

**Diseño y construcción de una planta piloto para la obtención de biocombustible a partir del cultivo microalgas como una fuente de energía renovable**

*Design and construction of a pilot plant for obtaining biofuel from cultivation of microalgae as a source of renewable energy*

Jouber Antonio Azua-Alvia<sup>1</sup>, Jhonsy Joel Roldan-Hernández<sup>2</sup>

**RESUMEN:**

Ante los problemas que representa el calentamiento global debido a los gases de efecto invernadero y un futuro muy cercano en el que las principales reservas de petróleo del mundo se agotan, el uso de energías renovables y respetuosas con el medio ambiente se hace imprescindible. Gracias a los avances tecnológicos que tenemos en la actualidad es posible explorar nuevos desafíos en cuanto a la producción de energía, por lo que se ha considerado realizar la investigación sobre el uso de microalgas como biomasa para la producción de biopetróleo. Estas microalgas se desarrollan con el consumo de dióxido de carbono y determinados componentes de las aguas residuales ayudando a la mitigación de la contaminación ambiental. Durante el desarrollo del estudio, para la obtención de la materia prima se cultivaron las microalgas en condiciones autótrofas. El concentrado húmedo que se obtuvo por filtración del medio acuoso de las microalgas, se sometió a un proceso de licuefacción hidrotérmica a presión de 250 bar y 350 °C para la obtención de biocarbón, biogás, compuestos orgánicos disueltos en agua y biopetróleo. Se evidenció que el aumento de presión tiene un impacto en la calidad de los productos.

**Palabras claves:** Microalgas, Biopetróleo, Fotobiorreactor, Reactor de Alta Presión.

**Recibido 19 de noviembre de 2023; revisión aceptada 12 de abril de 2024**

**ABSTRACT:**

*Given the problems represented by global warming due to greenhouse gases and a very near future in which the world's main oil reserves are depleted, the use of renewable and environmentally friendly energies becomes essential. Thanks to the technological advances we currently have, it is possible to explore new challenges in terms of energy production, which is why research has been considered on the use of microalgae as biomass for the production of bio-oil. These microalgae develop with the consumption of carbon dioxide and certain components of wastewater, helping to mitigate environmental pollution. During the development of the study, to obtain the raw material,*

---

<sup>1</sup> Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, Manta, Ecuador, [jouber.azua@uleam.edu.ec](mailto:jouber.azua@uleam.edu.ec)

<sup>2</sup> UnidadEducativa Particular Lev Vygotsky, Manta, Ecuador, [jhonx\\_rolدان@hotmail.com.ar](mailto:jhonx_rolدان@hotmail.com.ar)

*the microalgae were grown under autotrophic conditions. The wet concentrate obtained by filtration of the aqueous medium of the microalgae was subjected to a hydrothermal liquefaction process at a pressure of 250 bar and 350 °C to obtain biochar, biogas, organic compounds dissolved in water and bio-oil. It was evident that the increase in pressure has an impact on the quality of the products.*

**Keywords:** *Microalgae, Biooil, Photobioreactor, High Pressure Reactor*

## **1. 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, político y económicos sobre las alternativas que se podrían poner en práctica. Para entender mejor el problema debemos conocer que este fenómeno climático tiene su origen por el aumento en la atmosfera de los gases que producen el efecto invernadero (dióxido de carbono, metano, óxido nitroso, entre otros). Estos gases hacen que la radiación térmica emitida por la Tierra queda atrapada en la atmósfera aumentando paulatinamente su temperatura a nivel global [1].

Según expone el Margarita Caballero [2] “el CO<sub>2</sub> que fue secuestrado durante millones de años, como es el caso del carbón o el petróleo, es ahora regresado a la atmósfera de manera rápida en unas pocas décadas, incrementando sustancialmente los niveles de CO<sub>2</sub> en la atmósfera” (pag. 7), lo que nos obliga a pregonarnos que estamos haciendo para evitar la emisión de este gas o que podemos hacer para nuevamente captarlo con el uso de los avances tecnológicos con los que contamos actualmente.

También es importante reflexionar que el Ecuador de ser un país exportador de crudo de petróleo y que muy poco lo industrializó, 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 planeta con el paso del tiempo, según la periodista Eva Usi del canal DW, “los medios alemanes se hacen eco de un estudio publicado por la Organización de Países Productores de Petróleo, OPEP, que afirma que las reservas de la organización no durarán mucho y bien podrían fallar sus suministros hacia el 2037” [3].

Desde el uso en la generación de energía, pasando por la limpieza del medio ambiente al adsorber el dióxido de carbono de la atmosfera y purificando 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 los científicos numerosos líneas de investigación, (Alicia Gonzales, pag. 4). Esto conlleva dos

posibilidades con el uso de las microalgas, por un lado la generación de energía mediante la licuefacción hidrotérmica de esta biomasa para la generación de bio petróleo y por otro lado el disminuir la presencia de un gas de efecto invernadero como es el dióxido de carbono [4].

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. 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, en esta investigación se estudiará el método de licuefacción hidrotérmica, pero antes de iniciar el proceso se tienen que diseñar y construir los equipos necesarios para este proceso, el cual consta de tres equipos principales: Reactor de alta presión, fotobiorreactor y chaqueta de calentamiento [5]. 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. El resultado final es un bio petróleo que se puede refinar para obtener derivados de diferentes características según el tipo [6], [7].

### **Objetivo**

Diseñar una planta piloto para la producción de biocombustible a base de microalgas, para demostrar que es posible desarrollar en nuestro medio una tecnología innovadora para la generación de energía renovable y que a la vez ayude en la mitigación de impacto ambiental.

## **2. METODOLOGÍA**

Para poder demostrar la aplicación de la licuefacción hidrotérmica en la biomasa proveniente de las microalgas debemos diseñar y construir el reactor de alta presión, el fotobiorreactor y la chaqueta de calentamiento [8].

### **2.1. Diseño de reactor**

Se seleccionó el acero 705 en eje, para la construcción del reactor, se realizaron los planos y un análisis de resistencia mecánica del reactor, se llegó a la conclusión de que un espesor de 10 milímetros más un factor de seguridad 5mm era apropiado para soportar la presión de 400 bar, con un volumen máximo de producción experimental de 292 centímetros cúbicos, El reactor de alta presión comprende cuatro partes: tapa de reactor, anillo de presión, cilindro del reactor, mordaza del reactor.

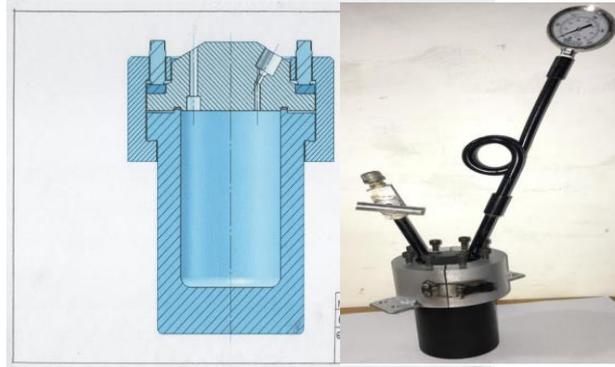


Figura 1. Reactor de alta presión. Plano y foto del reactor.

### 2.1.1. 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 cual se coloca un sello de alta presión y temperatura.

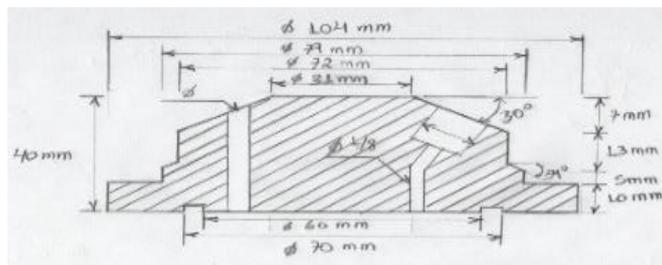


Figura 2. Plano de la tapa del reactor



Figura 3. Tapa del reactor de alta presión.



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

### 2.1.2 Anillo de presión

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.** Anillo de la tapa del reactor.

### 2.1.3 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 7 mm.

Para calcular el espesor de pared se utilizó la siguiente fórmula:

$$e = \frac{P \cdot D}{2 \cdot \sigma} \quad (1)$$

En donde:

$e$  = Espesor de pared; (m).  $P$  = Presión de trabajo; (m).  $D$  = Diámetro interior; (m).

$\sigma$  = Tensión Admisible; (m).

Luego  $\sigma$  :

$$\sigma = \frac{\text{Límite elástico}}{\text{Coeficiente de seguridad}} \quad (2)$$

Calculando:

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

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

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

$$e = \frac{40 \text{ N/mm}^2 \times 60 \text{ mm}}{2 \times (142 \text{ N/mm}^2)} = 8.45 \text{ mm} \text{ espesor necesario para soportar } 400 \text{ bar}$$



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

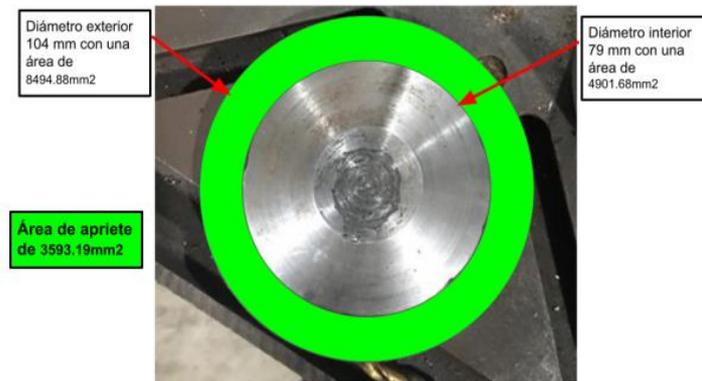
#### 2.1.4 Mordaza del Reactor

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.

$$A_1 = \pi \cdot r^2 = 3.1416 * 39.5mm^2 = 4901.68mm^2$$

$$A_2 = \pi \cdot r^2 = 3.1416 * 52mm^2 = 8494.88mm^2$$

$$A_{\text{apriete}} = A_2 - A_1 = (8494.88 - 4901.68)mm^2 = 3593.19mm^2$$



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:

$$P_{\text{rotura de perno}} = 12 * 100 \frac{N}{mm^2} = 1200 \frac{N}{mm^2} \quad (3)$$

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

$$A_{\text{perno}} = \pi \cdot r^2 = 3.1416 * 16mm^2 = 50.24mm^2 \quad (4)$$

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

$$P = \frac{F}{A} \quad (5)$$

$$F = P * A = 1200 \frac{N}{mm^2} * 50.24mm^2 = 60288 N$$

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

$$60288 N * 0.90 = 54259.2 N$$

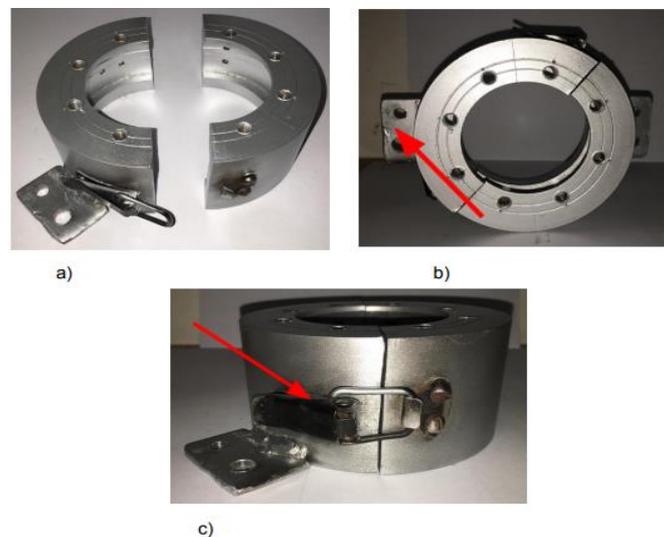
54259.2 N corresponde a la fuerza real de cada perno como son “8” la fuerza total es de 434073.6 N y el área total de apriete es de 3593,19 mm<sup>2</sup>.

Por lo tanto, la presión que ejercen los 8 pernos es de,

$$P = \frac{F}{A} = \frac{434073.6 \text{ N}}{3593,19 \text{ mm}^2} = 120.80 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

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

$$120.80 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} \cdot \frac{10 \text{ bar}}{1 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}} = 1208.045 \text{ bar}$$



**Figura 8.** a) Mordaza del reactor, se observa los ocho agujeros con hilo M8, b) Orejas de sujeción antigiro. c) Vinchas de sujeción.

## 2.2 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 dm<sup>3</sup> (4.343 l) un total de 69.488 dm<sup>3</sup> (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 cuatros 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 se tiene que la productividad de la *chlorella vulgaris* es de 1 a 2 x 10<sup>6</sup> células/ml de cultivo, equivalente a 4,5 g/l de biomasa.

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

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

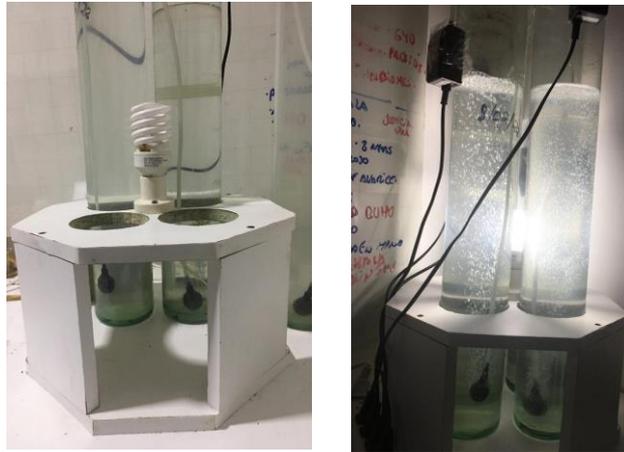


Figura 9. Fotobiorreactor.

### 2.3 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 tenga un aislante térmico, capaz de alcanzar una temperatura máxima de 450 grados centígrados. Para regular su temperatura se utilizó un controlador de temperatura KX4N con capacidad máxima de 600 grados, 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 transformador alimenta con 45 12 voltios, 2 amperios al relé sólido) y sensor tipo k con capacidad máxima de 600 grados centígrados (cuya función es medir la temperatura de la resistencia eléctrica), esta información entra al controlador de temperatura para regular a un valor establecido. Todos estos accesorios eléctricos y electrónicos se instalaron en un gabinete de madera.



Figura 10. Instalación eléctrica de controlador de tiempo y temperatura.

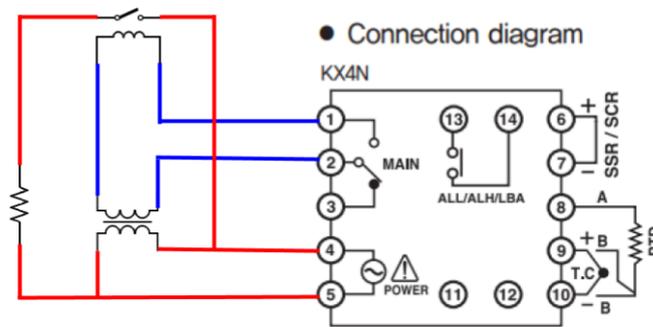


Figura 11. Diagrama de Instalación eléctrica, pin 1 y 2 contacto/abierto cerrado 12v, pin 9 y 10 conexión de sensor de temperatura, pin 4 y 5 entrada 110 v.



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



**Figura 13.** Equipo completo en funcionamiento.

### 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 3.1. Concentrado de microalga

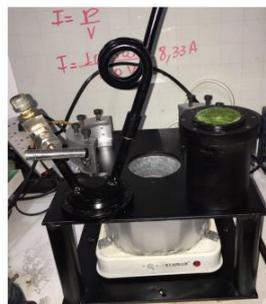
Se filtró la biomasa de microalgas para obtener un concentrado húmedo, y se colocaron 260 gramos, para utilizarla como materia prima en el reactor de alta presión.



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

#### 3.2. Primera Prueba

En la primera prueba se colocó microalga filtrada en el reactor y se seteo el controlador de temperatura a 300 grados, después de 1 hora y 27 minutos alcanza una presión de 100 bar, obteniéndose bio carbón, gas de combustión y algunos compuestos orgánicos disueltos en agua.



**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%

### 3.3. Segunda Prueba

En la segunda prueba se seteo el controlador de temperatura a 350 grados, después de 3 horas 30 minutos, alcanza una presión de 250 bar, se obtuvo gas combustible, compuestos orgánicos disueltos en agua y biopetróleo.

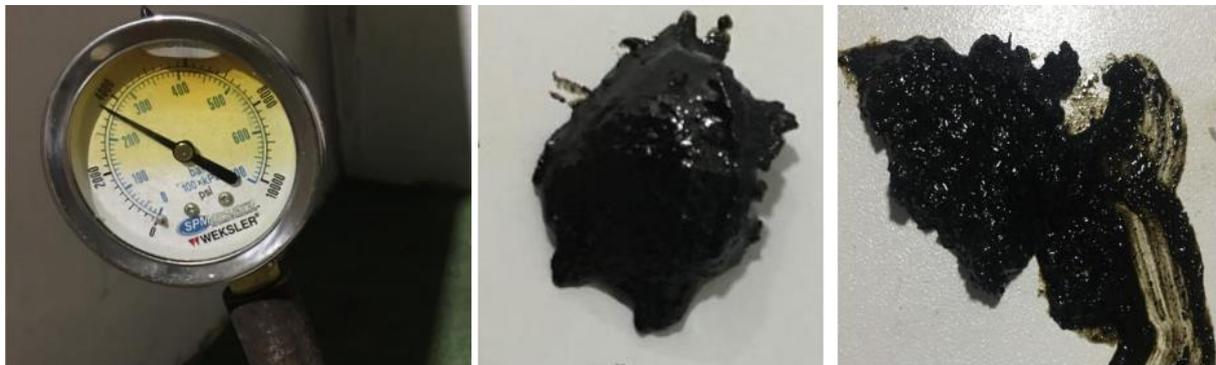


Figura 16. En la izquierda se observa que el manómetro alcanza 250 bar o 3700 psi, a la derecha bio petróleo obtenido.



Figura 17. Bio petróleo crudo.

Tabla 2. Resultados en masa porcentajes de la prueba 2.

Elementos	Segunda Prueba	
	260ml o 350g 250 bar 350 grados durante 3:30 horas de trabajo	Porcentaje
líquido	95	27%
Bio petróleo	132	38%
Bio carbón	25	7%
Gas	98	28%
Total	350	100%

Se evidencio 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 bio petróleo.

#### 4. 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 grados centígrados se obtuvo la mayor cantidad de petróleo, al contener la biomasa de microalga gran porcentaje de aceites el petróleo obtenido es de gran calidad.
- Se deberá realizar prueba para la caracterización del producto crudo a fin conocer los derivados, la calidad y cantidad que se podrían obtener de esta materia prima.

#### 5. BIBLIOGRAFÍA

1. Caballero, M., Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la vida. Revista digital universitaria. 10 de octubre del 2007. ISSN: 1067-6079.
2. Usí, E., ¿Cuándo se acabará el petróleo? pág. 1.03 de enero 2008. 27 de noviembre 2023 URL:<https://www.dw.com/es/cu% C3% A1ndo-se-acabar% C3% A1-el-petr% C3% B3leo/a-3036853>.

**CIYA. Ciencias de la ingeniería y Aplicadas, vol. 8 N° 2, julio-diciembre de 2024, pp. 97-110**

3. Gonzales, A., ¿Qué son las microalgas interés y uso? Pág. 4. octubre 2015. 27 de noviembre 2023 URL: <https://www.cajamar.es/storage/documents/microalgas-1444391623-ca345.pdf>.
4. Remon, J., Producción de biocombustibles y productos de valor añadido mediante licuefacción hidrotérmica de pericarpios de almendras. 36 Jornadas Nacionales de Ingeniería Química. Vol. XXXVI Zaragoza del 4 al 6 de septiembre de 2019. Servicio de Publicaciones de la Universidad de Zaragoza, 2019. - 274 p. ISBN: 978-84-16723-69-0.
5. Manuel, J. y Augusto C. Biomasa microalga con alto potencial para la producción de biocombustibles. scielo. Scientia Agropecuaria vol.12 no.2 Trujillo abr./jun 2021. 2021. ISSN: 2077-9917.
6. Jimenez, D. y Montalvan P., Diseño y prueba piloto de un reactor tubular cerrado de microalgas de alta tasa para el tratamiento de aguas residuales y recuperación de recursos, 2018, [Tesis de grado, Repositorio institucional Universidad de Cuenca.] <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/30288>.
7. Liliana, Yadenis O, Lilisbeth Tormos. Efecto del pH sobre el crecimiento y viabilidad celular de una cepa local de *Chlorella vulgaris* Beijerinck. Vol.41 no.2 Santiago de Cuba mayo.-ago. 2021 Epub 30-Jul-2021. versión On-line. ISSN: 2224-6185.
8. Daniela, G., Temperatura del cultivo mixto de *chlorella vulgaris* a cielo abierto: incidencia en la concentración de biomasa. RTQ vol.39 no.3 Santiago de Cuba sept.-dic. 2019. Versión On-line ISSN: 2224-6185.