

DISEÑO DE UN REACTOR Y FOTOBIORREACTOR PARA OBTENER BIOCOMBUSTIBLE DE MICROALGAS

128

Jouber Antonio Azua Alvia¹
jouber.azua@uleam.edu.ec

Jhonsy Joel Roldan Hernández²
jhonx_rolدان@hotmail.com.ar

¹Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Manta, Ecuador
²Unidad Educativa Particular Lev Vygotsky, Manta, Ecuador

Recibido: 08/03/2024

Aceptado: 2/03/2024

Publicado: 15/04/2024

RESUMEN

El presente trabajo se centra en el diseño de un sistema de reactor y fotobiorreactor con el objetivo de producir biocombustible a partir de microalgas. La metodología empleada incluyó un exhaustivo estudio de las condiciones óptimas de cultivo de microalgas, así como de los parámetros de diseño necesarios para maximizar la producción de biocombustible. Se consideraron aspectos como la selección de especies de microalgas, la optimización de las condiciones de luz, temperatura, pH y nutrientes, junto con la elección de materiales y configuraciones para los sistemas de reactor y fotobiorreactor. Los resultados obtenidos revelaron una mejora significativa en la producción de biocombustible, con una eficiencia notablemente mayor en la conversión

de biomasa de microalgas en biocombustible. Los resultados experimentales demostraron la viabilidad y eficacia del sistema diseñado para la producción sostenible de biocombustible a partir de microalgas. En conclusión, el diseño propuesto ofrece una solución prometedora para la producción de biocombustible a partir de microalgas, lo que podría contribuir significativamente a la búsqueda de fuentes de energía renovable y sostenible, reduciendo la dependencia de los combustibles fósiles y mitigando el impacto ambiental asociado.

Palabras clave: microalgas, biopetróleo, fotobiorreactor, reactor de alta presión.

DESIGN OF A REACTOR AND PHOTOBIOREACTOR TO OBTAIN BIOFUEL FROM MICROALGAE

ABSTRACT

The present work focuses on the design of a reactor and photobioreactor system with the aim of producing biofuel from microalgae. The methodology used included an exhaustive study of the optimal microalgae cultivation conditions, as well as the design parameters necessary to maximize biofuel production. Aspects such as the selection of microalgae species, the optimization of light, temperature, pH and nutrient conditions, along with

the choice of materials and configurations for the reactor and photobioreactor systems were considered. The results obtained revealed a significant improvement in biofuel production, with a significantly higher efficiency in the conversion of microalgae biomass into biofuel. The experimental results demonstrated the feasibility and efficacy of the system designed for the sustainable production of biofuel from microalgae. In conclusion, the

proposed design offers a promising solution for the production of biofuel from microalgae, which could contribute significantly to the search for renewable and sustainable energy sources, reducing dependence on

fossil fuels and mitigating the associated environmental impact.

Keywords: microalgae, biopetroleum, photobioreactor, high pressure reactor.

INTRODUCCIÓN

Las consecuencias irreversibles que podría experimentar en pocos años el planeta Tierra y por ende la vida humana producto del calentamiento global, hacen pensar a distintos sectores sociales, políticos y económicos sobre las alternativas que se podrían poner en práctica.

Para entender mejor el problema hay que conocer que este fenómeno climático tiene su origen en el aumento de los gases de efecto invernadero en la atmósfera (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, entre otros). Estos gases hacen que la radiación térmica emitida por la Tierra quede atrapada aumentando paulatinamente su temperatura a nivel global. (Saldaña *et al.*, 2023)

El Carbono secuestrado durante mucho tiempo, ahora retorna a la atmósfera rápidamente en los últimos años, incrementando en ella, de forma sustancial los niveles de CO₂ (Garzón *et al.*, 2023), lo que obliga a preguntarse qué se está haciendo para evitar la emisión de este gas o que puede hacerse para nuevamente captarlo con el uso de los avances tecnológicos con los que se cuenta actualmente.

También es importante reflexionar que el Ecuador es un país exportador de crudo con un escaso nivel de industrialización, que en pocos años ya no contará con reservas de este recurso natural, por lo cual se elevará de manera considerable el costo de sus derivados afectando a gran parte de la población.

Esta realidad progresivamente ira extendiéndose a todas partes del globo en la medida que avance el tiempo. Según Usi (2008), del canal DW, los medios alemanes se hacen eco de un estudio publicado por la Organización de Países Productores de Petróleo (OPEP), que señala que las reservas esta organización no durarán mucho, y bien podrían fallar sus suministros hacia el 2037.

Desde el uso en la generación de energía, pasando por la limpieza del medio ambiente al adsorber el dióxido de carbono de la atmósfera, purificar aguas residuales, hasta el desarrollo de productos alimenticios, agropecuarios, vitamínicos, farmacéuticos y de cosméticos, las microalgas están proporcionando a los empresarios posibilidades de negocios, y a los científicos numerosos líneas de investigación (Gonzales, 2015). Esto

conlleva dos posibilidades con el uso de las microalgas, por un lado la producción de energía mediante la licuefacción hidrotérmica de esta biomasa para la generación de biopetróleo, y por otro lado la disminución de un gas de efecto invernadero, o sea, el dióxido de carbono. (Jiménez & Castillo, 2021)

El cambio climático, así como la dependencia de combustibles fósiles incentiva la búsqueda de otras alternativas que además de ser amigable con el medio ambiente sean sustentables (Díaz, 2022). La transformación de la biomasa en compuestos útiles es muy alentadora, una de esas alternativas es el biopetróleo utilizando microalgas como materia prima.

Las tecnologías de aprovechamiento energético de biomasa son variadas (Jiménez y Montalván, 2018; Rubio *et al.*, 2022), en esta investigación se estudia el método de licuefacción hidrotérmica, antes del cual se tiene

METODOLOGÍA

La investigación fue de tipo experimental, ya que, como señalan Zúñiga *et al.* (2023), implica la realización de experimentos en laboratorio, en esta oportunidad para determinar las condiciones óptimas de cultivo de microalgas y los parámetros de diseño del reactor y fotobiorreactor (Flores y Velín, 2014; Frine, 2021).

que diseñar y construir los equipos necesarios para este proceso, los que consta de tres dispositivos principales: reactor de alta presión, fotobiorreactor y chaqueta de calentamiento. En el fotobiorreactor se reproduce la microalga en el reactor de alta presión se realiza el proceso como tal, y la chaqueta de calentamiento proporciona el calor necesario para el proceso (Yoandy, 2019). El resultado final es un biopetróleo que se puede refinar para obtener derivados de diferentes características.

A partir de lo expuesto, el objetivo de este trabajo es diseñar un reactor y fotobiorreactor para obtener biocombustible de microalgas, por medio del que se demuestra que es posible desarrollar en Ecuador una tecnología innovadora para la generación de energía renovable, que a la vez ayude en la mitigación del impacto ambiental.

Estos experimentos proporcionaron datos relacionados con el crecimiento de las microalgas, la acumulación de lípidos y la producción de biocombustible. Además, se llevaron a cabo pruebas a escala piloto para evaluar el rendimiento del sistema diseñado en condiciones más cercanas a las industriales. Este procedimiento

permitió validar la eficacia del proceso y optimizar su funcionamiento para aplicaciones prácticas.

Para poder demostrar la aplicación de la licuefacción hidrotérmica en la biomasa proveniente de las microalgas se hizo necesario diseñar y construir el reactor de alta presión, el fotobiorreactor y la chaqueta de calentamiento. A continuación se detallan todos los procedimientos metodológicos y materiales empleados.

Diseño de reactor

Se optó por el acero 705 para el eje del reactor. Se elaboraron planos y se realizó un análisis de resistencia mecánica, concluyendo que un espesor de 10 milímetros, más un margen de seguridad de 5 mm era adecuado para soportar la presión de 400 bar.

El volumen máximo de producción experimental se estimó en 292 centímetros cúbicos. El reactor de alta presión consta de cuatro partes: la tapa del reactor, el anillo de presión, el cilindro del reactor y la mordaza del reactor (Figura 1).

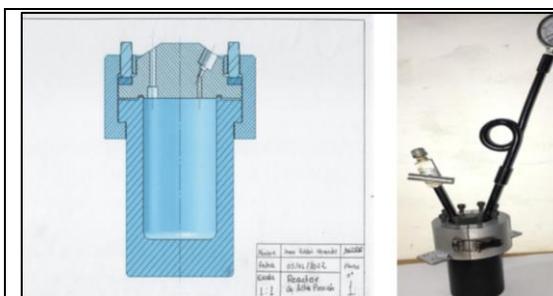


Figura 1. Reactor de alta presión. Plano y foto del reactor.

Tapa del reactor

La tapa del reactor tiene un diámetro exterior de 104 mm y un espesor de 15mm. Cuenta con dos orificios, el primero para colocar un manómetro de hasta 1000 bar de rosca 1/4 , el segundo para colocar una válvula de alta presión de hasta 600 bar. En su parte inferior posee un canal de 5mm de profundidad, 70 mm de diámetro por 3mm de ancho, en el que se coloca un sello de alta presión y temperatura (Figuras 2, 3 y 4).

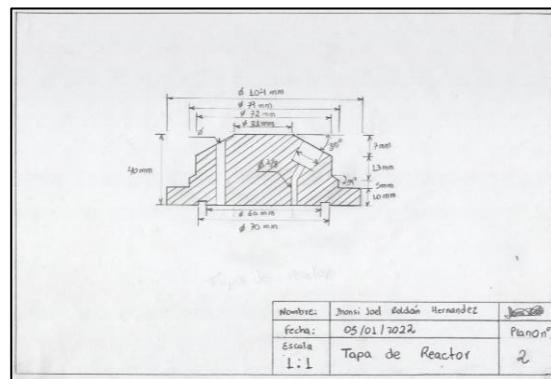


Figura 2. Plano de la tapa del reactor.



Figura 3. Tapa del reactor de alta presión.



Figura 4. Canal donde se coloca sello de alta temperatura.

Anillo de presión de la tapa del reactor

El anillo de presión tiene un diámetro interior de 79 mm y un diámetro exterior de 104 mm con un espesor de 5mm, está montado encima de la tapa y junto con la presión que ejercen los pernos sella el reactor para que no exista fuga de gases (Figura 5).



Figura 5. Vista del anillo de la tapa del reactor.

Reactor

El reactor es un cilindro hueco con un diámetro interior de 60mm y un diámetro exterior de 90 mm, el espesor de pared de 15 mm es capaz de soportar 400 bar de presión. Cuenta con un volumen máximo de trabajo de 292 centímetros cúbicos y una ceja de sujeción de 7mm (Figura 6). Para calcular el espesor de pared se utilizó la siguiente fórmula, la cual ha sido empleada por números autores, entre ellos Bercaw, et al. (2010):

$$e = \frac{P \cdot D}{2 \cdot \sigma}$$

En donde:

e = Espesor de pared

P = Presión de trabajo

D = Diámetro interior

σ = Tensión Admisible

Luego σ :

$$\sigma = \frac{\text{Límite elástico}}{\text{Coeficiente de seguridad}}$$

Calculando:

Límite elástico del acero 705 al carbon 1000 N/mm², coeficiente de seguridad (7)

$$\sigma = \frac{1000 \text{ N/mm}^2}{7} = 142 \text{ N/mm}^2$$

$$P = 400 \text{ bar} = 40 \text{ N/mm}^2 \quad (1 \text{ bar} = 0,1 \text{ N/mm}^2)$$

$$D = 60 \text{ mm}$$

$$e = \frac{40 \text{ N/mm}^2 \times 60 \text{ mm}}{2 \times (142 \text{ N/mm}^2)} = 8,45 \text{ mm} \text{ espesor}$$

necesario para soportar 400 bar

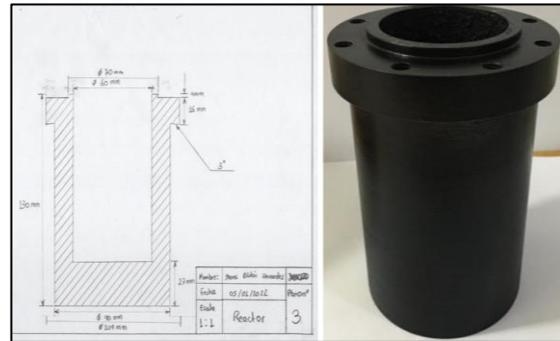


Figura 6. Reactor. Plano y fotos del cuerpo del reactor.

Mordaza del Reactor

Tiene un diámetro exterior de 125 mm, en su parte superior posee 8 agujeros para colocar 8 pernos hexagonales M8 por 25mm. Está partido a la mitad por medio de unos sujetadores mecánicos, el mecanismo muerde el reactor junto con la tapa y el anillo para ejercer una presión de apriete. Cada perno ejerce una fuerza de apriete de 12198 lb y una presión total de apriete de 1208.045 bar ayudando a crear un sello hermético del reactor. Para calcular la presión de los pernos se realizó el siguiente planteamiento.

El área de la zona de apriete es de:

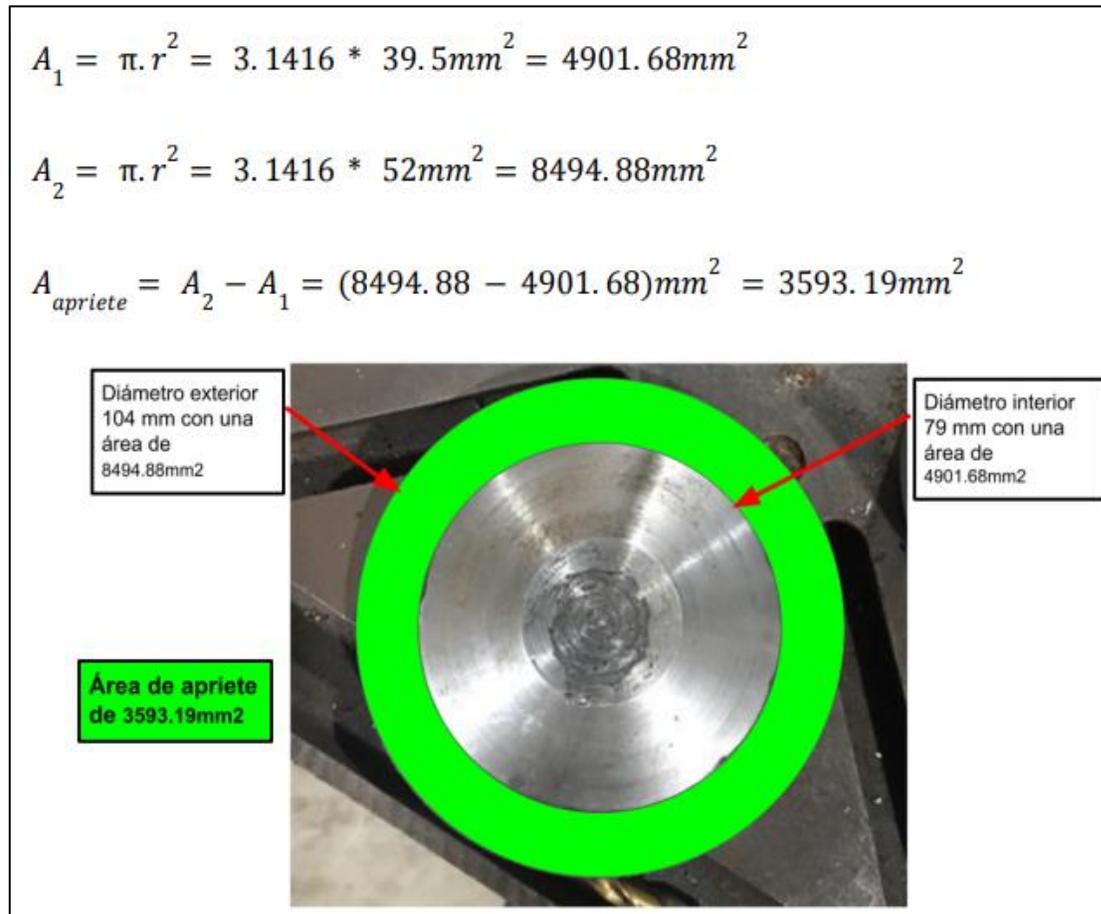


Figura 7. Área de apriete de los pernos junto con la mordaza.

El perno utilizado es M8 YFS 12,9 por lo tanto el apriete de cada perno es de:

El 12 significa la centésima parte de la presión de rotura, es decir:

$$P_{rotura\ de\ perno} = 12 * 100 \frac{N}{mm^2}$$

$$= 1200 \frac{N}{mm^2}$$

El área de apriete de cada perno M8 con un diámetro de 8mm es:

$$A_{perno} = \pi \cdot r^2 = 3.1416 * 16mm^2$$

$$= 50.24mm^2$$

Como presión es igual a fuerza sobre área, necesitamos calcular la fuerza,

$$P = \frac{F}{A} \quad y \quad F = P * A$$

$$F = P * A = 1200 \frac{N}{mm^2} * 50.24mm^2$$

$$= 60288 N$$

60288 N corresponde a la fuerza que ejerce cada perno, sin embargo, el 9 significa el porcentaje máximo de fluencia del acero, es decir el punto máximo en la cual el perno no pierde su elasticidad y vuelve al estado original, por lo tanto:

$$60288 N * 0,90 = 54259,2 N$$

54259,2 N corresponde a la fuerza real de cada perno como son "8" la fuerza total es de 434073,6 N y el área total de apriete es de 3593,19 mm². Por lo tanto, la presión que ejercen los 8 pernos es de:

$$P = \frac{F}{A} = \frac{434073,6 \text{ N}}{3593,19 \text{ mm}^2} = 120,80 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

y,

$$1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 10 \text{ bar}$$

$$120,80 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{10 \text{ bar}}{1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 1208,045 \text{ bar}$$

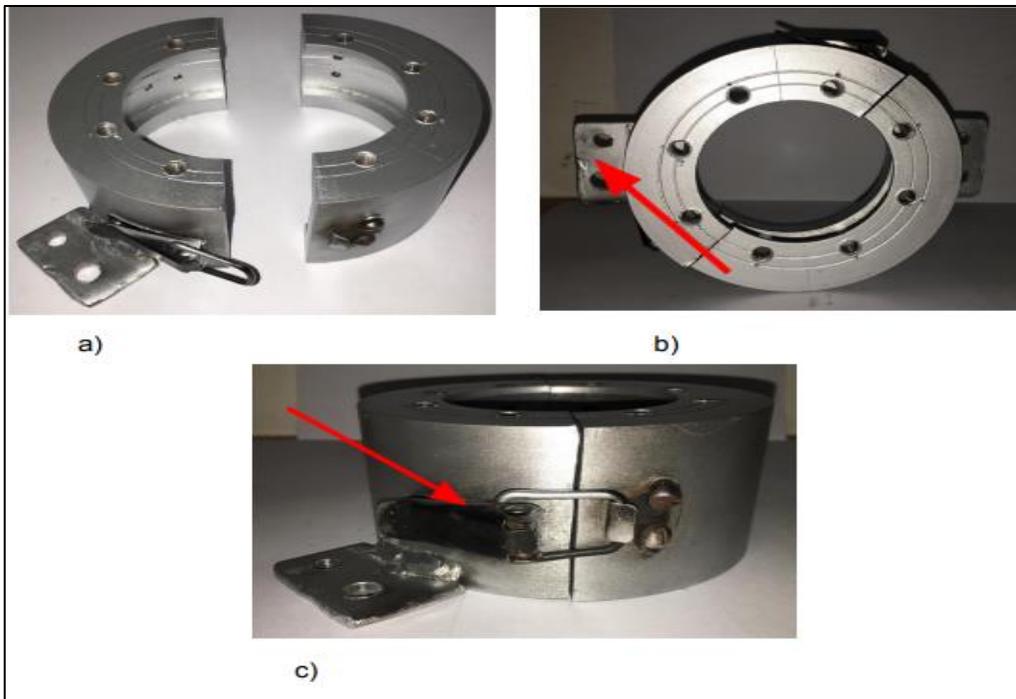


Figura 8. a) mordaza del reactor, se observa los ocho agujeros con hilo M8, b) orejas de sujeción antigiro. c) vinchas de sujeción.

Diseño del fotobiorreactor

Se estableció una intensidad de luz blanca de 2500 lux de una lámpara de 20 watt de potencia, con un difusor de aire atmosférico de 30 micrones, cuenta con cuatro tubos, cada tubo con una altura de 600 mm, un diámetro de 96 mm y un volumen máximo por tubo de 4,343 dm³ (4,343 l) un total de 69.488 dm³ (69,488 l) en todo el sistema (16 fotobiorreactores). Están montados sobre cuatro bases octogonales de 380 mm de lado a lado, con una separación entre base de 150

mm, la base superior tiene cuatro agujeros de 100 mm de diámetro.

La microalga se cultiva cada 15 días, es decir por cada tubo se producen 19,54 gramos o un total de 312.64 gramos en ciclos quincenales de cosecha. Se obtuvieron estos datos del siguiente planteamiento:

Con base a estudios realizados por otros investigadores (Bermúdez *et al.*, 2011; Rubio y Hernández, 2016) se tiene que la productividad de la *Chlorella vulgaris* es de 1 a 2 x 10⁶ células/ml de cultivo, equivalente a 4,5 g/l de biomasa.

$$4.343 \text{ l} \times 4.5 \text{ g/l} = 19.54 \text{ g de biomasa}$$

$$19.54 \text{ g} \times 16 = 312.64 \text{ g de biomasa}$$



Figura 9. Fotobiorreactor.

Diseño de horno eléctrico

Se escogió como base una cocina eléctrica de una hornilla de 1000 wats a la cual se le construyó una chaqueta metálica de tal manera que su interior tuviera un aislante térmico capaz de alcanzar una temperatura máxima de 450°C. Para regular su temperatura se utilizó un controlador KX4N con capacidad máxima de 600°C, un relé de protección de 15 amperios para proteger el equipo, un controlador de tiempo electrónico (que se utiliza para programar el tiempo de proceso), relé sólido de 70 amperios con su respectivo disipador de temperatura (para que haga la función de relé de apagado y encendido de la resistencia eléctrica

de 110 voltios), transformador con una entrada de 110 v CA salida de 12v 2 A CC (este alimenta con 45 12 voltios, 2 amperios al relé sólido) y sensor tipo k con capacidad máxima de 600°C cuya función es medir la temperatura de la resistencia eléctrica. Esta información entra al controlador térmico para regular a un valor establecido. Todos estos accesorios eléctricos y electrónicos se instalaron en un gabinete de madera.

Las especificidades del diseño, de los materiales y equipos se ilustran en las figuras 10, 11, 12 y 13.



Figura 10. Instalación eléctrica de controlador tiempo y temperatura.

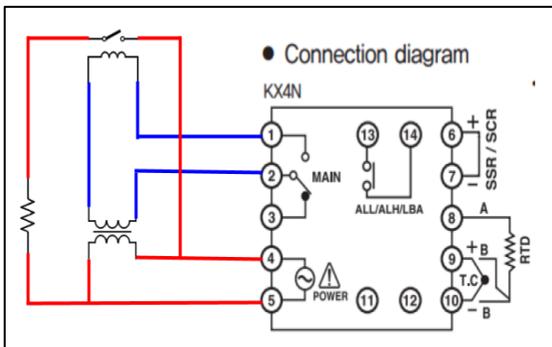


Figura 11. Diagrama de Instalación eléctrica, cada número corresponde a un pin de conexión, pin 1 y 2 contacto abierto cerrado 12v, pin 9 y 10 conexión de sensor de temperatura, pin 4 y 5 entrada 110 v.



Figura 12. Controlador de tiempo, de temperatura y sensor de calor, junto al calentador eléctrico.



Figura 13. Equipo completo en funcionamiento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concentrado de microalga

Se filtró la biomasa de microalgas para obtener un concentrado húmedo (Figura 14), y se colocaron 260 gramos, para utilizarla como materia prima en el reactor de alta presión.



Figura 14. Concentrado de microalga, se observa cómo es vertida en el reactor.

Primera prueba

En la primera prueba se colocó microalga filtrada en el reactor y se sesteó el controlador de temperatura a 300°C (Figura 15), después de 1 hora y 27 minutos alcanzando una presión de 100 bar, obteniéndose biocarbón, gas de combustión y algunos compuestos orgánicos disueltos en agua (Tabla 1).



Figura 15. Reactor cargado, se observa la presión de 110 bar en el manómetro.

Tabla 1. Resultados en masa porcentajes de la prueba 1.

Elementos	Primera Prueba	
	260ml o 350g 100 bar 300 grados durante 1:30 horas de trabajo	Porcentaje
líquido	150	43%
Bio petróleo	34	10%
Bio carbón	54	15%
Gas	112	32%
Total	350	100%

Se evidenció que el aumento de la presión repercute en la calidad de los productos, a medida que aumenta la presión la celulosa se despolimeriza y el agua se vuelve solvente cediendo su molécula de hidrógeno que luego se polimeriza en compuesto alquenos para formar biopetróleo.

Segunda prueba

En la segunda prueba se sesteó el controlador de temperatura a 350°C, después de 3 horas 30 minutos, alcanza una presión de 250 bar, se obtuvo gas combustible, compuestos orgánicos disueltos en agua y biopetróleo (Figuras 16, 17 y Tabla 2).



Figura 16. En la izquierda se observa que el manómetro alcanza 250 bar o 3700 psi, a la derecha biopetróleo obtenido.



Figura 17. Porción de biopetróleo crudo.

CONCLUSIONES

Las publicaciones científicas existentes permitieron tener la base de referencia adecuada para proceder con el diseño de la línea de proceso basado en el funcionamiento adecuado del fotobiorreactor y el reactor de alta presión. Aun cuando durante la construcción de los reactores para la planta piloto se observaron dificultades por las elevadas presiones y altas temperaturas que se manejan, se logró superar los obstáculos al desarrollar el diseño ingenieril adecuado pudiéndose obtener el

biopetróleo como una fuente de energía renovable.

A 250 bar y 350°C se obtuvo la mayor cantidad de petróleo, al contener la biomasa de microalga gran porcentaje de aceites el petróleo obtenido es de gran calidad. No obstante, deberá realizarse una prueba para la caracterización del producto crudo a fin conocer los derivados, la calidad y cantidad que se podrían obtener de esta materia prima.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bercaw, J. E., Durrell, A. C., Gray, H. B., Green, J. C., Hazari, N., Labinger, J. A., & Winkler, J. R. (2010). Electronic structures of PdII dimers. *Inorganic chemistry*, 49(4), 1801-1810. <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ic902189g>
- Bermúdez, L. M. S., Landínez, D. M. R., Sáenz, E. R. S., Carvajal, O. M. S., Sierra, C. A. Á., Parra, J. M. T., ... & Silva, R. D. G. (2011). Efecto del hierro

en el crecimiento y acumulación de lípidos en la microalga colombiana *Chlorella Vulgaris* LAUN 0019. *ITECKNE: Innovación e Investigación en Ingeniería*, 8(1), 15-22. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4991541>

Chicaiza, C. (2017). Diseño y construcción de un prototipo de fotobiorreactor discontinuo a escala laboratorio para la producción de biomasa algal.

- Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Facultad de Ciencias, Escuela de ciencias químicas.
- Díaz-Arias, A. A. (2022). Biogás: una fuente de energía para las generaciones futuras en la era post-petrolera. *Agroindustria, Sociedad y Ambiente*, 2(19), 104-122.
<https://revistas.uclave.org/index.php/asa/article/view/4222>
- Flores Paltán, F. G., & Velín Sagbay, J. P. (2014). *Diseño y construcción de un BIORREACTOR anaerobio en fase líquida para tratar aguas residuales de curtiembre. Tesis de grado*. [Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador]. Repositorio institucional de la U Espoch.
<http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/3500>
- Frine, H. (2021). Diseño de un prototipo de fotobiorreactor para el cultivo de algas con dióxido de carbono que servirá como materia prima para la generación de biocombustible en la ciudad de Manta”. Ecuador. Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí.
- Garzón-Oechsle, A., Johanson, E., & Martínez, V. (2023). Los manteños de Bola de Oro y su resiliencia al cambio climático: reconstrucción cronológica de modificaciones agrícolas a través de modelado de edad-profundidad y análisis de abundancia de carbón. *STRATA*, 1(2), e11-e11.
<https://revistas.patrimoniocultural.gob.ec/ojs/index.php/Strata/index>
- Gonzales, A. (2015). ¿Qué son las microalgas interés y uso? Pág. 4. octubre. URL:
<https://www.cajamar.es/storage/documents/microalgas-1444391623-ca345.pdf>.
- Jiménez, D. y Montalván, P. (2018). Diseño y prueba piloto de un reactor tubular cerrado de microalgas de alta tasa para el tratamiento de aguas residuales y recuperación de recursos. Cuenca: Universidad de Cuenca.
- Jiménez, M., & Castillo, A. (2021). Biomasa microalgal con alto potencial para la producción de biocombustibles. *Scientia Agropecuaria*, 12 (2), 265-282.
<http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S2077->

- 99172021000200265&script=sc
i_arttext&tlng=en
- Remon, J. (2019). Producción de biocombustibles y productos de valor añadido mediante licuefacción hidrotérmica de pericarpios de almendras: Instituto de Carboquímica (ICB). Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Zaragoza España
- Rubio-Fernández, D., & Alejandro Hernández, G. (2016). Evaluación de las incidencias de salinidad y pH sobre la biomasa, productividad y acumulación de lípidos en cultivos de *Chlorella vulgaris* en un fotobiorreactor de placa plana. *Iteckne*, 13(1), 44-56. http://www.scielo.org.co/scielo.php?pid=S1692-17982016000100006&script=sc_i_arttext
- Rubio Fernández, D., Sierra Herrera, J. A., Ruiz Fonseca, S., & Sandoval Herrera, J. A. (2022). Design of a Bench-Scale Airlift Photobioreactor. <https://alejandria.poligran.edu.co/handle/10823/6256>
- Saldaña, A. G., Méndez, V. A., & Alejandro, H. M. (2023). La dialéctica de los cambios ambientales El antagonismo del cambio climático. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1), 2656-2670. <https://ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/4614>
- Usi, E. (2008). ¿Cuándo se acabará el petróleo? <https://www.dw.com/es/cu%C3%A1ndo-se-acabar%C3%A1-el-petr%C3%B3leo/a-3036853>.
- Yoandy, G. (2019). Diseño y simulación de un fotobiorreactor para el cultivo de la microalga *Chlorella Vulgaris*. *Ingeniería Mecánica*, vol. 22, núm. 3, pp. 169-177,
- Zúñiga, P. I. V., Cedeño, R. J. C., & Palacios, I. A. M. (2023). Metodología de la investigación científica: guía práctica. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(4), 9723-9762. <https://www.ciencialatina.org/index.php/cienciala/article/view/7658>