminución, conllevaría la aparición de la fotoinhibición por aumento en la intensidad lumínica, la generación de una acelerada distribución de gases a lo largo del canal de descenso, lo cual puede llegar a producir turbulencias, y en general, afectaría el crecimiento microalgal dentro del equipo.

Las ecuaciones de dimensionamiento [12] permiten relacionar las medidas básicas del FBR-ARL. Para el cálculo del diámetro del *downcomer* [ecuación (1)] se despeja D_d tomando el límite superior del rango (0.6) como valor de referencia con el fin de obtener el valor máximo de dicho diámetro.

$$D_r = [0.3 \text{ a } 0.6]D_d \quad (1)$$

La altura total del equipo (H) (ecuación (2)) también relaciona el límite mayor de dicho rango.

$$H = [3 \text{ a } 6]D_d \quad (2)$$

A partir de la relación de diámetros se calcula el volumen total del *downcomer* (V_{Td}) (ecuación (3)) la cual se expresa en función del diámetro teniendo en cuenta que el volumen de un cilindro se expresa en función del área (A_{base}) y la altura (H), donde $A_{base} = \frac{\pi}{4}D_d^2$. Organizando algebraicamente se obtiene:

$$V_{Td} = \frac{\pi H D_d^2}{4} \quad (3)$$

El volumen del equipo se determina por la suma del volumen total del *downcomer* (V_{Td}) y las tapas del equipo (V_t). El volumen de las tapas se calcula teniendo en cuenta su geometría y posición en el FBR a través de la ecuación (4).

$$V_T = V_{Td} + V_t \quad (4)$$

Para este caso el valor (V_t) equivale a cero ya que no genera cambios al volumen interno del FBR-ARL, porque se encuentran superpuestas a la parte

superior del *downcomer*; el cálculo del volumen de operación (V_{op}) se realizó mediante la ecuación (5). Se asume el punto medio del intervalo (0,8).

$$V_{op} \approx [0.7 \text{ a } 0.9]V_T \quad (5)$$

También se realizó el cálculo de la relación de áreas de transferencia, y la relación de área superficie en el reactor con las ecuaciones (6) y (7), pues éstas influyen directamente en el crecimiento de biomasa y en la productividad volumétrica del FBR, donde rd es el radio de *downcomer*, A_T área total y V_T volumen total.

$$\frac{A_r}{A_d} = \frac{\frac{\pi D_r^2}{4}}{\frac{\pi D_d^2}{4}} \quad (6)$$

$$\frac{A_T}{V_T} = \frac{2 \cdot \pi \cdot rd \cdot (H + rd)}{H + \frac{\pi D_d^2}{4}} \quad (7)$$

2.3. Sistemas del fotobiorreactor (FBR)

Para maximizar las condiciones de producción de biomasa se tuvo en cuenta la implementación de cuatro sistemas de monitoreo de las variables de proceso principales: sistema de agitación, de iluminación, sistemas de control de presión y temperatura.

Sistema de agitación. El análisis de este sistema implica la selección de los elementos que permitieron la distribución de aire del FBR. Estos fueron el tipo de compresor, el tipo de difusor, la potencia mínima requerida por el compresor, el caudal mínimo de entrada y de mezclado que se interrelacionan con el difusor. A continuación se presentan las Ecuaciones (8) y (9) empleadas para definir la potencia volumétrica $\frac{P}{V}$ del compresor la cual representa la energía necesaria que ejerce el caudal suministrado para la agitación dentro del equipo, la potencia volumétrica se relaciona directamente con la potencia por unidad de tiempo (P), pues la variación en la velocidad de flujo del fluido produce un cambio en la fuerza motriz del compresor. Se calcula de acuerdo con el procedimiento propuesto por Kochem (2010):

$$\frac{P}{V} = \frac{\rho g V_g}{1 + \frac{A_d}{A_r}} \quad (8)$$

Donde, $\frac{P}{V}$ es la potencia requerida por metro cubico (W/m^3), ρ es la densidad del agua (kg/m^3), g es la gravedad (m/s^2), A_d y A_r son las áreas del *downcomer* y del *riser*, respectivamente, en m^2 y V_g es la velocidad superficial del gas (m/s). Basándose en el área superficial del reactor, este V_g se calcula con la ecuación (9) donde Q es el caudal de aire en (m^3/s), p es la presión del compresor en (bar) y P es la potencia del equipo en (kilowatts).

$$V_g = \frac{Q}{A_d + A_r} \quad (9)$$

$$Q = \frac{P \cdot 600}{p} \quad (10)$$

El dimensionamiento del difusor involucró el análisis de la geometría del mismo, escogiendo la de tipo disco gracias a las ventajas que éste presenta en el acoplamiento con la estructura del equipo, así como también su relación con el cálculo del caudal de entrada, de mezclado y con el número de orificios.

El método utilizado para el cálculo del número de orificios aproximado se realizó fijando como primer parámetro la relación de diámetros, seguido del despeje del factor de corrección, de acuerdo con las ecuaciones de [8] entonces:

$$\frac{d}{D} = \frac{\text{diámetro}}{D} \quad (11)$$

Donde: d es el diámetro del orificio (m) y D es el diámetro de la tubería en (m). Para el cálculo de la caída de presión y el factor de corrección, se tiene en cuenta que estos dependen de la altura y diámetros del reactor. Haciendo uso de diversas analogías y resultados de investigaciones anteriores el autor describe las ecuaciones (12) y (13):

$$\Delta P(\text{difusor}) = 0.01 + 0.2 \left(1 - e^{\left(\frac{-d}{2H}\right)}\right) \quad (12)$$

Donde: d , diámetro de la tubería (m), H , altura de reactor (m), ΔP cambio de presión. La ecuación (13) la obtuvo el autor luego de analizar el comportamiento del factor de correlación con el cambio del número de Reynolds y permite el ajuste del factor de corrección, a través de:

$$Cd_{or} = 0.82 \left(\frac{t}{d}\right)^{0.12} = 0.82 \left(\frac{d}{D}\right)^{0.12} \quad (13)$$

Donde: Cd_{or} es el factor de descarga en el orificio y $\frac{t}{d}$, es la relación entre el espesor y diámetro de orificios en el difusor. Y por expresar una pérdida en la presión del equipo se puede relacionar también con la relación de diámetros del mismo.

Para el cálculo del caudal inicial tentativo del orificio, teniendo en cuenta la similitud con el medidor de flujo de placa de orificio y las siguientes consideraciones según [10]:

- La similitud que tiene con una placa de orificio en cuanto a la distribución del fluido, ya que este permite una contracción rápida y repentina en áreas cercanas al orificio y una inmediata expansión a lo largo del tubo luego de regresar a el diámetro mayor de este.
- Las caídas de presión son similares en las alcanzadas por otras geometrías de medición de flujo variable. Sin embargo, una ventaja importante en esta tipología hace referencia al factor de descarga del medidor, el cual es “menor

que en los medidores de tubo Venturi o en boquillas” y, como consecuencia, las caídas de presión también lo son.

El procedimiento de cálculo se realizó por medio del despeje de las ecuaciones (14) y (15).

$$Q_o = C_d A_o \sqrt{\frac{2g\Delta P}{\left(1 - \frac{A_o}{A_t}\right)^2}} \quad (14)$$

Donde: Q_o , caudal inicial del orificio. C_d , coeficiente de descarga. A_o , área del orificio. A_t , área de la tubería. ΔP , cambio de presión. g gravedad. Conociendo de antemano el caudal de entrada del reactor, se encontró el número de orificios aproximado a través de:

$$N \text{ de orificios} = \frac{Q \text{ compresor}}{Q_o} \quad (15)$$

Se realizó el cálculo del caudal de aire mínimo del compresor, en pies cúbicos por minuto (CFM). Se empleó el *software* libre disponible en la web: “calculadora de LFM a CFM”.

$$CFM = \frac{Ddu \cdot 1.5}{Ddb} \quad (16)$$

Donde: Ddu , es el diámetro del difusor de disco de la unidad de estudio; Ddb , es el diámetro del difusor de disco de la unidad de referencia bibliográfica.

Sistema de presión. La presión se mide a través de un sensor de presión diferencial MPX5700, instalado en la base del reactor, conectado a una electroválvula ON/OFF ubicada en la tapa del reactor. El conjunto de estos instrumentos permite controlar la presión que genera la acumulación de gases dentro del equipo. Dicha presión influye intrínsecamente en la agitación del medio porque puede llegar a ocasionar turbulencia y alterar la cantidad de oxígeno presente en el medio, el cual a su vez afecta la productividad de biomasa según lo expresó [9].

Por tal motivo, los rangos de trabajo deben mantenerse entre los 0 y 200 kPa manométricos. Sin embargo, para un funcionamiento correcto se deben consolidar teóricamente los valores mínimos de trabajo, a través del cálculo previo de la presión total del equipo apoyado en el análisis estadístico de los datos generados por el sistema de control. Se analizó la mecánica de fluidos básica del equipo, específicamente las pérdidas mayores y menores ocasionadas por los elementos del sistema de agitación. Así, la presión de salida del reactor está dada por:

$$P_f = H_{\text{recipiente}} \cdot \gamma_{H_2O} + H_{L\text{totales}} + \Delta P(\text{difusor}) \quad (17)$$

La presión inicial corresponde a la presión de la columna del líquido y se puede expresar a partir de la ecuación fundamental de la hidrostática:

$$P_o = H_{\text{recipiente}} \cdot \gamma_{H_2O} \quad (18)$$

Donde, $H_{\text{recipiente}}$ es la altura del recipiente y γ_{H_2O} es el peso específico del agua. La ecuación (19) se usó para calcular la sumatoria de las pérdidas de energía mayores debidas a la fricción del fluido en la longitud de la tubería tanto en el *riser* como en el *downcomer*:

$$H_L = \frac{L_r}{D_r} \cdot \frac{V_g^2}{2g} \cdot f_r + \frac{L_d}{D_d} \cdot \frac{V_g^2}{2g} \cdot f_d \quad (19)$$

Donde: L , longitud de la tubería, D , diámetro interno de la tubería riser o downcomer. V_g velocidad fluido en (m/s) hallada en apartado anterior, f factor de fricción, (adimensional). El f , se halla por medio del diagrama de Moody calculando previamente el Reynolds para cada caso, por medio de la ecuación (20), teniendo en cuenta que la tubería es de plástico (lisa) y usando los valores de las propiedades del aire a 25 °C, tomadas del libro de Mecánica de Fluidos [10]. En este caso, el Reynolds para el aire es:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (20)$$

Donde: d diámetro del orificio en (m), v velocidad del fluido gaseoso en (m/s), ρ densidad del aire en (kg/m³) y μ la viscosidad absoluta en (Pa·s). Las propiedades para la ecuación corresponden a $\rho = 1.184$ kg/m³ y $\mu = 1.55 \times 10^{-8}$ Pa·s.

Sistema de temperatura. El conjunto de este sistema se compone de dos sensores de temperatura “ML35” y un termostato. Para su funcionamiento se decide mantener por medio de la programación de un sistema de control cerrado un rango de trabajo entre 0 a 35 °C, porque dentro de este rango de temperaturas la microalga *Chlorella vulgaris* presenta crecimiento, según [1]. Sin embargo, según [6] para mejorar su productividad debe procurarse un rango de 18 °C a 27 °C.

Para la identificación del rango de temperatura para la puesta en marcha del fotobiorreactor se realizó un análisis estadístico descriptivo hallando la desviación estándar de cada uno de los datos registrados e identificando el intervalo de menor valor, el cual constituye el rango confiable de operación.

Sistema de iluminación. Para la escogencia de la fuente se tomaron como parámetros de selección las siguientes variables: eficiencia en procesos biológicos, vida útil y costo. Se usaron estas variables, por el efecto que tienen sobre el FBR. La eficiencia en procesos biológicos, fue seleccionada por el alcance que tienen las longitudes de onda de la fuente lumínica en el crecimiento microalgal. La vida útil, porque reduce los costos de mantenimiento del sistema lumínico y el costo por el valor final de construcción del FBR. La ecuación (21) facilita el cálculo de la potencia según [3]:

$$PI = \frac{\text{potencia}}{\text{volumen de operación}} \quad (21)$$

Donde: PI es la potencia lumínica; es la potencia requerida en el volumen del reactor. Las ecuaciones (22), (23) y (24) tomadas de DCM Systems, permitieron calcular de manera aproximada la intensidad lumínica, la iluminancia máxima y el rendimiento lumínico respectivamente:

$$\frac{F}{W} = I \quad (22)$$

Donde: F , flujo luminoso en lúmenes (lm), W , potencia de la fuente lumínica en vatios (W), I , intensidad lumínica en (W/m²).

$$\frac{F}{S} = E \quad (23)$$

Donde: F , flujo lumínico en lúmenes (lm); S , superficie expuesta a iluminación (m²); E , iluminancia máxima por cada cinta. El rendimiento lumínico se calculó con:

$$\frac{F}{W} = \eta \quad (24)$$

Donde: F , flujo luminoso en lúmenes (lm); W , potencia de iluminación de cada led (W), η , rendimiento por cinta en porcentaje (%). El rendimiento lumínico encontrado, hace referencia a la relación entre el flujo lumínico producido y la potencia eléctrica consumida. Los cálculos de la densidad de fotones se realizaron por medio del programa libre en línea de conversión de radiación lumínica, disponible en http://www.egc.com/useful_info_lighting.php.

2.4. Monitoreo y control de variables

Se emplearon tres lazos de control básicos que contemplan las variables de temperatura, iluminación y presión. Para la temperatura y presión se trabajaron lazos de control cerrado, en los que se crea una secuencia que permite establecer un ciclo de información para la retroalimentación de la señal para interpretarla, procesarla, compararla y corregirla. Como consecuencia, se produce el control automático de cada una de las variables. Para la iluminación artificial, el lazo de control cambió de configuración a lazo de control abierto, cuyo funcionamiento es similar al anteriormente descrito, pero con la diferencia de que la acción correctiva se realiza con la intervención humana, pues, el sistema cuenta con un indicador visual (alarma) que permite monitorear el comportamiento de la variable.

Dicho control se logra a través de la programación del controlador, responsable de realizar el acondicionamiento de las señales de entrada para compararlas con las condiciones y características preestablecidas por el programador, y posteriormente actualizar las salidas que pueden ejecutar las acciones correctivas. También incluyó el acople con un módulo de comunicación que permite la transmisión y visualización de datos cuando se establece la conexión equipo - computador, mediante un conector URS-32. La transmisión y visualización de los datos, se genera en una interfaz gráfica montada en el programa LabView.

3. Resultados y análisis de resultados

3.1. Diseño del fotobiorreactor

Estructura del fotobiorreactor. Se escogió el acrílico rígido y liso, con espesor de 2 mm como material de construcción. La estructura base del equipo, compuesta por tres partes principales, riser, downcomer y un tercer cilindro que se agrega con el fin de aumentar la resistencia mecánica del equipo, aumentar la protección a la contaminación y facilitar una mejor distribución lumínica. Conociendo los parámetros de diseño a definir y las ecuaciones (1), (2), (3), (4) y (5), se obtuvieron las siguientes del cuadro 2.

Parámetro	Unidad	Descripción	Resultado
V_T	L	Volumen total	7
V_c	L	Volumen cilindro	7
D_d	cm	Diámetro <i>downcomer</i>	11,4
D_r	cm	Diámetro <i>riser</i>	7,3
H	cm	Altura	70
V_{op}	cm ³	Volumen de operación	5600
H_{op}	cm	Altura de operación	54,7

Cuadro 2. Variables de dimensionamiento.

Relación de área de transferencia de masa y relación área - volumen o (área superficie). Establecidas las dimensiones generales del equipo en las unidades requeridas se realizó el cálculo de dicha relación a partir de las ecuaciones (6) y (7) dando como resultado un valor de 0,411 y como resultado de la relación área - volumen un valor $0,999 \approx 1$.

3.2. Sistemas del fotobiorreactor

Los resultados obtenidos para el sistema de agitación se describen a partir de las características a calcular en cada uno de los instrumentos que lo integran y se relacionan con los rangos obtenidos para el sistema de presión como se encuentra a continuación.

Compresor y presión del sistema. Para establecer los rangos de trabajo de la presión, y potencia del compresor se tuvieron en cuenta las características técnicas del equipo y del compresor entre las que se encuentran: los diámetros, el amperaje de 10 A, voltaje 12 V y potencia teórica de 120 W, las cuales al ser reemplazadas en las ecuaciones (8) a (20), arrojan los resultados presentados en el cuadro 3.

Característica	Unidad	Resultado
Rangos de presión mínimos de trabajo		
Presión inicial del sistema (p_o)	kPa	6,86
Perdidas mayores (H_L)	kPa	0,0070
ΔP (difusor)	kPa	2,05
Rango de Presión del sistema calculada (P_f)	kPa	2.064 a 6.885
Potencia de trabajo		
Caudal teórico calculado	m ³ /s	5.8×10^{-5}
Velocidad del gas	m/s	1.318×10^{-4}
Potencia volumétrica	W/m ³	4.95×10^{-4}

Cuadro 3. Presión y cálculos del compresor.

en cuenta la consideración de geometrías tubulares, donde un tubo contiene el líquido y otro el flujo de gas; además, se especificaron como condiciones iniciales los diámetros del *riser* y del *downcomer*, correspondientes a los valores de 0,109 m y 0,076 cm respectivamente y un flujo de entrada al compresor de 1,50 m/s. Con estos datos se obtuvo un caudal de entrada de 0,012 m³/s. También, con el fin de asegurar que la cantidad de aire en el sistema fuera la correcta, se realizó el cálculo del caudal en un punto intermedio donde el aire hace contacto con el difusor para homogenizar el flujo, especificando en el simulador la altura del difusor de 0,05 m y el diámetro de cada orificio igual a 0,003 m para obtener un caudal de mezcla, en ese punto intermedio, de $2,02 \times 10^{-4}$ m³/s.

Conociendo los resultados teóricos de los caudales se calculó el número de orificios aproximados ajustando mediante una función objetivo el diámetro exacto de los orificios y reemplazando los valores en las ecuaciones (21) a (24) se obtuvieron los resultados mostrados en el cuadro 4:

Parámetro	Unidad	Descripción	Resultado
ΔP	kPa	Delta de presión	2,05
Cd_{or}	adimensional	Coficiente de descarga	0,11
Q_o	m ³ /s	Caudal del orificio	5
N_o	adimensional	Numero de orificios	99,99

Cuadro 4. Resultados cálculo de orificios.

Iluminación. Se seleccionaron las tiras de led como fuente luminosa. En el cuadro 5 se resumen los resultados del análisis de los conceptos de iluminación. Esto se realizó teniendo en cuenta el efecto de la irradiación e iluminancia máxima, así como también el requerimiento cuántico (fotones), parámetros que describen la intensidad lumínica y la cuantificación de la cantidad de luz emitida y absorbida por el cultivo; determinando de esta manera la cantidad de energía útil que hace referencia a la energía capaz de inducir el proceso fotosintético.

Unidades	Valor	Resultado
W/m ² a fotones	3,02	14496
Fotones a lux	14496	478368
Fotones a lux	57984	1993,72
Lux a fotones	1445,45	4336,4

Cuadro 5. Variables analíticas de fotones.

3.3. Condiciones de operación

Sistemas de control y transmisión de datos. El sistema de control está diseñado para permitir la transmisión de los datos registrados por este y su posterior visualización en un ordenador de forma gráfica para observar en tiempo real el comportamiento de las variables y la desviación presentada con relación al punto de referencia o *set point*. Las variables en las figuras 3, 4 y 5 se identifican con la línea inferior roja y el punto de referencia con la línea superior amarilla.

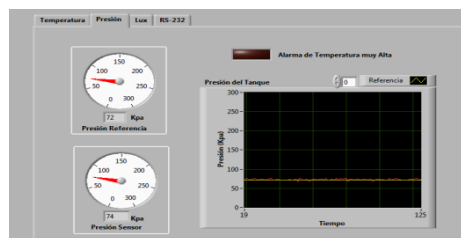


Figura 3. Presión.

Ajuste de rangos de operación. Se realizó interpretando los comportamientos de las variables gráficamente, como se muestra en las figuras 6, 7, 8 y 9 en las

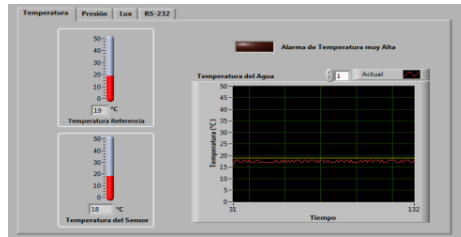


Figura 4. Temperatura.

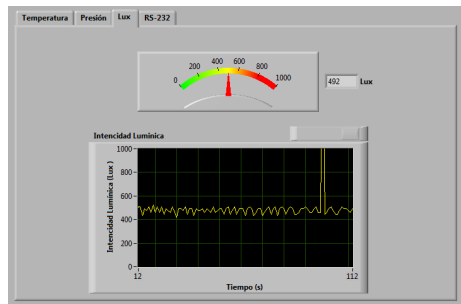


Figura 5. Intensidad lumínica.

cuales se ilustran comportamientos de la temperatura y la presión comparadas con el control, junto con el registro de los datos a lo largo del tiempo de operación del FBR. Después, se registraron los datos del sistema de estudio en funcionamiento, tomando para cada uno la medida de desviación estándar, con el fin de obtener los datos con menor valor.

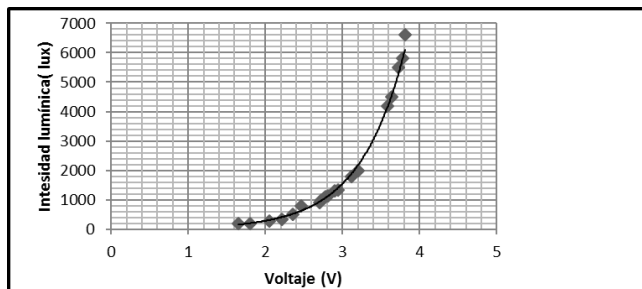


Figura 6. Curva de comportamiento de intensidad lumínica.

Como lo indica la figura 6 el comportamiento de la intensidad lumínica es exponencial, y cubre el rango de trabajo de los [0- 6000 lux]. Para la interpretación adecuada por parte de los instrumentos de medición fue necesario realizar un ajuste lineal del comportamiento entre [0-2000 lux] [1], como se ve en la figura 7.

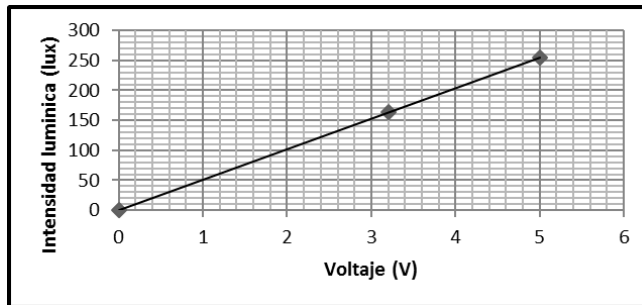


Figura 7. Ajuste lineal de la intensidad lumínica.

Conociendo el rango de trabajo se extrapolaron los datos y se calcularon los resultados de la desviación estándar. Con base en esto, se identificó el intervalo de menor valor correspondiente a [0,68 a 2,91] y equivalente al rango lumínico de [1300-2000 lux], rango confiable de operación.

El comportamiento de la temperatura y presión es lineal como se observa en las figuras 8 y 8. Para la primera, el rango programado está contemplado entre los [0-50 °C] cubriendo el rango de crecimiento microalgal descrito en la anterior sección, y el de operación está dado por el intervalo de menor valor de desviación, correspondiente a [0,203 a 0,199], equivalente al rango de [18 a 27 °C]. Para la segunda, se estableció un rango continuo entre [0-700 kPa] con un valor de desviación [3,008 a 19,806], el cual cubre la presión de operación entre [0-200 kPa].

3.4. Discusión de resultados

Materiales. La selección de este material tuvo lugar al analizar los criterios de selección descritos en la anterior sección sobre las propiedades de los mismos. Según [16] la densidad del material afecta la resistencia de éste de manera inversamente proporcional; de esta forma, si la densidad aumenta la resistencia del material disminuye y viceversa. A su vez, la resistencia también depende del espesor, es este el que determina el contenido energético que puede retener el material en sus paredes, también conocida como energía retenida de pared. Dicha energía se relaciona simultáneamente con la conductividad térmica del material. Así, entre más delgado sea éste, mayor resistencia, menor la energía retenida y la conductividad térmica, lo cual permite controlar la acumulación de calor por

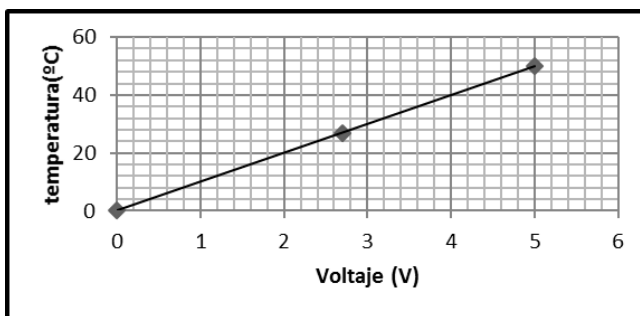


Figura 8. Curva de comportamiento de temperatura.

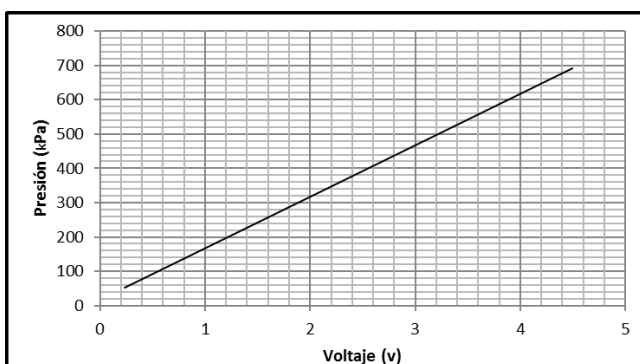


Figura 9. Curva de comportamiento de presión.

conducción del material hacia el cultivo, previniendo un aumento indirecto de la temperatura.

Conocer dicho efecto fue un criterio cualitativo a la hora de seleccionar el material, pues, al comparar los tres materiales anteriormente mencionados en el cuadro 1, se observa que el vidrio flotado posee una mayor densidad comparado con el acrílico y polietileno respectivamente; por tanto, su resistencia al impacto es menor, haciéndolo un material susceptible a la ruptura, a pesar de que posee una energía retenida baja con espesores pequeños.

Contrario a esto, el polietileno y el acrílico rígido tienen densidades más bajas, con mayor resistencia mecánica; sin embargo, la energía retenida por las paredes es variable debido a la facilidad que tienen dichos materiales para ser manejados en diversos espesores adaptados a las condiciones de trabajo del fabricante y diseñador.

Por otro lado, el espesor influye en la transmisión de luz en el material y entre menor sea este mayor es dicha transmisión; con esto se asegura que se suplan las necesidades lumínicas de las microalgas para sobrevivir. Así, una reducción

de ésta última, afecta directamente al crecimiento microalgal y por ende a la producción de biomasa.

Siendo consecuente, puede verse que el acrílico con las características mencionadas en la sección anterior, cumple con los requerimientos porque, a pesar de su costo, posee baja energía retenida, alta resistencia mecánica, baja densidad, amplio tiempo de vida útil en espesores pequeños (aproximadamente tres milímetros), efecto no tóxico sobre el medio de cultivo, buena disponibilidad y aplicabilidad para la construcción de FBRs. Todo esto, hace de éste un material atractivo para la construcción del equipo seleccionado, como también lo habían expresado en [4].

Dimensiones. Se escogieron las combinaciones dispuestas en secciones anteriores porque se ajustan coherentemente a las condiciones adecuadas que se describen a continuación con el fin de mejorar la producción de biomasa.

El diseño adecuado del FBR tuvo en cuenta el efecto de las dimensiones del equipo sobre las condiciones óptimas del medio de cultivo, en especial los diámetros del *riser* y *downcomer* con la relación de área de transferencia, porque a partir de esta relación, se puede dar una buena distribución de aire, permitiendo la producción eficiente de biomasa dentro del fotobiorreactor.

En cuanto a la producción de biomasa tiene una relación inversamente proporcional con estos, así a diámetros menores, mayores cantidades de biomasa, y viceversa. Además, la relación del área debe tener un valor $A_r/A_d \approx 1$. La acumulación de biomasa aumenta a medida que dicho valor se acerca al valor más alto o crítico (VC), en $A_r/A_d = 0.8$, por lo cual el área que mejor se adecua es la presentada por el cuarto diseño, pues su valor de 0.41 se encuentra en un rango promedio menor que el valor crítico. [30]

Otro punto importante del diseño es la altura del *riser* y del *downcomer*, porque afecta las células por la trayectoria de ascenso y descenso; también incide sobre el tiempo de retención en cada una de las zonas del equipo, si las dimensiones son muy altas pueden ocasionar un periodo prolongado en un trayecto oscuro, causando un aumento en el estrés celular por las fuerzas de corte y así, se reduce el crecimiento microalgal. [30].

Sistema de agitación. El compresor, se seleccionó de tipo centrífugo ya que este puede operar a un flujo constante y homogéneo proporcionando caudales bajos en un rango de los límites, donde el caudal de entrada alimentado en el fondo del equipo, debe tomar como mínimo valores dentro del rango de $[5,6 \times 10^{-5}$ a $7,07 \times 10^{-5}]$ m³/s. Para el caudal de mezclado en el difusor los valores de diseño preliminar para un diámetro de 9 pulgadas puede pensarse en el rango $[6,1 \times 10^{-4}$ a $7,07 \times 10^{-4}]$ m³/s. Sin embargo, en el equipo construido este diámetro se tomó como 0,0762 m, con el fin de preservar la relación adecuada entre diámetros y alturas que permite la correcta distribución de aire dentro del FBR, y como consecuencia de esta reducción de dimensiones, el caudal también lo hace de manera proporcional, tomando valores dentro del intervalo $[1,41 \times 10^{-4}$ a $2,3 \times 10^{-4}]$ m³/s.

El ajuste de los caudales en el equipo se logró considerando en primera medida el análisis de la potencia volumétrica requerida por el equipo, que representa una relación entre el caudal real y el caudal teórico o de operación del fluido; esto permite garantizar que la agitación alcanzada en el medio de cultivo es buena causando una mezcla continua. A continuación, se realizó el análisis del difusor tubular en cuanto a número de orificios y el diámetro de estos, y se encontró un valor de aproximado de 100 orificios con un diámetro correspondiente a 3 mm cada uno, ocasionando velocidades y caudales bajos, condiciones que coinciden con lo expresado en [25], donde se describe que “a diámetros mayores a 1 mm se alcanzan velocidades bajas haciendo mayor el flujo de burbujas”.

Sistema de iluminación. La fuente más acertada para cumplir los requerimientos lumínicos de las microalgas son los leds. Gracias a su estructura permiten una mejor intensidad de la luz, a una longitud de onda aproximada de 623 nm. Esta longitud, está incluida dentro del intervalo de longitudes de onda responsables de la excitación de la clorofila de la *Chlorella Vulgaris*: desde 380-400 nm hasta 600-670 nm [14]. Además, los leds poseen una buena durabilidad a través del tiempo.

Los resultados de los parámetros de iluminación obtenidos son adecuados y suplen las necesidades lumínicas necesarias para el crecimiento microalgal, porque proporcionan un buen rendimiento en la conversión de energía lumínica que incide en la fotosíntesis. Se observa que la cantidad de intensidad empleada genera 14,496 fotones, cantidad coherente con lo referenciado en la literatura [13] donde se dice que son necesarios cerca de “16 pares de fotones para suplir las necesidades de luz o requerimiento cuántico que facilitan la reducción de las moléculas de CO₂.”

También, se analizaron los fotones y los luxes totales producidos por todo el sistema de iluminación (cuatro tiras de led), el cual genera 1993,47 lux/m², valor aproximado a los 2000 lux/m², intensidad de luz requerida por la microalga.

Por último, se calculó la iluminancia máxima para encontrar la densidad de fotones requerida, cumpliendo con los requerimientos mínimos teóricos de operación del reactor. Sin embargo, es de resaltar que la recepción de fotones y la densidad de estos es variable de acuerdo con las condiciones ambientales en las cuales se encuentra sometida la microalga, variando entre 10 y 12 fotones, según [3].

Otro punto importante de discusión es la iluminación en el equipo, como se dijo en secciones anteriores dada por un sistema lumínico principal que es la luz natural y un sistema secundario que son las cintas de led. Se tiene en cuenta la luz natural como fuente lumínica principal debido al diseño del FBR, porque fabricado en un material totalmente transparente permite que todo el volumen del equipo este expuesto a la iluminación, y por ende el único factor que influye en la disminución de dicha exposición, es el autosombreo causado por el aumento en la densidad del cultivo y en una menor proporción a la ubicación del FBR.

Sistemas de control y ajustes de operación. De las figuras 3, 4 y 5, se pudo observar que tanto la presión como la temperatura tuvieron un rango de desviación muy pequeño con relación al punto de referencia. El comportamiento de la intensidad lumínica se mantuvo dentro de los rangos especificados. Además, los resultados obtenidos por las figuras 6, 7, 8 y 9 y los valores de las desviaciones indican que las variables se mantuvieron en los niveles adecuados para permitir el crecimiento microalgal. Sin embargo, la presión es la única variable en la que no se especificó un rango de operación fijo, ya que esta está limitada por las condiciones, velocidades, y tiempos de operación a las cuales se generan las reacciones biológicas, estas determinan directamente los niveles de gases dentro del reactor y por ende en la presión generada, conduciendo a que ésta sea inestable aumentando o disminuyendo a lo largo del tiempo.

4. Conclusiones

Las variables principales de diseño analizadas son coherentes con respecto a las bases teóricas con las que fueron comparadas para su elaboración. Igualmente, los sistemas de control implementados en el FBR presentaron un buen funcionamiento, porque facilitaron la estabilización de las variables en el medio de cultivo. Sin embargo, se recomienda ajustar los puntos de comparación en cada intervalo de operación pues, al tratarse de reacciones biológicas estas son únicas de acuerdo a las condiciones fisiológicas de la especie a trabajar.

Agradecimientos

Sinceros agradecimientos a todas las personas y entidades que colaboraron con la realización de este trabajo, que ayudaron a que poco a poco este proyecto se convirtiera en una idea tangible.

Referencias

1. Albalde J.: Microalgas. Cultivo y aplicaciones. Universidad De La Coruña. P. 9. (2003).
2. Ashby, Michael F. & Jones, David.: Materiales para ingeniería. 1. Introducción a las propiedades, las aplicaciones y el diseño. Editorial Reverte. S.A. Barcelona, España. P. 4-13. (2008)
3. Berguillos, Fernando.: Tesis doctoral: cultivo en biorreactores de *rhodospirillumrubrum* en condiciones fotoheterotróficas. Universidad Autónoma de Barcelona. P.296. (2007)
4. Burgess, Greg. Fernandez - Velasco, Javier: Materials, operational energy inputs, and net energy ratio for photobiological hydrogen production. En: International Journal Of Hydrogen Energy. Australia. P.1228. (2007).
5. Carvalho, Ana. Meireles, Luis., Malcata, Xavier: Microalgal reactors: a review of enclosed system designs and performances. En: Biotechnology Review. Portugal. Vol. 22, No. 6 (Jul - Dic. 2006); P.1490. (2006).

6. Converti, Attilio, Casazza, Alessandro A., Ortiz, Erika Y., Perego, Patrizia, Del Borghi, Marco: Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of *nannochloropsis oculata* and *chlorella vulgaris* for biodiesel production. En: Chemical Engineering and Processing. Vol., 48, No. 6 (Jun, 2009); P. 1146-1151. (2009).
7. Coral Contreras- Florez, Julian Mario: Avances en el diseño conceptual para el cultivo de microalgas. Revista Interciencia, Agosto 2003, Vol 28 N 8. (2003).
8. D. Qureshi.: Principios de fluidización: capítulo 3. Ed. Pellgeldart. P.24-25. (2010).
9. Diaz Cortes, Vanessa y Ordoñez Ovalle, Camilo: Evaluación del ph y la agitación del medio adecuado para el crecimiento de *duanadiella salina* en condiciones de laboratorio. Bogotá D.C., 2006. Trabajo de grado para optar al título de microbiólogo industrial. Universidad Pontificia Javeriana. Facultad de Ciencias. Carrera de Microbiología Industrial. P. 26. (2006).
10. Durand, Alejandro: Escalamiento el arte de la ingeniería química: plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina. Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos. Tecnología Ciencia. México, Ed. (IMIQ), 23 (1). P.31-39 (2008).
11. Gases comprimidos, Riesgos. Centro Canadiense de Salud y Seguridad Ocupacional: <http://www.ccsso.ca/oshanswers/chemicals/compressed/compress.html>
12. Huerfano Delgado, David.: Diseño y simulación de un reactor *airlift* para la producción de alcohol etílico con *saccharomyces cerevisiae* utilizando *solanum tuberosum*. Fundación Universidad de América. P. 37 A 42. (2009).
13. Javanmardian and Palsson.: High-density photoautotrophic algal cultures: design, construction, and operation of a novel photobioreactor system. En: Biotechnology And Bioengineering, Vol. 38, No.2
14. Kommareddy, Anil.: Study of light as a parameter in the growth of algae in a photobio reactor (pbr). (034057, 07, And (2003): Las Vegas, USA). En: Asae Meeting Presentation. Annual International Meeting: Riviera Hotel And Convention Center, Nevada: 2003. P.12. (2003).
15. Kochem, Luce Helena: Caracterización de un fotobiorreactor tipo *airlift* para el cultivo de microalgas. Universidad Federal de Rio Grande. Porto Alegre. P. 22. (2010).
16. Márquez, Ronald.: Materiales de ingeniería química. Selección de materiales en plantas químicas y para diseño de productos. Capítulo 10. P.133. (2010) .
17. M.Y Chisti.: Airlift Bioreactor. London: Elsevier. Capitulo 3, P.350. (1989).
18. Merchuk, José.: Bioreactor, Airlift Reactors. En: Encyclopedia Of Bioprocess Technology. 15, Octubre 2012 P. 320
19. Montengro, Luis.: Conferencia: “Microalgas, Cultivo e Industria”. Instituto de Ciencias Naturales de La Universidad Nacional de Colombia (Sede Bogotá). Octubre de 2012. (2012).
20. Mott, Robert.: Mecánica de fluidos. México: Pearson Education, Sexta Edición. 2006. P. 501. (2006).
21. Navegadores de Java Script. Lfm to Cfm calculator. [Aplicación Informática, en línea]. Disponible En Internet: <http://www.csgnetwork.com/lfm2cfmcalc.html>.
22. Posten, Clemens.: Design principles of photo-bioreactors for cultivation of microalgae. En: Engineering In Life Sciences Volumen 9, 3a. Edición, P 165-177. (2009).
23. Such, Soo Y Lee Choun-Gyun.: Photobioreator Engineering: Design And Performance. En: Revista de Biotecnología e Ingeniería de los Bioprocesos, 2008, N8, P 313-321. (2008).
24. Torres, Diana Mireya.: Diseño y simulación de un fotobiorreactor para la producción de hidrógeno a escala piloto. Trabajo de Grado Ingeniero Químico. Bogotá D.C.

- Fundación Universidad de América. Facultad de Ingenierías. Programa de Ingeniería Química. 2005. 121p. (2005).
25. Y. T. Shah, B. G. Kelkar.: Journal Review. Design parameters estimations for burble, column reactors. University Of Plynrburgh. Vol. 28, No 3.(May, 1982); P. 355. (1982) .
 26. Acrílicos Norglas. [en línea]. [Uruguay]. Disponible en http://www.norglas.cl/catalogo/productos_detalle.php?codigo=530. [citado 8 Noviembre 2012]
 27. Anónimo. Propiedades del polietileno; [en línea]. 25 Agosto de 2005. Disponible en: <http://www.textoscientificos.com/polimeros/polietileno/propiedades> [citado 4 mayo 2012]
 28. Código técnico de la edificación Web. [en línea]. Disponible En: <http://cte-web.iccl.es/materiales.php?a=23>. [Citado 4 mayo 2012] (2007).
 29. Nag Dasgupta, Chitrlekha y otros.: Recent trends on the development of photobiological processes and photobioreactors for the improvement of hydrogen production. En: International Journal Of Hydrogen Energy. Vol., 35. No 19 P. 10227. (2012).
 30. Merchuk, José.: Airlift Bioreactors: Review Of Recent Advances. Department of Chemical Engineering. Ben-Gurion University of The Negev. The Canadian Journal of Chemical Engineering, Volumen 81, Junio - Agosto, P.334, 335. (2003).