

Escalamiento de fotobiorreactor solar secuestrante de CO₂ de gases de combustión optimizando producción de “espirulina”

Scaling of solar photobioreactor sequestering of CO₂ of combustion gases optimizing spirulina production

Seijas-Velásquez Segundo¹; Alcántara- Alza Víctor¹; Esquivel- Flores Carlos¹; Benites- Gutiérrez Luis¹; González –Sánchez José¹; Seijas- Bernabé Priscilla²; Seijas- Bernabé Nadia²

RESUMEN

En la presente investigación se diseñó y escaló un fotobiorreactor solar tipo tubular secuestrante de dióxido de carbono procedente de gases de combustión empleando la microalga espirulina. Se inició, preparando el inóculo, el cual fue cultivado en 10 cámaras de crecimiento de 250 mL cada una, el cultivo contenía como sustrato vinaza al 2%. Después se implementó los sistemas experimentales: El sistema de combustión estacionario de CO₂ estuvo conformado por una caldera acuotubular de 1 BHP y el otro sistema conformado por un fotobiorreactor tubular. El dimensionamiento de este sistema estuvo dado según los parámetros óptimos de cultivo obtenidos en las cámaras de crecimiento. Luego de instalar el fotobiorreactor solar para el cultivo de espirulina, se procedió a realizar la evaluación de secuestro del dióxido de carbono y optimizar la producción para lo cual se determinó el tiempo óptimo de producción de biomasa microalgal, producción de oxígeno además se evaluó la entrada y salida de los gases de combustión hacia el fotobiorreactor. Con los resultados obtenidos tanto en el dimensionamiento del fotobiorreactor así como en la evaluación del secuestro del CO₂, se procedió a realizar el escalamiento a través de la aplicación de algoritmos y empleo del software MATLAB, obteniendo un programa computacional que brinda como resultado proporciones para fotobiorreactores tubulares a escala industrial.

Palabras clave: escalamiento, fotobiorreactor solar, secuestro de CO₂, espirulina.

ABSTRACT

The present research aims to design and scale up a solar tubular photobioreactor sequestering of carbon dioxide emissions from combustion gases through the microalga “spirulina”. To develop this work first was prepared the inoculum, which was initially grown in growth chambers 10 of 250 mL each; the culture contained as substrate 2% “vinasa”. After experimental systems were implemented: Stationary combustion system of CO₂, which consisted of a aquotubular boiler of 1 BHP and the other set consists of a tubular photobioreactor. The sizing of this system was given as the optimal parameters obtained in the culture growth chambers. After installing the solar photobioreactor for cultivation of “spirulina”, proceeded with the evaluation of sequestration of carbon dioxide and optimize the production process for which determined the optimal time of mycroalgae biomass production, production of oxygen, also evaluated the entry and exit of the flue gases into the photobioreactor. With the results obtained in the sizing of solar photobioreactor and in the evaluation of CO₂ biofixation spirulina, proceeded to perform the scaling through the application of algorithms and using MATLAB program, resulting in tubular photobioreactors proportions for industrial scale.

Key words: scaling, solar photobioreactor, CO₂ sequestration, spirulina.

¹ Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Trujillo

² Instituto de Investigación en Ciencias e Innovación Tecnológica

INTRODUCCION

Uno de los principales problemas relacionados al medio ambiente es el calentamiento global, inducido por el incremento de las concentraciones de los gases de invernadero en la atmósfera. El dióxido de carbono (CO₂) es el principal gas invernadero. El CO₂ atmosférico se ha incrementado de 280 a 368 ppmv en los últimos 200 años y es el responsable de aproximadamente el 50% del aumento del efecto invernadero, el cual trae consigo una serie de afectaciones provocadas sobre los bosques, zonas de cultivo, cuencas hidrológicas, zonas urbanas y costeras como desaparición de bosques de coníferas y encinos, extinción de ciertos tipos de fauna (por desaparición de hábitat), pérdida de cosechas, elevación del nivel del mar, reducción de volumen de agua en cuencas, perjudicando a las ciudades porque traería desabastecimiento de agua por la reducción de las precipitaciones y por la disminución en la recarga de los mantos acuíferos, inundaciones ocasionadas por precipitaciones extremas y afectación de la calidad del aire debido al aumento de las concentraciones de ozono en la atmósfera de las ciudades, provocando daños sobre la salud de la población, entre otros^{1,2}.

Con respecto a las emisiones anuales antropogénicas de CO₂ se estiman en cerca de 2×10^{10} toneladas, principalmente provenientes de la combustión de combustibles fósiles en asociación con un incremento de la población y la industrialización³.

Por ello se están tomando una serie de medidas de toda índole políticas, legislativas y científico-tecnológicas, dentro de este aspecto existen diversas instituciones estatales y privadas que buscan reducir las emisiones de CO₂ a través de varias líneas de investigación. Así, mientras unos grupos están centrados en optimizar la tecnología que ya existe, otros intentan mejorar las técnicas de almacenamiento del gas (con el uso de contenedores, por ejemplo, en analogía a la forma en que se tratan los residuos radiactivos)³.

Otras alternativas serían la búsqueda de mejores soluciones en el proceso de combustión (que la materia usada quemara más y emitiera menos) o la captura de gases principalmente de CO₂ producido, que es una de las tecnologías donde se avizora soluciones a esta problemática³.

Actualmente existen varios métodos que reducen el CO₂ de los gases de combustión a través de la captura o fijación; tales como tratamientos físicos como la absorción, adsorción y tratamientos de fijación química. En la última década, los estudios se están dirigiendo hacia la fijación biológica de CO₂ por fotosíntesis microalgal como un método viable técnica - económicamente y de mayor efectividad que las plantas terrestres, no sólo por reducir las emisiones de dióxido de carbono^{4,5}, sino paralelamente se podría producir industrialmente compuestos de gran importancia comercial, tales como biomasa para alimentación humana y animal, pigmentos de tipo carotenoides y ficocianinas, compuestos multivitamínicos, biofiltros, compuestos sulfolípidos, biocombustibles, biohidrógeno, entre otros^{6,7,8}. Destacando algunas especies tales como *Chlorella*, *Dunaliella* y *Arthrospira*.
9,10,11,12

Las microalgas son organismos microscópicos que viven en ambientes acuáticos poseen pigmentos de colores y la mayoría son autótrofos pues convierten la energía solar y CO₂ en O₂ y carbohidratos, luego los emplean para sintetizar otros constituyentes de la biomasa. Las microalgas crecen típicamente suspendidas en medio nutriente líquido, con una fuente de enriquecimiento de CO₂, requeridas para su cultivo; es por ello que empleando su aptitud para la biofijación y utilización de CO₂ es posible proponerlas como un método biológico para el tratamiento de emisiones industriales de este gas en la atmósfera, ayudando a aliviar la tendencia al aumento del calentamiento global^{8,9}.

Un aspecto a tomar en consideración para realizar un sistema biológico de fijación de CO₂, es el tipo de sistema de cultivo, han sido propuestos para el secuestro de CO₂

dos sistemas de cultivo. Uno es el sistema de estanques abiertos y otro es el sistema cerrado tipo fotobiorreactor^{13,14,15}. El término fotobiorreactor se define como un sistema cerrado donde se obtiene un ambiente óptimo controlando el sistema para realizar el cultivo microalgal^{16,17}.

El secuestro biológico de carbono, en particular a través de éstos sistemas fotosintéticos ingenieriles, ofrecen ventajas como una solución viable a plazo intermedio para reducir las emisiones de carbono en el sector de energía. La idea principal es hacer pasar el CO₂ proveniente de procesos industriales o de las plantas de generación de energía eléctrica, y dirigirlo hacia el cultivo de microalgas. De tal manera, se presentaría la posibilidad para que el cultivo de microalgas se efectúe cerca de refinerías, plantas de generación de energía y otras industrias que emitan cantidades apreciables de CO₂ y emplearlo como uno de los elementos básicos para el medio de crecimiento de las microalgas^{16, 17,18}.

En base a los antecedentes antes mencionados, se propuso la presente investigación cuyo objetivo principal fue diseñar y escalar un sistema de fotobiorreactor solar secuestrante de CO₂ a través de la optimización del proceso de producción de “espirulina” y evaluar el secuestro o biofijación del dióxido de carbono por esta microalga a través de la determinación de la bioconversión en biomasa microalgal y producción de O₂.

MATERIAL Y METODOS

1. Obtención de muestra biológica y preparación de cultivo inicial

Material Biológico: *Arthrospira jenneri* “espirulina”.

Las muestras de *A. jenneri* “espirulina”, fueron recolectados de los humedales de Chou- Chou del distrito de Salaverry –La Libertad.

2. Obtención del desecho industrial vinaza

El desecho industrial vinaza se obtuvo de las empresas DESTILERIAS UNIDAS S.A.C, Cartavio-La Libertad (Perú) en un volumen de 18 L. En el laboratorio se mantuvo en un recipiente herméticamente cerrado, sellado y almacenado en un ambiente oscuro a 25 ± 2 °C.

3. Condiciones de cultivo y preparación de inóculo

A. jenneri fue cultivada en 10 cámaras de crecimiento de 250 mL cada una. El medio de cultivo contuvo 2% de vinaza aforado con agua potable, además se les añadió 2,6 g de NaHCO₃/L y después se estandarizó a un pH de 8,5. Posteriormente se procedió a autoclavarlo por 20 minutos a 121 °C. El medio se mantuvo agitado y aireado de manera permanente, y se iluminó por tubos fluorescentes de luz blanca de 40 watt (320 lux) a temperatura de 25 ± 2 °C y 45 % humedad relativa promedio y fotoperiodo 12/12. A la semana de realizar el cultivo se procedió a registrar los datos obtenidos acerca de algunos parámetros de cultivo como la densidad celular y contenido de proteínas totales .

4. Implementación de los sistemas experimentales

Estuvo conformado por dos sistemas: El sistema de combustión estacionario de CO₂ (caldera), simulando las emisiones industriales que generan este efluente, y el sistema de fotobiorreactor tubular, en donde se evaluó el secuestro del dióxido de carbono por la espirulina, así como se monitoreó y optimizó los parámetros de la producción de su biomasa.

4.1 Instalación de sistema de combustión estacionario para la generación de CO₂

Lo constituyó una caldera acuotubular de 1 BHP que empleó como combustible carbón antracita, de procedencia Santiago de Chuco, La Libertad.

En este sistema, se realizó la respectiva evaluación de la composición de gases de combustión a la salida de la chimenea empleando un analizador de gases electrónico, previa optimización del proceso mediante regulación del exceso de aire de combustión. Mediante el análisis de los gases de combustión se determinó principalmente la concentración de CO_2 además de las concentraciones de NO_x y SO_x que emite el sistema estacionario.

1.2 Diseño e instalación del sistema de fotobiorreactor tubular

Para realizar el diseño del fotobiorreactor previamente se determinó el flujo de gases de combustión, el cual esta de acuerdo a la potencia de la caldera, después de obtener este dato y junto con los parámetros registrados en el cultivo a nivel de laboratorio, fueron empleados para proceder a realizar el dimensionamiento del fotobiorreactor solar, utilizando para ello la técnica de escalamiento, proporcionando de esta manera los parámetros de diseño respectivos como volumen o capacidad del sistema de fotobiorreactor (V_{FBR}), área ocupada por el fotobiorreactor (A), diámetro (mm), longitud (m) de los circuitos tubulares que conforman al fotobiorreactor, así como superficie de captación de radiación solar (A_{FBR}) entre otros.

Una vez obtenido los parámetros de operación del fotobiorreactor se procedió a instalarlo empleando un sistema conformado por un circuito con recirculación de gases de combustión a través del cultivo de espirulina, empleando un ventilador centrífugo de velocidad regulable.

1.3 Técnica de escalamiento

Se basó en la aplicación y modelamiento de algoritmos así como el empleo del software MATLAB, obteniendo un programa computacional el cual brinda

como resultado las proporciones para fotobiorreactores tubulares según la capacidad de caldera (BHP) que se requiere incluir a escala industrial.

1.4 Subsistemas complementarios a los sistemas experimentales

A parte de los sistemas experimentales como el sistema de combustión estacionario y el sistema de fotobiorreactor solar, se instalaron subsistemas que complementaron a los principales sistemas para llevar a cabo el proceso experimental de biosecuestro. Entre los subsistemas instalados se encuentran: Sistema de recirculación de gases y sistema de alimentación o recirculación de la solución de crecimiento microalgal.

1.5 Esterilización y cultivo inicial

Antes de utilizar el fotobiorreactor, éste fue esterilizado. Primero se bombeó agua estéril haciéndole circular por 20 minutos. Después se procedió a descargar el agua usando el apéndice del fondo, luego se colocó una solución de hipoclorito de sodio al 1,5% haciéndolo circular por 1 hora, descargándose para luego nuevamente adicionarle agua autoclavada en forma continua. Una vez de haber esterilizado el reactor ya se considera apto para recibir el medio de cultivo.

El medio se inserta en el fotobiorreactor y luego se estabiliza la temperatura y se adiciona el inóculo de *A. jenneri* "espirulina". Después se procedió a suministrar el dióxido de carbono proveniente de la caldera al medio de cultivo y se realizó la respectiva evaluación de secuestro del CO_2 .

5. Evaluación de secuestro del dióxido de carbono por espirulina a través de la determinación de la bioconversión en biomasa microalgal y O_2 disuelto

Después de instalar el fotobiorreactor solar para el cultivo de espirulina, se procedió a realizar la evaluación de secuestro o biofijación del dióxido de carbono. Para el presente estudio, se empleó el diseño experimental completamente aleatorizado, conformándose 5 grupos con tres repeticiones cada uno: A (testigo), B, C, D y E. En cada grupo se utilizaron diferentes tiempos en el que se realizó la cosecha (0, 48, 72, 96 y 120 horas respectivamente). Terminado el tiempo respectivo se procede a evaluar el secuestro del dióxido de carbono por parte de espirulina, esto se realizó a través de la determinación de la bioconversión del CO₂ mediante la evaluación tanto de la producción de biomasa microalgal (crecimiento) así como de la producción de oxígeno; además se evaluó la salida de los gases de combustión del fotobiorreactor. En el primer caso se utilizó como indicadores: peso seco celular (mg/cm³) y densidad celular (tricomas/mL). Con respecto a la producción de oxígeno se empleó como indicador la concentración de O₂ contenido en los gases de salida (v/v%).

En cuanto a la evaluación de la salida de los gases de combustión (CO₂, NO_x, SO_x), se determinó la concentración de éstos a la salida del fotobiorreactor utilizando un analizador de gases. Posteriormente se procedió a cosechar la biomasa, empleando filtros de 80 mm. Luego se determinó la calidad de la biomasa según la concentración de proteínas y pigmentos que contenga.

5.1 Evaluación de la calidad de biomasa de espirulina

a. Determinación de concentración de proteínas

Se empleó el método de microkjeldhal para la determinación de proteínas totales.

b. Contenido de Pigmentos

Para la determinación del contenido de clorofila se centrifugó 1 mL de cultivo (de los grupos experimentales), durante 10 minutos a 13000 r.p.m. Se descartó el sobrenadante y el precipitado se resuspendió en un 1 mL de metanol puro. Se agitó bien la mezcla y se mantuvo 24 horas a 4 °C en oscuridad. Tras ello, se centrifugó por 5 minutos a 13 000 r.p.m. recogiendo el sobrenadante del cual se mide la densidad óptica (D.O) a 665 nm en un espectrofotómetro, usando como blanco el metanol. Para calcular la concentración de clorofila se tomó lectura a 665 nm y se multiplicó por un factor determinado (mg/mL cl = 13,14 x D.O._{665nm}). Para carotenoides totales se analizó de la misma extracción solo que la lectura se realizó a 480 nm luego se multiplicó por un factor determinado (mg/mL carotenoides = 4 x D.O._{480 nm}).

Para la cuantificación de ficocianinas, primero se les extrajo por método de Choque osmótico y el sobrenadante obtenido después del proceso se analizó a 652 nm, 615 nm y 750 nm en un espectrofotómetro. La concentración de ficocianina fue determinada por la ecuación:

$$[C\text{-Ficocianina}] = 1000 \times (DO_{615} - DO_{750}) - 474 \times (DO_{652} - DO_{750})$$

5.34

RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados registrados en las diferentes etapas del estudio, primero se muestra los datos registrados de la optimización de los parámetros energéticos de una caldera acuotubular de 1 BHP, esta etapa fue necesaria ya que este equipo representa el sistema de combustión estacionario que emitió los efluentes gaseosos entre los que destaca el CO₂.

Determinación de los parámetros energéticos de la caldera acuotubular del sistema de combustión

La optimización se determinó experimentalmente.

En la **Tabla 1**, se presenta los resultados de la combustión de carbón antracita con excesos de aire de 3,0 a 20,9%. El diagnóstico de la combustión en la caldera muestra una mayor

eficiencia de combustión empleando un rango entre 5,0% - 7,0% como exceso de aire con un contenido promedio de 11,63% de CO₂ en los gases de combustión.

Tabla 1. Eficiencia de Combustión de la caldera experimental en función del exceso de aire.
Combustible: carbón antracita

Exceso de Aire (%)	*Contenido de CO ₂ (%)	*Contenido de SO ₂ (ppm)	*Contenido de NO _x (ppm)	Eficiencia de combustión (%)
3,0	8,20	305,5	69,7	66,00
4,0	9,95	347,2	94,5	66,80
5,0	11,68	458,4	195,8	72,00
6,0	11,58	437,5	179,9	71,80
7,0	11,50	429,2	148,7	71,80
8,0	11,35	400,1	119,9	69,00
8,2	11,20	381,3	110,2	68,50
10,5	9,90	316,4	82,2	66,60
15,6	7,90	211,9	65,8	64,40
20,4	6,70	152,2	49,9	62,90
20,9	6,60	120,5	45,1	52,80

* Análisis de gases de combustión por la chimenea. Mediciones efectuadas con Analizador de gases Bacharach.

Resultados de los experimentos a nivel laboratorio

En la **Tabla 2** se reporta los parámetros de operación obtenidos a nivel laboratorio (en cámaras de crecimiento de 250 mL) en base a los cuales se logró obtener los parámetros para dimensionar el fotobiorreactor.

Tabla 2. Parámetros de operación en cultivo de *A. jenneri* "espirulina" obtenidos a escala laboratorio.

➤ Volumendecultivo	250 ml.
➤ Temperatura de cultivo	25 °C
➤ Vinaza	5,0 ml.
➤ Inóculo (espirulina)	25 ml
➤ Anhídrido carbónico inicial	1,4g 9,98 g de proteína
➤ Producto	18 200 tricomas/
➤ Densidad celular	mL
➤ Tiempo	168 horas
➤ Fotoperiodo	12/12

Resultados de los experimentos a nivel piloto

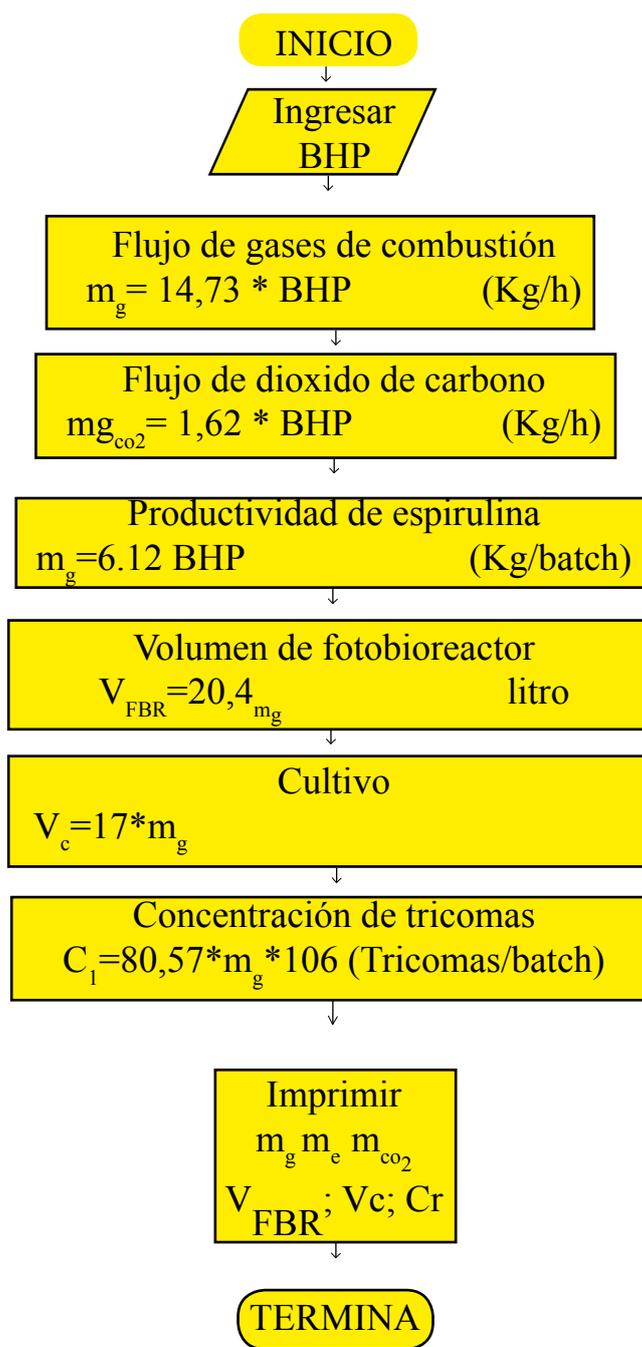
Se reportan los resultados que se obtuvieron en un prototipo de capacidad de 44 L, donde se llevó a cabo el estudio del proceso de biofijación de dióxido de carbono, producción de proteínas y pigmentos. Además, esta experimentación permitió validar el programa computarizado obtenido a través del modelamiento de un algoritmo y empleando el software MATLAB (**Fig. 2**). En la **Tabla 3**,

se registran los resultados obtenidos de la producción de *espirulina* expresándose en promedio de peso seco celular y densidad celular, (**Fig. 6**), mientras que en la tabla 4 se reportan los resultados acerca de la calidad de biomasa a través de los indicadores como contenido de proteínas totales y pigmentos de muestra de *espirulina* cosechadas según los grupos experimentales A, B, C, D y E, siendo el grupo D (tiempo de cosecha: 96 h), el que obtuvo los mayores valores.

Tabla 3. Evaluación del proceso de biofijación del dióxido de carbono por *espirulina* a través de la determinación de los indicadores peso seco celular, densidad celular, concentración de CO₂ y O₂ contenidos en el gas de salida; según tiempo de cosecha

Concentración inicial de CO₂: 11,68 v/v%

GRUPO EXPERIMENTAL	Peso seco celular (mg/mL)	Densidad celular (tricommas/mL)	Concentración de CO ₂ en el gas de salida (v/v%)	Concentración de O ₂ en el gas de salida (v/v%)
A (testigo)	0,2	128360	11,68	5,5
B (48 h)	1,45	130067	9,72	7,81
C (72 h)	1,98	133146	6,45	10,9
D (96 h)	2,6	141142	4,91	14,5
E (120 h)	2,39	136427	5,23	9,8



\dot{m}_{CO_2} : Flujo de anhídrido carbónico

\dot{m}_g : Flujo másico de gases de combustión

\dot{m}_e : Producción de espirulina

C_1 : concentración de tricomas

V_{FBR} : volumen de bioreactor

Fig. 1. Algoritmo de diseño de Fotobiorreactor experimental determinado a partir de caldera con cámara de combustión estacionaria, sin recuperadores de calor.

main

INGRESE BHP :

INGRESE W SI BHP<=1000 : Ton/h

$\dot{m}_{CO_2} = 1.5054 \text{ kg/h}$

$\dot{m}_g = 13.1196 \text{ kg/h}$

$\dot{m}_c = 199.992 \text{ kg/día}$

$\dot{m}_e = 2.0436 \text{ kg/día}$

$C_T = 2.34e+007 \text{ Tricomas/día}$

$V_{FBR} = 44.1324 \text{ m}^3 \text{ o L}$

$A_{FBR} = 29.952 \text{ m}^2$

$A = 4.14336 \text{ m}^2$

$Q = 43.8984 \text{ MJ/h}$

CALCULAR LIMPIAR SALIR

\dot{m}_{CO_2} :Flujo de anhídrido carbónico

\dot{m}_g : Flujo másico de gases de combustión

\dot{m}_c : Flujo de cultivo conteniendo espirulina

\dot{m}_e : Producción de espirulina

C_T : concentración de tricomas

V_{FBR} : Volumen del fotobiorreactor

A_{FBR} : Superficie del fotobiorreactor

A: Área que ocupa el fotobiorreactor

Q: Flujo de energía calorífica consumida por el generador de vapor

Fig. 2. Programa computarizado obtenido a través de MATLAB para dimensionar el fotobiorreactor.

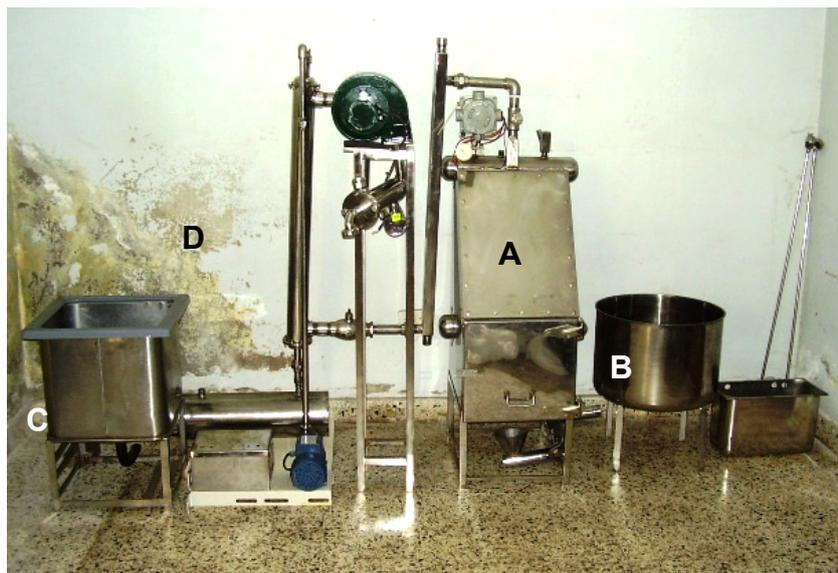


Fig. 3. Sistema estacionario de combustión que proporcionará el flujo de gases al fotobiorreactor tubular donde se cultivará espirulina. Conformado por las siguientes partes: A. Caldera acuotubular, B. Recipiente clarificador, C. Recipiente receptor de sustrato vinaza y D. Lavador de gases.



Fig. 4. Vista panorámica del módulo de experimentación

Tabla 4. Determinación de proteínas totales y pigmentos de muestras cosechadas según grupos experimentales

GRUPO EXPERIMENTAL	Proteínas Totales (g/100g)	Pigmentos (ug/mL)		
		Clorofila	Carotenoides	Ficocianinas
A (testigo)	64,02	27,05	1,81	48,57
B (48 h)	67,15	29,68	1,88	51,15
C (72 h)	69,07	31,21	1,89	53,83
D (96 h)	74,12	35,98	2,39	58,45
E (120 h)	70,21	33,92	1,97	56,47

DISCUSION

Ciertos factores físicos, ambientales y nutricionales son requeridos para el crecimiento (producción de biomasa) y metabolismo (principalmente la biosíntesis de proteínas) en espirulina. Entre esos factores destaca la concentración de dióxido de carbono en el medio de cultivo, ya que esta microalga lo absorbe o fija bioconvirtiéndolo en biomasa y proteínas¹⁹, esta condición se aprovechó en la presente investigación que propuso un sistema de cultivo microalgal cerrado, como es el caso del fotobiorreactor, para disminuir las emisiones emanadas de un sistema estacionario de combustión. Conceptualmente, esta solución estuvo basada en la fotosíntesis oxigénica de la microalga^{9,11}.

Cabe resaltar que el secuestro o fijación de CO₂ por las microalgas es mayor que por las plantas terrestres porque estas solamente pueden tomar el CO₂ atmosférico que solo es aproximadamente

0,036%¹⁰. Por otro lado, las descargas de los gases de diversas industrias emiten una tasa mayor de CO₂ (10%–20%)^{4,5}.

Es por ello que en el presente estudio se implementó una caldera acuotubular como sistema de combustión estacionario el cual simuló las emisiones industriales que generan diversas empresas que existen actualmente en nuestra región. Antes de utilizar este sistema

se realizó la optimización de los parámetros energéticos de la caldera, con la finalidad de determinar el porcentaje de exceso de aire con el cual se obtenga una alta eficiencia en la combustión, ya que de esta manera se obtiene un contenido alto de CO₂, esto se logró con un exceso de aire de 5,0 % (tabla 1) obteniéndose efluentes que poseían un contenido de 11,68% de CO₂, entre otros productos como NO_x y SO_x (198,5 y 458,4 ppm respectivamente), sin embargo estos compuestos fueron retenidos por el scrubber o lavador de gases instalado a la salida de la caldera antes de que ingrese al fotobiorreactor; a pesar de que estos compuestos se pueden utilizar como nutrientes a determinadas concentraciones²⁰, no fueron empleadas en este estudio puesto que la investigación estuvo dirigida al estudio de la influencia del dióxido de carbono.

Por otro lado, una de las dificultades, con relación al sistema biológico de secuestro del CO₂ proveniente de los gases de combustión, era que el CO₂ para ser disuelto en el medio de cultivo tenía que solubilizarse, a fin de que pueda producirse el proceso de biofijación del dióxido de carbono por la espirulina^{21, 23,24}. Teniendo en cuenta que la solubilidad es la medida o magnitud que indica la cantidad máxima de soluto (CO₂) que puede disolverse en una cantidad determinada de solvente (cultivo) a una temperatura dada, en el caso de los gases, un aumento de la temperatura produce siempre una disminución de la solubilidad de gas en el agua²⁵ por lo que fue necesario que los gases provenientes de la chimenea de la caldera, en este estudio, tuvieran que pasar por un sistema de enfriamiento.

Este sistema estuvo conformado por un dispositivo denominado economizador o recuperador de calor, es básicamente un intercambiador de calor gases-agua, diseñado teniendo en cuenta las particularidades de su trabajo con gases de combustión y aplicando la tecnología de las superficies extendidas^{26,27,28}.

El economizador, instalado en la caldera, consigue aprovechar el calor residual de los gases de combustión traspasándolo al agua de alimentación de la caldera, con lo que se

consigue reducir el consumo de combustible y mejorar el rendimiento de manera considerable, debido al rápido aumento de la temperatura del agua de alimentación a través del gas de combustión capturado, los economizadores también proporcionan una mejora significativa en la generación de vapor. Este dispositivo, principalmente forman parte de las calderas tipo acuotubular²⁹.

Como se observa en los resultados obtenidos (**Tabla 1**), lo que se propuso en esta etapa del presente trabajo es que a través de la optimización de parámetros energéticos e instalando los sistemas más eficientes para ahorrar energía tal como el intercambiador de gases (economizador), era transformar una caldera convencional en una caldera de bajo consumo, antes de realizar el respectivo dimensionamiento y construcción del fotobiorreactor solar, puesto que es una medida primordial a tener en cuenta cuando se desea instalar un sistema de biosecuestro microalgal de CO₂ aumentando de esta manera la eficiencia de este proceso y dimensionar el mínimo tamaño de éste equipo¹⁴. Con respecto al sistema experimental del fotobiorreactor, su dimensionamiento se basó principalmente en los parámetros óptimos de cultivo de la espirulina (producción de biomasa) realizado a nivel de laboratorio (**Tabla 2**) con sistemas de una capacidad de 250 mL (cámaras de crecimiento), ya que teniendo en cuenta estos datos se realizó el modelamiento del algoritmo respectivo a través del empleo del software MATLAB, logrando obtener un programa computarizado (**Fig. 1 y 2**) que permitió el escalamiento del fotobiorreactor a mayor volumen (44 L). Este tipo de escalamiento se denomina scale up o escalamiento ascendente²².

En la **Tabla 3**, se reportan los resultados que se obtuvieron de la evaluación del proceso de biofijación del dióxido de carbono por espirulina a través de la determinación de los indicadores peso seco celular, densidad celular y concentración de CO₂ y O₂ en el gas de salida, en un prototipo de capacidad de 44 L, observándose que los valores óptimos se obtuvieron en el grupo experimental D, donde

se realizó la cosecha cada 96 horas.

Cabe resaltar, que a diferencia de la mayoría de plantas desarrolladas o superiores, la microalga logra realizar la fotosíntesis en el agua, condición que puedan brindar ciertas particularidades, limitaciones y características específicas al proceso^{30, 31}. Entre las que se encuentran, la captación de CO₂ del medio (en este caso tipo acuoso) y su transformación está en la bases de la Rubisco (ribulosa-1,5-bisfosfato carboxilasa/oxigenasa), la enzima clave envuelta en la fijación del carbono, representando uno de los factores más importantes, lo que determina finalmente las tasas de crecimiento microalgal^{31,32}. El O₂ compite con el CO₂ por el sitio activo de la enzima, de manera que las tasas de carboxilación dependen de la concentración de CO₂ relativa a la de O₂ así como de la selectividad del enzima para el CO₂ frente al O₂. Altos valores del índice CO₂/O₂ suprimen la actividad oxigenasa de la Rubisco. Por el contrario, cuanto menor sea dicho índice, más limitada podría estar la fotosíntesis por el CO₂³³.

Por otro lado, todos los organismos fotosintéticos aeróbicos, incluido las microalgas, se han adaptado para desarrollar un mecanismo de concentración de CO₂ (MCC). El blanco de este mecanismo es para propiciar las condiciones propias para un incremento en la actuación de la carboxilación de la Rubisco, en el caso de la microalga cianobacterial espirulina, el mecanismo que emplea está basado en el transporte de carbono inorgánico (CO₂ o HCO₃⁻) a través de las membranas celulares³².

Un componente esencial de este mecanismo es la enzima denominada anhidrasa carbónica (AC), cuya función es la de acelerar la transformación reversible del CO₂ a HCO₃⁻; se ubica en el citoplasma y estroma del cloroplasto, puesto que el carbono inorgánico se almacena en el interior como HCO₃⁻, para que luego se transforme en CO₂ y pueda ser fijado por la Rubisco^{31, 32}

Si la actividad de la anhidrasa carbónica es específicamente inhibida, la frecuencia de la fotosíntesis se modifica. Especies como

Chlorella son capaces de desarrollar altas tasas de fotosíntesis en un medio con bajo porcentaje de CO₂, pero no lo pueden fijar eficientemente. Además, se reportó que *Chlorella* sp. a pesar que puede crecer bajo condiciones iniciales de 20 % de CO₂, produce una tasa de crecimiento de 0,21-0,22 mg/mL, resultado obtenido por la cepa NTU-H25³¹ en contraste con la microalga estudiada *Arthrospira jenneri* “espirulina”, donde se reportó que posee una mayor eficiencia para fijar CO₂ que *Chlorella*, pues presentó 2,6 mg/mL en peso seco (tabla 3), en condiciones iniciales de 11,68 v/v% de CO₂, cabe resaltar que la tasa fotosintética, fijación microalgal de CO₂ (secuestro biológico) y la conversión no pueden ser monitoreadas por medición directa pero si puede ser estimado en forma indirecta o aproximada a través de la tasa de crecimiento algal la cual se puede obtener a través de los indicadores como el peso seco celular³¹. También espirulina presenta mayor productividad comparando con *Scenedesmus obliquus* pues esta especie registró un valor de 0,44 mg/mL en condiciones iniciales de 12 v/v % de CO₂³². Con relación a otra especie de *Arthrospira* sp., un estudio realizado registró una producción de biomasa de 0,22g mg/mL empleando condiciones de 6 v/v% de CO₂ en el medio mientras que se obtuvo 3,50 mg/mL cuando se adicionó 12% (v/v) de CO₂³², a diferencia de nuestro estudio que con respecto al último valor registrado fue menor pues se empleó menos CO₂ inicial.

Generalmente en la mayoría de microalgas su crecimiento y productividad mejoran si el rango de CO₂ está entre 0,2-5 v/v % en el flujo de gas, este nivel es recomendado por diversas investigaciones reportadas^{29,30,31,32}. En la presente investigación, se confirma la anterior aseveración, pues en la fase de crecimiento lineal, que es donde ocurrió el mayor crecimiento, fue cuando la concentración de CO₂ se encontraba en un nivel de 4,91 v/v% (**Tabla 3**), la cual es cercana a la concentración óptima de CO₂ para la fotosíntesis²¹.

Finalmente, un aspecto importante, que se investigó y que es considerado un punto crítico para obtener altas tasas de producción

de biomasa, está referido al tiempo de cosecha, si no se realizará este proceso las tasas de producción después de alcanzar un pico alto pueden declinar la concentración de biomasa, porque con el transcurrir del tiempo se incrementa la presencia de individuos en el medio de cultivo²⁴, reduciendo la disponibilidad de luz pues aumenta el sombreado entre ellos con lo cual no podrían realizar eficientemente la fotosíntesis así como se presenta depleción de nutrientes por un alto consumo ya que hay una mayor población, trayendo consigo la mortandad²⁴. En relación a este aspecto, en la **Tabla 3** se observa que el tiempo de cosecha óptimo fue de 96 horas, ya que en ese periodo se obtuvo los más altos valores tanto con el peso seco como con la densidad celular indicando por lo tanto que se obtuvo la más alta tasa de producción de biomasa, ya que pasado este tiempo se presentó la disminución de los valores de producción.

CONCLUSIONES

Se escaló un fotobiorreactor solar de tipo tubular con capacidad de secuestro de CO₂ a través de la optimización del proceso de producción de “espirulina” y empleando la técnica de escalamiento ascendente basada en modelamiento de algoritmos y software MATLAB.

La producción óptima de biomasa microalgal de espirulina se presentó en un periodo de 96 horas (tiempo de cosecha) obteniendo: peso seco celular: 2,6 mg/mL y densidad celular: 141 142 tricomas/mL.

La mayor concentración de O₂ en el gas de salida, fue de 14,5 v/v % mientras que la menor concentración de CO₂ fue de 4,91 v/v %, ambos registrados en un periodo de 96 horas (tiempo de cosecha).

Los parámetros de diseño del fotobiorreactor se determinan a partir de la potencia o capacidad de la caldera:

Volumen de fotobiorreactor: $V_{\text{FBR}} = 44,2 * \text{BHP}$ en litros.

Superficie del fotobiorreactor: $A_{\text{FBR}} = 30 * \text{BHP}$ en m^2 .

Superficie que ocupa el fotobiorreactor: $A = 4,15 * \text{BHP}$ en m^2 .

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Gerencia de Investigación Científica, Proyección Social y Extensión Universitaria (GICPSEU) de la Universidad Nacional de Trujillo por el financiamiento otorgado para realizar el presente trabajo.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Benemann, J. Technology Roadmap - Biofixation of CO_2 and Greenhouse Gas Abatement with Microalgae. *Final Report to the U.S. Dept. of Energy*, National Energy Technology Laboratory, Morgantown-Pittsburgh 2003; 1-10.
2. Pedroni P, Davison J, Beckert H, Bergman P, Benemann J.A proposal to establish an international network on biofixation of CO_2 and greenhouse gas abatement with microalgae. *Journal of energy and environmental research* 2001; 1(1): 136-150.
3. Li Y, Markley B, Ram A, Rodríguez V, Thompson D, Van Niekerk D. Utilization of carbon dioxide from Coal-fired power plant for the Production of value-added products. Informed to the requirements for the Design Engineering of Energy and Geo-Environmental Systems Course (EGEE 580).2007.
4. <http://www.cambioclimatico.minam.gob.pe/cogeneracion-con-biomasa-en-el-complejo-agroindustrial-cartavio-s-a-a/>
5. Muñoz JM. Cogeneración en Grandes Centrales de procesos. *El Cotidiano*. 2003.19(117):52-60.
6. Boyle G, Everett B, Ramage A. *Energy Systems and Sustainability*. New York: Oxford University Press Inc. 2003
7. Halloway S. Storage of Fossil Fuel-Derived Carbon Dioxide Beneath the Surface of the Earth. *Annual Review of Energy and the Environment*. 2001; 26: 145-66.
8. Seijas P, Salgado L. Nuevos Aspectos biotecnológicos y perspectivas en la investigación y producción de compuestos obtenidos del género *Arthrospira* "espirulina". *Sciendo* 2007; 10 (2): 121-134.
9. Seijas P, Salgado L. Hidrógeno Cianobacterial: Alternativa Biotecnológica y Ecológica de energía renovable. *Investigación -Desarrollo e Innovación I+D+I*. 2006; 21 (3):64-69.
10. Ben-Amotz A, Borodyanski G. Microalgae Cultivation with CO_2 -biofixation of Power Plant Station. Report of IOLR and GENERAL Bi Ltd. 2003.
11. Yue-Hui Zhu, Jian-Guo Jiang. Continuous cultivation of *Dunaliella salina* in photobioreactor for the production of carotene. *Eur Food Res Technol* .2008; 227:953–959.
12. Nakamura T, Senior C, Olaizola M, Masutani S. Capture and Sequestration of Stationary Combustion Systems by Photosynthetic Microalgae. *Proc. First National Conf. on Carbon Sequestration*. Dept. of Energy - National Energy Technology Laboratory.2001.
13. Mears BM. Design, Construction and Testing of Pilot Scale Photobioreactor Subsystems. Thesis presented to the faculty of the Russ College of Engineering and Technology of Ohio University of the requirements for the degree Master of Science. 2008.
14. Morita M, Watanabe Y, Saiki H. Investigation of photobioreactor design for enhancing the photosynthetic productivity of microalgae. *Biotechnology and Bioengineering* .2000; 69 (6): 693-699.
15. Bayless DJ, Kremer GG, Prudich ME, Stuart DJ, Vis-Chiasson ML, Cooksey K, Muhs J. Enhanced Practical Photosynthetic CO_2

- Mitigation". Proceedings of the National Energy Technology Laboratory - Dept. of Energy, First National Conf. Carbon Sequestration. 2001.
16. Seijas S, Chávez R, Seijas P, Seijas N, Salgado L. Parámetros de Diseño de Fotobiorreactor para Producción de *Arthrospira jenneri* "espirulina" optimizando proceso de cultivo. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Trujillo. P.I. N° 260209103.2009.
 17. Cuello JL, Ono E. Design parameters of solar concentrating systems for CO₂-mitigating algal photobioreactors. *Energy* 2004;29: 1651-1657
 18. Ogbonna JC, Soejima T, Tanaka H. An integrated solar and artificial light system for internal illumination of photobioreactors. *Journal of Biotechnology*. 1999;70: 289-297.
 19. Tsygankov AA. Laboratory Scale Photobioreactors. *Applied Biochemistry and Microbiology*. 2001; 37(4): 333-341.
 20. Reza N. The culture of coccolithophoric algae for carbon dioxide remediation. Thesis is presented for the degree of Doctor of Philosophy of Murdoch University.2007
 21. Rafiqul IM, Jalal KC, Alam MZ. Environmental factors for Optimization of Spirulina Biomass in laboratory Culture. *Biotechnology*.2005;4(1): 19-22
 22. Huang Y, Rorrer GL. Optimum Temperature and Photoperiod for the Cultivation of *Agardhiella subulata* Microplantlets in a Bubble-Column Photobioreactor. *Biotechnology and Bioengineering*. 2002;17(2): 135-144
 23. Tri-Panji, Suharyanto K. Optimization media from low-cost nutrient sources for growing *Spirulina platensis* and carotenoid production. *Menara Perkebunan* 2001; 69(1): 18-28.
 24. Salgado L, Chico J, Fernández M, Seijas P. Vinaza como medio de cultivo alternativo en el crecimiento y producción de pigmentos de *Arthrospira jenneri* (Hassall) Stinzenberg. *Rebiol* 2004; 24(1-2):5-12.
 25. Matsumoto H, Shioji N, Hamasaki A, Ikuta Y, Fukuda Y, Sato M, Endo N, Tsukamoto T. Carbon Dioxide Fixation by Microalgae Photosynthesis Using Actual Flue. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 1995; (51-52): 681-692.
 26. Mamrosh D, Beitler C, Fisher K. Consider improved scrubbing designs for acid gases. *Hydrocarbon Processing*. pp. 69-74.
 27. Armas E, Alfaro O. Efecto de la concentración de CO₂ disuelto en un cultivo mixotrófico de *Scenedesmus obliquus*. *Tecnología Química*. 2009; 29 (2):42-46.
 28. Wang L, Sunden B. Optimal design plate exchangers with and without pressure drop specifications. *Applied Thermal Engineering* 2003; 23:295-311.
 29. Cuello JL, Ono E. Carbon Dioxide Mitigation using Thermophilic Cyanobacteria. *Biosystems Engineering*. 2007; 96(1): 129-134.
 30. Chang E, Shang Y. Some characteristics of microalgae isolated in Taiwan for biofixation of carbon dioxide. *Bot. Bull. Acad. Sin.*2003; 44: 43-52.
 31. Doucha, J, Straka F, Livansky K. Utilization of flue gas for cultivation of microalgae (*Chlorella* sp.) in an outdoor open thin-layer photobioreactor. *Journal of Applied Phycology*. 2005; 17: 403-412.
 32. Greque M, Vieira J. Biofixation of carbon dioxide by *Spirulina* sp. and *Scenedesmus obliquus* cultivated in a three-stage serial tubular photobioreactor. *Applied Biochemistry and Biotechnology*.2002; 25 (2): 120-132.
- correspondencia:
 Segundo Seijas Velásquez
 centro Laboral: Departamento de Ingeniería Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Trujillo.
 Dirección:
 El Palmar N° 111 Urb. El Golf
 Telefono:
 044-673856 / 949642177
 E-mail:
 mabesei@yahoo.com