

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

**"DISEÑO DE UN FOTOBIOREACTOR INDUSTRIAL PARA CULTIVO DE  
MICROALGAS DESTINADAS A LA PRODUCCIÓN DE BIODIESEL EN  
LA CIUDAD DE GUAYAQUIL"**

**TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN**  
Materia Integradora

Previo la obtención del Título de:  
**INGENIERO MECÁNICO**

Presentado por:  
Fernando Raúl Alvear Cervantes

GUAYAQUIL - ECUADOR  
Año: 2015

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por sus bendiciones diarias, al Dr. Alfredo Barriga, Msc Sonia Guartatanga, Ing. Juan Peralta, Ing. César Moreira, Ing. Jorge Roca y personal del CAMPRO y del Laboratorio de Control Automático y Procesos de la FIMCP; a mis Padres, familiares y demás seres queridos.

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

Fernando Raúl Alvear C. (Autor)

Ing. Mario Rodrigo Patiño A. (Tutor)

y el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.



---

Fernando Alvear C.



---

Ing. Mario Patiño A.

## RESUMEN

El siguiente trabajo de titulación dentro de la Materia Integradora pretende desarrollar el diseño de un sistema de cultivo intensivo de biomasa alternativa (microalgas) lo que llamaremos fotobiorreactor, para la producción de biocarburantes con el propósito de reemplazar el diésel proveniente de los combustibles fósiles y las otras fuentes de biodiesel tales como la soya, caña de azúcar, maíz y demás aceites y grasas animales y vegetales. Adicionalmente se describirán de manera breve a las características de las microalgas más utilizadas para la producción de biodiesel de las cuales se considerará el porcentaje en lípidos por peso seco. Conociendo las características para el cultivo intensivo necesarias de la cepa seleccionada y luego de haber seleccionado el tipo de fotobiorreactor donde se las cultivará y sabiendo además la demanda de combustible, se determinará mediante un programa basado en Excel el número de fotobiorreactores que serán necesarios además de las dimensiones del terreno que ocuparían los mismos junto con el tanque de almacenamiento de agua para cada fotobiorreactor. Se presentará los planos de diseño del fotobiorreactor junto con el tanque de almacenamiento de agua y la distribución del sistema de iluminación. Para determinar la demanda de biodiesel se tomará como referencia el consumo de Diesel promedio que según estudios realizados podrían tener 2 turbinas de una central termoeléctrica de la ciudad de Guayaquil para su arranque ya que dichas turbinas una vez que adquirieron movimiento consumen bunker. Se está asumiendo un 100% de eficiencia en los procesos que ocurren después del cultivo de la microalga como son la recolección, secado, prensado, obtención de aceite y la posterior transesterificación; es decir la presente tesis sólo abarcará los parámetros fluido dinámicos del sistema de cultivo intensivo basándose en una cantidad calculada de la ecuación de la transesterificación de ácidos grasos.

**Palabras clave:** fotobiorreactor, microalga, biodiesel, energía renovable.

## ABSTRACT

The following Integrative Matter work degree aims to develop the design of a system of intensive cultivation of an alternative raw material (microalgae) for the production of biofuels in order to replace the diesel from fossil fuels and other sources of biodiesel such as rice, soybeans, sugar cane, corn and other animal and vegetable oils and fats. Additionally briefly be described more microalgae used for biodiesel production which is considered the percentage by dry weight lipid manner. Knowing the characteristics for intensive cultivation necessary for the selected and after selecting the type of photobioreactor where they were cultivated and well knowing fuel demand, strain will be determined by a method based on Excel the number of photobioreactors that will be needed in addition to program the dimensions of which occupy the same land with the water storage tank for each photobioreactor. Building plans photobioreactor with the water storage tank and distribution of the lighting system will be detailed. To determine the demand for biodiesel will take the average diesel consumption according to studies may have 2 turbines of a power plant in the city of Guayaquil to begin to work. Once they acquired movement the turbines start to consume bunker. Mass losses occurring after cultivation of microalgae such as harvesting, drying, pressing, oil extraction and subsequent transesterification will not be considered. This project only covers those fluid dynamic parameters intensive cultivation system based on the equation of the transesterification of fatty acids.

**Keywords:** photobioreactor, microalgae, biodiesel, renewable energy

# ÍNDICE GENERAL

## Contenido

ABREVIATURAS.....	VIII
SIMBOLOGÍA.....	IX
<b>INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>1</b>
1.1. Descripción del problema.....	1
1.2. Objetivos. ....	1
1.3. Definición de Microalgas. ....	2
1.4. Definición de Fotobiorreactor. ....	5
1.5. Tipos de fotobiorreactores.....	5
1.5.1. Fotobiorreactores Tubulares.....	5
1.5.2. Fotobioreactores Planos .....	6
1.5.3. Cilindros verticales y fundas .....	7
1.6. Elementos auxiliares y complementarios en los sistemas de fotobiorreactores. ....	8
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>10</b>
<b>METODOLOGÍA DE DISEÑO</b> .....	<b>10</b>
2.1. Criterios generales de Diseño.....	10
2.2. Variables de Diseño .....	13
2.2.1. Razón superficie sobre volumen (s/v).....	13
2.2.2. Orientación e inclinación.....	13
2.2.3. Control de la cantidad de oxígeno. ....	13
2.2.4. Mezcla .....	14
2.2.5. Control de temperatura .....	15
2.2.6. Iluminación.....	15
2.3. Materiales.....	16
2.4. Productividad en fotobioreactores.....	16
2.5. Tipo de Fotobiorreactor seleccionado y principio de operación .....	18
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>22</b>
<b>CÁLCULOS, PRESUPUESTO GENERAL DE CONSTRUCCIÓN Y SELECCIÓN DEL TERRENO DE TRABAJO.</b> .....	<b>22</b>
3.1. Estimación de la cantidad de ácidos grasos. ....	22

3.2. Dimensiones del Fotobioreactor.....	23
3.3. Bomba.....	26
3.4. Tanque de Agua.....	27
3.5. Exposición a la Luz. ....	28
3.6. Abastecimiento de CO <sub>2</sub> .....	30
3.7. Presupuesto General de Construcción .....	30
3.8. Selección del terreno de trabajo.....	31
<b>CAPÍTULO 4</b> .....	<b>33</b>
<b>DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES</b> .....	<b>33</b>
4.1. Conclusiones.....	33
4.2. Recomendaciones. ....	34
<b>Bibliografía</b> .....	<b>36</b>
<b>APÉNDICE A</b> .....	<b>38</b>
<b>APÉNDICE B</b> .....	<b>46</b>
<b>PLANOS ESQUEMÁTICOS</b> .....	<b>46</b>
.....	47

## ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM	American Society for Testing and Materials
FBR	Fotobioreactor
FIMCP	Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción
CAMPRO	Campo Avanzado de Mecanización y Prototipos
ANSI	American National Standards Institute
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
LNEG	Laboratorio Nacional de Energía y Geología
PVC	Polivinil Cloruro
PH	Potencial de Hidrógeno
PV	Productividad Volumétrica
PA	Productividad por Área
PAI	Productividad por Área Iluminada
DC	Densidad Celular Máxima Alcanzada
ADC	Alta Densidad Celular
UADC	Ultra Alta Densidad Celular
PMMA	Polimetacrilato
UNC	Unificado Normal

## SIMBOLOGÍA

d	día
h	hora
min	minuto
s	segundo
m	metro
cm	centímetro
mm	milímetro
µm	micrómetro
nm	nanómetro
“	pulgadas
in	pulgadas
ft	pies
m <sup>2</sup>	metro cuadrado
m <sup>3</sup>	metro cúbico
ha	hectárea
l	litro
gal	galon
gpm	galones por minuto
kg	kilogramo
g	gramo
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
psi	pound per square inch
klux	kilos lux
lm	lúmenes

W	wattios
kW	kilowattios
v	voltios
hp	horse power
\$	dólares

# ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.3-1. Cepas de chlorella de la algoteca de LNEG, Unidad de Bioenergía, Lisboa – Portugal.</b> .....	3
<b>Figura 1.3-2 Morfología de la Chlorella sp. vista al microscopio.</b> .....	4
<b>Figura 1.5-1 Fotobiorreactor tubular helicoidal de 1000 L en Murdoch University (Australia).</b> .....	6
<b>Figura 1.5-2 . Fotobiorreactor Placas Planas</b> .....	7
<b>Figura 2.1-1 Diagrama de Diseño de Fotobiorreactores.</b> .....	11
<b>Figura 2.1-2 Esquema representativo de diferentes configuraciones de fotobiorreactores. Sistema airlift (A), columna de burbujeo (B), tubular horizontal (C), tubular helicoidal (D), superficie plana (flat plate) (E), tanque agitado (F), tipo híbrido (G). ( Ramírez Mérida, Queiroz Zepka, &amp; Jacob-Lopes, 2002)</b> .....	12
<b>Figura 2.2.6-1 Trayectoria de la luz y de los ciclos luz/oscuridad</b> .....	16
<b>Figura 2.6-1 Ejemplo del tipo de fotobiorreactor a diseñar para el presente proyecto integrador.</b> .....	19
<b>Figura 2.6-2 Rotámetro con transmisor por microprocesador</b> .....	20
<b>Figura 2.6-3 Medidor de PH de 1 canal</b> .....	20
<b>Figura 2.6-4 Caudalímetro Electromagnético.</b> .....	21
<b>Figura 3.2-1 Diagrama de cuerpo libre de una sección de un tubo de 2 m de largo en funcionamiento.</b> .....	25
<b>Figura 3.8-1 Vista panorámica de las centrales Gonzalo Zevallos, Salitral, Aníbal Santos y del posible terreno disponible para el cultivo de algas.</b> .....	32
<b>Figura A-4.2-1 Parte superior del tanque en donde se ve el esquema de la regulación de inyección de CO<sub>2</sub>.</b> .....	41
<b>Figura A-4.2-2 Proceso de obtención de bio-diesel a partir de las algas.</b> .....	42
<b>Figura 4.2-4 Vista inferior en rayos X del tanque sin conectar al fotobiorreactor.</b> .....	43
<b>Figura 4.2-5 Plataforma de Descanso, jaula de protección y escalera diseñados conforme a las normas OSHA y ANSI 14.3 – 1974 respectivamente.</b> .....	44

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.3-1 Porcentaje de contenido de aceites de algunos géneros de algas .....	4
Tabla 2.1-1 Combinaciones de diferentes tipos e inclinaciones existentes de fotobiorreactores. .....	10
Tabla 2.5-1 Distintos tipos de fotobiorreactores y sus usos .....	17
Tabla 3.7-1 Presupuesto de construcción de un FBR de 200m <sup>2</sup> . .....	31
Tabla A-4.2-1 Rubros de consumo de la Tv- 2 Abril 1999 - Abril 2000 .....	39
Tabla A-4.2-2 Rubros de consumo de la Tv- 3 Abril 1999 - Abril 2000 .....	39
Tabla A-4.2-3 Parámetros climáticos promedio de Guayaquil .....	40

## ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1 Elementos auxiliares y complementarios.....	47
Plano 2 Vistas isométricas del fotobiorreactor.....	48
Plano 3 Coraza y Tanque de Mezcla.....	49

# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN, OBJETIVOS Y MARCO TEÓRICO

### 1.1. Descripción del problema.

Se conoce que los combustibles fósiles son un recurso finito en declive, y que además desde la última mitad del siglo pasado se vienen investigando diferentes fuentes energía renovables y lo más ecológica posible.

La producción de biocarburantes con el propósito de reemplazar el diésel se considera otra forma de energía renovable. En la actualidad el biodiesel se obtiene a partir de grasas animales y aceites vegetales provenientes de la soya, arroz, maíz, caña de azúcar, palma africana, entre otras. Las microalgas a diferencia de las materias primas anteriormente mencionadas presentan un alto grado de crecimiento de biomasa y productividad de aceite. Asimismo pueden ser cultivadas en espacios confinados y controlados (fotobiorreactores).

Cabe mencionar que un aspecto importante a considerar en el diseño y posterior puesta en operación de un sistema de cultivo masivo dentro de una biorefineria, es lo concerniente al diseño y comportamiento fluido dinámico de los fotobiorreactores como un elemento del sistema. El presente proyecto se enmarcara en el contexto fluido dinámico del conjunto y no propiamente del aspecto biológico, para lo cual se empleará la información recopilada en la revisión bibliográfica.

### 1.2. Objetivos.

- Diseñar un sistema de cultivo intensivo de microalgas que luego de su recolección serán destinadas para la producción de biocarburantes.

- Seleccionar una especie adecuada para cultivar rica en porcentaje de lípidos sobre peso seco, de fácil adquisición en el mercado y dar una breve descripción de la misma.
- Seleccionar un tipo de fotobiorreactor industrial adecuado para las condiciones climáticas de Guayaquil.
- Diseñar el sistema de cultivo masivo en función de la demanda de biocarburante
- Elaborar una herramienta informática que automatice el diseño del sistema de cultivo en función de la demanda de biocarburante, dimensiones del fotobiorreactor, productividad volumétrica del fotobiorreactor y porcentaje en lípidos sobre peso seco de la especie a cultivar (variables independientes).
- Dimensionar los elementos auxiliares y complementarios para el sistema de cultivo de microalgas.

### **1.3. Definición de Microalgas.**

Las microalgas son microorganismos fotosintéticos eucarióticos y procarióticos (como las cianobacterias o también llamadas algas azules – verdosas) que pueden sintetizar lípidos bajo determinadas condiciones ambientales. Estos microorganismos son ricos en nitrógeno, carbono y fósforo además de nutrientes que estimulan la metanogénesis. Están compuestas básicamente por proteínas, carbohidratos, ácidos nucleicos y lípidos (entre ellos ácidos grasos). Los ácidos grasos se encuentran en las membranas formando lípidos estructurales y en los productos de almacenamiento denominados lípidos de reserva. El porcentaje de ácidos grasos varía según la especie, aunque hay especies cuyos ácidos grasos representan 40% de su peso seco.

De las principales características de las microalgas, para el interés planteado dentro de este estudio, se destacan las siguientes:

1. Alta tasa de crecimiento todo el año, producción de biomasa cinco veces mayor a la de los vegetales terrestres por hectárea.
2. Capacidad elevada de captación de CO<sub>2</sub>.
3. Bajo consumo de agua para los cultivos en comparación con los cultivos tradicionales.
4. Posibilidad de cultivo en áreas áridas, no adecuadas para la agricultura, apenas habría competencia entre estas plantaciones de algas y las áreas agrícolas convencionales.
5. Ciclo neutro en CO<sub>2</sub>, tomando en cuenta la captación en el crecimiento y liberación durante su método de producción y uso como combustible.



**Figura 1.3-1. Cepas de chlorella de la algoteca de LNEG, Unidad de Bioenergía, Lisboa – Portugal.<sup>1</sup>**

En la tabla 1.3-1 se presentan el porcentaje de contenido de aceites en base a peso seco de cuatro géneros de microalgas, empleadas en temas de biocarburantes:

---

<sup>1</sup> (Beltrán, 2013) pág. 61

**Tabla 1.3-1 Porcentaje de contenido de aceites de algunos géneros de algas<sup>2</sup>**

<i>Especies</i>	<i>Contenido de aceites (% en base a peso seco)</i>
<i>Chlorella</i> sp.	28-32
<i>Nitzschia</i> sp.	45-47
<i>Nannochloropsis</i> sp.	31-68
<i>Schizochytrium</i> sp.	50-77

A partir de la revisión bibliográfica realizada, se ha seleccionado las microalgas pertenecientes a la especie *Chlorella*, la cual es una de las más empleadas desde un punto de vista comercial y mayormente accesibles para la producción de biodiesel por encontrarse diseminada casi por todo el planeta, su tiempo de reproducción puede variar de 8 a 24h y su morfología puede ser semielíptica o esférica con un diámetro de 2 a 12  $\mu\text{m}$ .<sup>3</sup>



**Figura 1.3-2 Morfología de la *Chlorella* sp. vista al microscopio.<sup>4</sup>**

<sup>2</sup> (Compendio de la Producción de Bioenergía a Partir de las Algas, 2008) pág. 2

<sup>3</sup> (Riofrío, 2013) pág. 6

<sup>4</sup> (Riofrío, 2013) pág. 7

#### **1.4. Definición de Fotobiorreactor.**

“Un fotobiorreactor puede ser definido como un sistema de cultivo de organismos fotótrofos en el que una gran proporción de luz no invade directamente la superficie del cultivo, sino que pasa a través de una pared transparente antes de alcanzar las células cultivadas. Consecuentemente, un FBR no permite, o limita fuertemente, el intercambio directo de gases y contaminantes (polvo, microorganismos, entre otros.) entre el cultivo y la atmósfera.

Los FBR pueden ser clasificados de acuerdo a su diseño y modo de operación. A continuación se describen los principales tipos de FBR.

#### **1.5. Tipos de fotobiorreactores**

##### **1.5.1. Fotobiorreactores Tubulares**

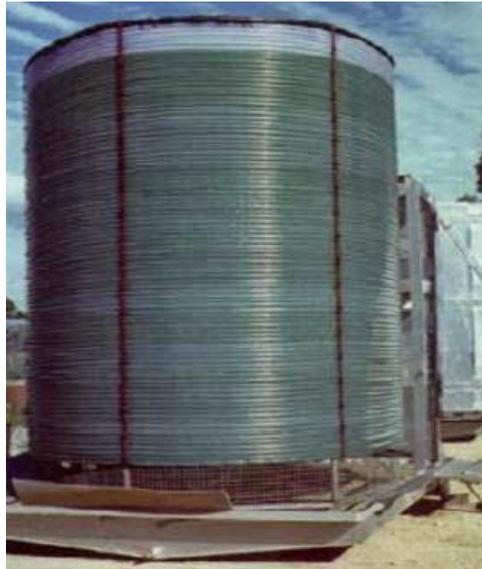
Existen tres tipos principales de FBR tubulares: en serpentín, con colector (manifold) y helicoidales.

Los FBR en serpentina son sistemas en los que varios tubos transparentes son conectados en serie para formar un lazo plano arreglado en forma vertical u horizontal (llamado fotoplataforma). El intercambio de gases y la adición de nutrientes generalmente se realizan en un tanque separado. La circulación en la fotoplataforma se logra por medio de una bomba o de un sistema de tubo con línea de aire (airlift). A parte de su alto costo, las principales desventajas de este tipo de sistema son la dificultad para controlar la temperatura del cultivo, limpiar los tubos transparentes y reducir la acumulación del oxígeno disuelto que se conoce que es un factor limitante del crecimiento del cultivo.

Los FBR con colector son una variante en la que varios tubos transparentes son conectados en paralelo a un distribuidor (manifold) al inicio y al final del circuito, uno

para la distribución y otro para la recolección del cultivo. Tienen las mismas desventajas de los FBR en serpentina.

Los FBR helicoidales consisten de tubos de diámetro pequeño, generalmente flexibles, que se envuelve en un cilindro vertical (ver ilustración 1.3-1). Igual que en los dos sistemas anteriores, la circulación del cultivo se logra por medio de una bomba o un tubo con línea de aire que envía el cultivo al circuito.



**Figura 1.5-1 Fotobiorreactor tubular helicoidal de 1000 L en Murdoch University (Australia).<sup>5</sup>**

### **1.5.2. Fotobiorreactores Planos**

Los FBR planos (ver ilustración 1.3-2) han sido muy utilizados para producir organismos fototróficos en laboratorio debido a que facilitan la medición de la irradiancia en la superficie del cultivo. Pese a su aparente simplicidad, en la actualidad el empleo de estos sistemas para cultivo industrial de algas es mínimo, debido al alto costo de los materiales transparentes comercialmente disponibles, tales como vidrio, láminas de PVC transparente o de poli carbonato y también debido a la laboriosidad de su operación.

---

<sup>5</sup><http://biorrefineria.blogspot.com/2014/06/2014-12fotobiorreactores.html>



**Figura 1.5-2 . Fotobiorreactor Placas Planas<sup>6</sup>**

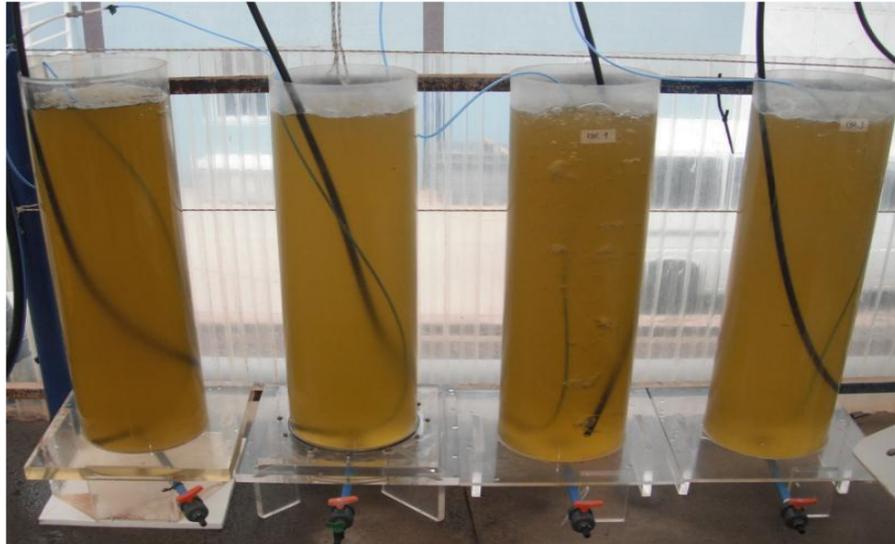
### **1.5.3. Cilindros verticales y fundas**

Los reactores tubulares verticales (o reactores de columna) son sistemas simples en los que la mezcla se logra con inyección de aire. Generalmente tiene el fondo en forma de cono para evitar la sedimentación de las algas. En ocasiones cuentan con un tubo interior que reduce el volumen que no recibe luz interior del cilindro.

Las columnas verticales rígidas (ver ilustración 1.5-3) son ampliamente utilizadas en los laboratorios de producción de biomasa de algas destinadas a la alimentación de estadios larvales del camarón, bivalvos y peces. La mayoría de estos sistemas elaborados con láminas de fibra de vidrio transparente. Asimismo, un reactor vertical puede ser fácilmente construido con un trozo de manga plástica de polietileno transparente cerrada en uno de sus extremos. De igual manera, el aire se inyecta en el fondo del cilindro y la luz puede ser natural o artificial.

---

<sup>6</sup> (Estupiñan) pág. 9



**Figura 1.5-3 Reactores verticales de 80 litros de metacrilato y 300 mm de diámetro**

Las fundas tienen una vida útil relativamente corta debido a la acumulación de organismos indeseados, pero son relativamente baratas para reemplazar. La principal desventaja de este sistema es la laboriosidad del manejo en grandes volúmenes y la relativamente baja relación de superficie por volumen.”<sup>7</sup>

### **1.6. Elementos auxiliares y complementarios en los sistemas de fotobiorreactores.**

A excepción del radio superficie por volumen ( $s/v$ ), los elementos auxiliares están directamente relacionados con las variables de diseño que requieren de constante supervisión y control en el proceso de cultivo y se los puede clasificar de la siguiente manera independientemente de la forma o tipo de fotobiorreactor a emplear:

- Un motor rotativo para la orientación e inclinación en casos extremos si se quisiera captar al máximo la radiación solar durante el día siguiendo la trayectoria del sol vista desde la tierra desde que sale hasta que se oculta.

---

<sup>7</sup> (Ronny Barra, 2010) pág. 12 - 18

- Un peachímetro para determinar la acumulación de oxígeno
- Caudalímetros, tanques y bombas de agua, tanques de CO<sub>2</sub>, electroválvulas para la mezcla de gases con el fluido algal.
- Termostatos, intercambiadores de calor, invernaderos para control y variación de temperatura.

Posteriormente , en el ítem 2.4 se habla de forma más detallada de los elementos auxiliares necesarios para el funcionamiento del fotobiorreactor seleccionado.

.

# CAPÍTULO 2

## METODOLOGÍA DE DISEÑO.

### 2.1. Criterios generales de Diseño

Sobre la base de las consideraciones anteriores, los criterios de diseño de los fotobiorreactores deben apuntar a lograr alta productividad volumétrica y una eficiente conversión de la energía luminosa y, al mismo tiempo, brindar la fiabilidad y estabilidad necesaria para el proceso de cultivo. Un fotobiorreactor eficiente incorporará dentro de su diseño los parámetros relacionados a la fisiología del organismo que va a ser cultivado. Debido a que los micro-organismos fototróficos son altamente diversos en su morfología, requerimientos nutricionales y de luz, y resistencia al estrés, los fotobiorreactores no pueden ser diseñados para manejar a todos los organismos y todas las condiciones. “ (Ronny Barra, 2010)<sup>8</sup>

**Tabla 2.1-1 Combinaciones de diferentes tipos e inclinaciones existentes de fotobiorreactores.**

		Orientación e Inclinación		
		Horizontal	Vertical	Inclinado
Tipo de fotobiorreactor	Tubular	Producción Industrial a bajas latitudes		Producción Industrial a altas latitudes
	Plano	Investigación y Desarrollo a bajas latitudes		Estudio de cepas a altas latitudes
	Cilindros, fundas		Producción artesanal, células de estructura delicadas	

<sup>8</sup> Página 30.

A continuación se presenta un diagrama de flujo de la metodología para el diseño del fotobiorreactor que junto con la tabla 2.1-1 ayudará a la mejor toma de decisiones en el momento de seleccionar la configuración de fotobiorreactor más adecuada según sea el caso requerido de los que se muestran en la figura 2.1-2.

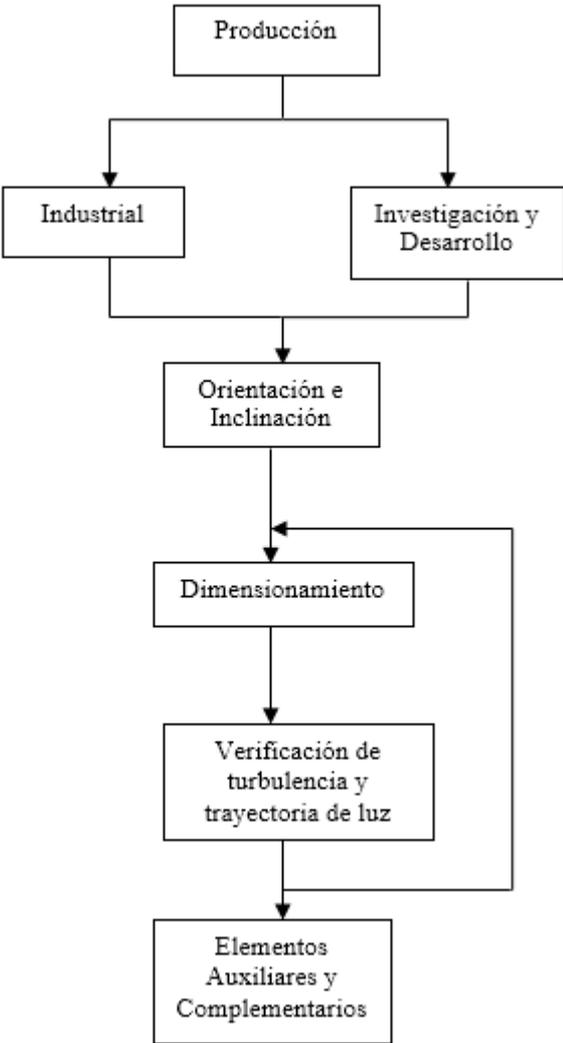
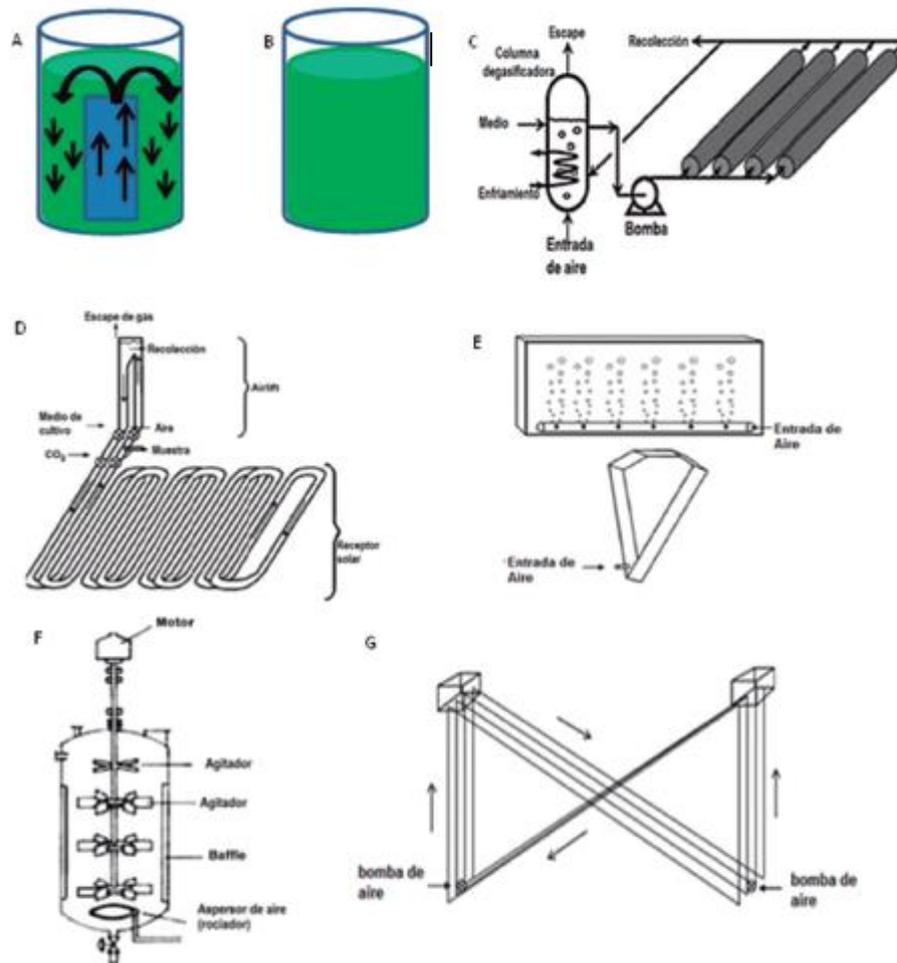


Figura 2.1-1 Diagrama de Diseño de Fotobiorreactores.



**Figura 2.1-2 Esquema representativo de diferentes configuraciones de fotobiorreactores. Sistema airlift (A), columna de burbujeo (B), tubular horizontal (C), tubular helicoidal (D), superficie plana (flat plate) (E), tanque agitado (F), tipo híbrido (G). (Ramírez Mérida, Queiroz Zepka, & Jacob-Lopes, 2002)**

Las principales variables del diseño incluyen: la relación superficie por volumen, la orientación e inclinación, la mezcla y los dispositivos de descarga de gases, los sistemas de limpieza y regulación de temperatura, y la transparencia y durabilidad del material de construcción. La facilidad para operar y escalar el cultivo, y un bajo costo de construcción y operación también una particular relevancia en los fotobiorreactores industriales.

## **2.2. Variables de Diseño**

### **2.2.1. Razón superficie sobre volumen (s/v).**

Se define la razón como “El radio entre la superficie iluminada de un reactor y su volumen (s/v) determina la cantidad de luz que entra en el sistema por cada unidad de volumen, generalmente, a mayor radio s/v, es mayor la concentración celular a la que puede ser operado el reactor y es mayor la productividad volumétrica del cultivo.” (Ronny Barra, 2010)<sup>9</sup>

### **2.2.2. Orientación e inclinación.**

Este parámetro es fundamental en aspectos relacionado a luz que recibe el cultivo y “Contrario a los sistemas horizontales, los fotobiorreactores elevados pueden ser orientados e inclinados hacia el sol en varios ángulos y esto ofrece la posibilidad de variar la irradiancia en la superficie del reactor. El efecto de la inclinación del fotobiorreactor en la productividad ha sido investigado por Lee & Low (1991), Tredici&ChiniZittelli (1997) y Hu et al. (1998). Mientras que no se encontró que exista una gran influencia del ángulo de inclinación en reactores ubicados en dirección este-oeste en bajas latitudes (Lee & Low, 1991), se ha demostrado que el ángulo de inclinación si ejerce un efecto significativo en la productividad en altas latitudes (Tredici&ChiniZittelli, 1997; Hu et al. 1998). Generalmente, los sistemas orientados al sol logran mayor productividad volumétrica.” (Ronny Barra, 2010)<sup>10</sup>

### **2.2.3. Control de la cantidad de oxígeno.**

La acumulación de oxígeno generado por la fotosíntesis es uno de los principales factores que limitan la reproducción de las microalgas dentro de los fotobiorreactores en serpentín. La producción de oxígeno está directamente correlacionada con la productividad volumétrica, y concentraciones de oxígeno disuelto equivalente a 4 o 5

---

<sup>9</sup> Página 31.

<sup>10</sup> Página 32.

veces el nivel de saturación con respecto al aire, que pueden ser tóxicas para muchos fotótrofos, pueden ser alcanzadas fácilmente en los cultivos externos, especialmente en tubos de diámetro reducido (con alto s/v). En las máximas tasas de fotosíntesis, un reactor de 1cm de diámetro acumula unos 8-10 mg/l de oxígeno por minuto (Weissman eta l, 1988). En reactores en serpentin, el mantener niveles de oxígeno bajo la concentración tóxica requiere el desalojo frecuente de gases por lo que será necesario disponer de un orificio manipulable para la fuga de los mismos en un tramo en específico de la tubería o en el elemento mezclador de gases.

#### **2.2.4. Mezcla**

El tipo de dispositivo utilizado para mezclar y recircular el cultivo es esencial en el diseño de un fotobiorreactor. La mezcla es necesaria para prevenir la sedimentación de las células, evitar la estratificación térmica, distribuir los nutrientes, remover el oxígeno generado por la fotosíntesis y asegurar que las células experimenten adecuados períodos de luz y oscuridad. El tipo de mezcla y la dinámica del fluido del cultivo influyen en la irradiancia promedio y régimen de luz al que las células están expuestas, factores clave que influyen en la productividad. Típicamente, los reactores en serpentina son recirculados con una tasa de flujo entre 20 y 30 cm/s. La velocidad controla la turbulencia en el tubo y la capacidad de transferencia de masa, lo que influye en gran manera en la concentración del oxígeno del cultivo y en el abastecimiento de CO<sub>2</sub> (Molina Grima, 1999). La elección del dispositivo de mezcla y la intensidad del mezclado deberían ser determinadas por las características del organismo a ser cultivado. (Ronny Barra, 2010)<sup>11</sup> Hay cultivos de ciertas microalgas no pueden ser mezclados con bombas debido a que su estructura celular es delicada.

En ocasiones el burbujeo de aire puede causar algo de estrés a las células en el punto donde las burbujas se rompen. Las columnas de burbujas y los sistemas de tubo con línea de aire causan bajos niveles de estrés y están recomendados para

---

<sup>11</sup> Página 34.

organismos frágiles.<sup>12</sup> De manera general se recomienda una aireación de CO<sub>2</sub> de 44,64 kg.m<sup>-3</sup>.h<sup>-1</sup> para mantener un PH del cultivo entre 7 y 8. ( Contreras Flores, Peña Castro, Flores Cotera , & Cañizares Villanueva, 2003)<sup>13</sup>

### **2.2.5. Control de temperatura**

La máxima productividad sólo se puede lograr en la temperatura óptima de crecimiento. Para el caso de la chlorella bien puede mantenerse entre los 20 y 30 grados centígrados. La media de las temperaturas ambiente máxima, promedio y mínimas de Guayaquil registradas en el 2014 fueron de 32°C, 28°C y 23°C respectivamente (tabla A-3 del apéndice). Para este caso no serán necesarios cuidados térmicos especiales ya que el fotobiorreactor estaría en equilibrio térmico con el ambiente y la única transferencia de calor posible al ambiente es la que desprende el trabajo de la bomba para recircular el líquido a través el tanque y el fotobiorreactor que para este caso no será necesario calcular pero sí la potencia requerida.

### **2.2.6. Iluminación**

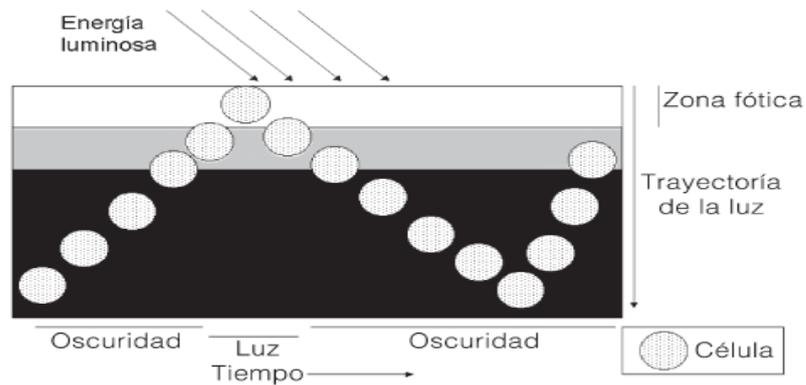
La radiación lumínica en que las microalgas son capaces de realizar fotosíntesis y crecimiento celular está entre 400 y 700 nm, con una iluminancia óptima de 11 klux. Si la cantidad de luz irradiada es insuficiente, disminuirá considerablemente la velocidad de crecimiento del microorganismo; pero si hay exposición excesiva con alta intensidad por largos periodos de luz en el medio se producirá foto inhibición, fenómeno donde los fotosistemas del microorganismo se dañan e inactivan procesos de transporte celular.<sup>14</sup>

---

<sup>12</sup> (Ronny Barra, 2010) pág. 30 – 36.ada

<sup>13</sup> Página 453.

<sup>14</sup> ( Ramírez Mérida, Queiroz Zepka, & Jacob-Lopes, 2002)



**Figura 2.2.6-1 Trayectoria de la luz y de los ciclos luz/oscuridad<sup>15</sup>**

Para mejorar los índices de productividad de las microalgas se las someten a stress de crecimiento durante la noche. Para ningún tipo de fotobiorreactor se recomiendan trayectorias de luz mayores de 10 cm, en virtud de esto y para optimizar la turbulencia de la mezcla el diámetro del mismo será de 4 pulgadas.

### **2.3. Materiales**

“Los materiales utilizados en fotobiorreactores no deben ser tóxicos, deben tener una alta transparencia, alta resistencia mecánica, alta durabilidad (y resistencia a los factores ambientales), estabilidad química y bajo costo. La facilidad de limpieza es otra característica operacional importante. Las ventajas y desventajas de los materiales tubulares más comunes usados para la construcción de fotobiorreactores ha sido descrita por Tredeci (1999)<sup>16</sup>.

### **2.4. Productividad en fotobiorreactores.**

Hay tres parámetros comúnmente utilizados para evaluar la productividad en los fotobiorreactores. El primero es la productividad volumétrica (PV), que es la

<sup>15</sup> ( Contreras Flores, Peña Castro, Flores Cotera , & Cañizares Villanueva, 2003) pág. 452

<sup>16</sup> (Ronny Barra, 2010) pág. 36-37

productividad por unidad de volumen del reactor (expresada como g/(lt.d)), la segunda es la productividad por área (PA), que es la productividad por unidad de suelo ocupado por el reactor (expresada como g/m<sup>2</sup>.d); la tercera es la productividad del área iluminada (PAI), que es la productividad por unidad de área de reactor iluminada (expresada como g/m<sup>2</sup>.d). Se debe notar que en los sistemas verticales la superficie iluminada comprende la superficie que recibe la radiación directa y la superficie de atrás que recibe la radiación difusa y reflejada. La PV es un parámetro clave que ilustra cuan eficiente es utilizada la unidad de volumen del reactor. Sin embargo, considerar que la PV es una función del número de fotones que entran en una unidad de volumen del reactor en una unidad de tiempo; y por lo tanto, depende de la s/v del reactor. A mayor radio s/v, mayor la PV.

**Tabla 2.4-1 Distintos tipos de fotobiorreactores y sus usos<sup>17</sup>**

Tipo	Pv	Pa	DC	Aplicación	Referencia
Sistema carrusel	0,18	27	0,4	Producción de biomasa	Richmond, 2000
Plano vertical UADC	9,2	67,8	22,5	Fijación de CO <sub>2</sub> del aire	Hu <i>et al.</i> , 1998
Plano inclinado ADC	4,3	51,1	8,4	Estudio del efecto de la trayectoria de la luz.	Hu <i>et al.</i> , 1996 b
Plano inclinado UADC	n.d.	n.d.	35	Estudio de la fisiología de los organismos en UADC	Hu <i>et al.</i> , 1996 a
Triangular	n.d.	n.d.	0,275	Remoción de amonio, nitrato y fósforo.	Sylvestre <i>et al.</i> , 1996
Tanque agitado iluminado	n.d.	n.d.	1,2	Remoción de amonio a altas concentraciones	Prosperi, 2000
Tubular horizontal	0,55	n.d.	n.d.	Prototipo de reactores horizontales con mecanismo <i>airlift</i>	Richmond <i>et al.</i> , 1993
Tubular inclinado	1,47	n.d.	n.d.	Con mezcladores estáticos internos	Ugwu <i>et al.</i> , 2002
Tubular helicoidal cónico	n.d.	33,2	n.d.	Prototipo agitado neumáticamente	Morita <i>et al.</i> , 2002
Iluminado cuasi-internamente UADC	n.d.	n.d.	2x10 <sup>9</sup> cel/ml	Prototipo de UADC con ultrafiltración e iluminación con diodos	Lee y Palsson, 1994
Iluminado internamente	n.d.	n.d.	30	Prototipo de reactores de UADC	Javanmardian y Palsson, 1991
Tubular horizontal ADC	1,6	27	4,8	Prototipo de producción de biomasa	Richmond, 2000
Plano vertical ADC	2,4	66	6	Prototipo de producción de biomasa	Richmond, 2000
Plano inclinado ADC	0,9	110	2,2	Prototipo de producción de biomasa	Richmond, 2000
Tubular horizontal ADC	n.d.	30	6,5	Producción de biomasa	Gudin y Chaumont, 1991
Plano horizontal	n.d.	30	2	Producción de biomasa	Gudin y Chaumont, 1983
Plano vertical	1,93	n.d.	n.d.	Estudios de fotoinhibición en diferentes geometrías	Tredici y Zitteli, 1998
Serpentín vertical	1,64	n.d.	n.d.	Estudios de fotoinhibición en diferentes geometrías	Tredici y Zitteli, 1998
Serpentín horizontal	0,9	n.d.	n.d.	Estudios de fotoinhibición en diferentes geometrías	Tredici y Zitteli, 1998
<i>Airlift</i>	0,34	n.d.	n.d.	Estudio y caracterización de reactores <i>airlift</i> .	Sánchez <i>et al.</i> , 2000

Pv: productividad volumétrica (g/l-día), Pa: productividad por área (g/m<sup>2</sup>-día) salvo donde se indique, DC: densidad celular máxima alcanzada (g/l), ADC: alta densidad celular, UADC: ultra alta densidad celular.

Adicionalmente, los reactores con alto s/v pueden lograr altas PV. Por otro lado, un PV de 1g/l.d tiene un significado completamente diferente al ser obtenido en un reactor de fotocapa de 1cm y otro de 5cm. Se debe tener cuidado al discernir entre

<sup>17</sup> ( Contreras Flores, Peña Castro, Flores Cotera , & Cañizares Villanueva, 2003) pág. 454

PA y PAI. En el caso de tanques y reactores horizontales o casi horizontales, la superficie de suelo ocupada por el sistema y su superficie iluminada coinciden substancialmente, y por lo tanto lo hacen la PA y la PAI. En el caso de los reactores tubulares con tubos en contacto, la superficie iluminada es 1.57 veces la superficie ocupada, entonces la PAI va a ser siempre menor que la PA y ambos parámetros pueden ser calculados fácilmente. (Ronny Barra, 2010)<sup>18</sup>

## **2.5. Tipo de Fotobiorreactor seleccionado y principio de operación**

De acuerdo con la matriz de decisión y el diagrama de la metodología para el diseño mostrados en la sección 2.1, el sistema de fotobiorreactor seleccionado para la ciudad de Guayaquil con propósitos industriales vendría a ser del tipo tubular horizontal <sup>19</sup> el cual consistirá en una combinación de tubos y codos de 180° de metacrilato (PMMA) dispuestos horizontalmente en serpentina a un solo nivel con una longitud de 120m dividido en 12 secciones de 10m separadas entre sí 2 diámetros del fotobiorreactor (100mm) según recomendaciones para evitar la inhibición del crecimiento por acumulación de oxígeno molecular para cada tramo en los cuáles se producirá la fotosíntesis<sup>20</sup>. Para medir caudal se ubicarán 2 rotámetros metálicos con transmisor por microprocesador (ver ilustración 2.5-2) en el punto de descarga y retorno hacia el tanque de agua que estarán al mismo nivel; el diámetro de tubería diseñado es de 4" con el fin de obtener un balance entre trayectoria de luz <sup>21</sup> y turbulencia de la mezcla. Por último, se calculará la potencia requerida de la bomba para vencer las pérdidas por fricción.

Para que la mezcla sea lo más homogénea posible se necesitará de un flujo turbulento completamente desarrollado y se inyectará CO<sub>2</sub> desde la parte inferior del tanque y en cada plataforma de descanso según indique la altura del mismo. Seguido

---

<sup>18</sup> Páginas 37 – 39.

<sup>19</sup> Revisar ilustración 2.1 -1 el literal c.

<sup>20</sup> ( Contreras Flores, Peña Castro, Flores Cotera , & Cañizares Villanueva, 2003) pág. 455

<sup>21</sup> ( Contreras Flores, Peña Castro, Flores Cotera , & Cañizares Villanueva, 2003) pág. 452

del recipiente de CO<sub>2</sub> estará conectada una electroválvula que reaccionará a variaciones de voltaje provenientes de un medidor de PH CRISON regulado con valores máximos y mínimos de 8 y 7 respectivamente. Para el desalojo del exceso de oxígeno se dispondrán de una malla metálica soldada a un anillo metálico cuyo diámetro de círculo de pernos será los  $\frac{3}{4}$  del diámetro del tanque en la parte superior del mismo. Para más detalles del diseño conceptual y de la iluminación revisar los cálculos en el siguiente capítulo y los planos en el apéndice.



**Figura 2.5-1 Ejemplo del tipo de fotobiorreactor a diseñar para el presente proyecto integrador.<sup>22</sup>**

---

<sup>22</sup> [http://www.elfinancierocr.com/negocios/Biodiesel-algas-investigador-brasileno-JorgeVieira\\_0\\_345565459.html](http://www.elfinancierocr.com/negocios/Biodiesel-algas-investigador-brasileno-JorgeVieira_0_345565459.html)



Figura 2.5-2 Rotámetro con transmisor por microprocesador <sup>23</sup>



Figura 2.5-3 Medidor de PH de 1 canal<sup>24</sup>

<sup>23</sup> [http://www.instycal.com/files/pdf/Pdf\\_productos/caudal/caudalímetros/asa\\_rotametros\\_metalicos\\_G5-G6.pdf](http://www.instycal.com/files/pdf/Pdf_productos/caudal/caudalímetros/asa_rotametros_metalicos_G5-G6.pdf)

<sup>24</sup> <http://www.crisoninstruments.com/es/aguas-industria/medidor-de-ph/medidor-de-ph-de-1-canal/medidor-de-ph-de-1-canal/>



**Figura 2.5-4 Caudalímetro Electromagnético.<sup>25</sup>**

---

<sup>25</sup> <http://www.hispacontrol.com/liquidos/477-caudalimetro-electromagnetico.html>



Demanda trimestral de biodiesel: 40000 l

Peso Molecular Ácidos grasos: 163

Demanda de Triglicéridos:  $X_{\text{trig}}$

El volumen necesario de ácidos grasos algales para un trimestre  $X_{\text{trig}}$  calculado fue de aproximadamente 50000 l el cual corresponde al 20% del peso total del alga, lo cual el volumen total que tendrían que ocupar las algas sería de 246969,70 l.

De la tabla 2.9-1 usamos la productividad volumétrica de un fotobiorreactor tubular horizontal de alta densidad celular para calcular cuántos kilos de algas ocuparían los 246969,70 l en un día:

$$\begin{aligned}M_{\text{algal}} &= V_{\text{algal}} \times PV && \text{(ec. 2)} \\&= 246969,70 \text{ l} \times 1,6 \frac{\text{g}}{\text{l} \times \text{d}} \\M_{\text{algal}} &= 395,15 \text{ kg/d}\end{aligned}$$

El valor calculado anteriormente dice que 395 kilos de chlorella pueden ocupar un espacio de un millón de litros en un día.

### 3.2. Dimensiones del Fotobiorreactor.

Se dispone de una bomba hidromac tipo KGG-4BM con un impeler de 4" el cual será el diámetro del fotobiorreactor ( $d_f$ ) y de las tuberías de drenado conectadas al tanque y que pasarán por la bomba hasta el fotobiorreactor más no se considerará dentro del volumen que recibirá iluminación ya que estarán bajo tierra. Entonces para el volumen del fotobiorreactor se tiene:

$L_f$ : longitud de fotobiorreactor

$d_f$ : diámetro de fotobiorreactor

$$V_f = \pi * 0,25 * (d_f)^2 * L_f \quad (\text{ec. 3})$$

Pasando todo a metros se tiene de la ecuación 3:

$$V_f = \pi * 0,25 * 0,1^2 * 120$$

$$V_f = 0,97 \text{m}^3$$

El área iluminada S corresponde a  $d_f * L_f = 0,1 * 120 = 12,19 \text{m}^2$

Razón de superficie de volumen  $S/V_f = 12,53 \text{m}^{-1}$

Para estimar el lugar más posible donde se desarrollaría la turbulencia y el mezclado del agua con el  $\text{CO}_2$ , conociendo la velocidad a la que debe circular el agua a través del FBR se calcula la longitud efectiva para flujos turbulentos.

$$L_e = d_f * 4,4 * \text{Re}^{1/627} \quad (\text{ec. 4})$$

Para verificar si el flujo con el diámetro seleccionado es turbulento se determina a través de la ecuación 5, siendo la velocidad del agua de 50 cm/s.

$$\text{Re} = \rho_{\text{H}_2\text{O}} * V * d_i / \mu_{\text{H}_2\text{O}} \quad (\text{ec. 5})$$

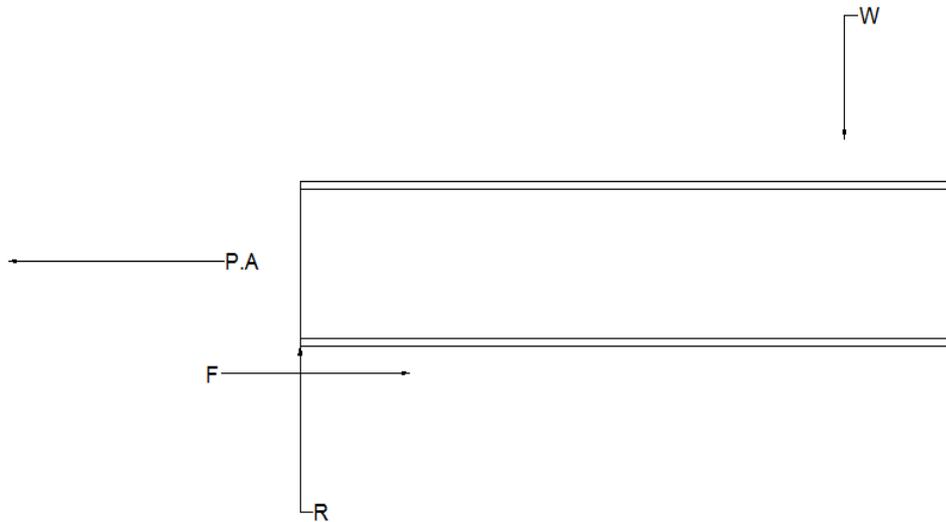
$$\text{Re} = 998 * 0,5 * 0,1 / 0,01$$

$$\text{Re} = 50698,40$$

Certificando la turbulencia con la ecuación 5 se obtiene una longitud efectiva de 2,72m que corresponde a la trayectoria entre la salida de la bomba y el punto donde la mezcla en los tubos del FBR empezaría a homogeneizarse.

---

<sup>27</sup> (Edición), 2008)ec. 6.6



**Figura 3.2-1 Diagrama de cuerpo libre de una sección de un tubo de 2 m de largo en funcionamiento.**

Si se disponen de tubos de PMMA en tramos de 2m, el ajuste de la junta de cada tramo sería en apriete hasta completar el circuito de los 120m. Del diagrama de cuerpo libre de la figura 2.4-1 se puede notar que en el eje vertical la reacción R es la mitad del peso W que equivale al peso del tubo más el volumen de agua. De esta manera igualando las fuerzas horizontales a cero se tiene lo siguiente:

$$P_{H2O} * A_f = \mu_{PMMA} * W/2 \quad (\text{ec. 6})$$

Sabiendo que  $\mu_{PMMA}$  es el coeficiente de fricción del metacrilato; la presión mínima de agua  $P_{H2O}$  capaz de separar la junta de los tubos se puede calcular con la siguiente ecuación:

$$P_{H2O} = \frac{\mu_{PMMA} * [\rho_{H2O} * d_f^2 + \rho_{PMMA} (d_e^2 - d_f^2)] * L * g}{2 * d_f^2} \quad (\text{ec. 7})$$

Donde  $d_e$  y  $L$  son el diámetro exterior y la longitud de 1 tubo respectivamente.

Se conoce que el coeficiente de fricción y la densidad del metacrilato son 0,53 y 1180 kg/m<sup>3</sup> respectivamente<sup>28</sup>. De esta manera la presión mínima de separación de los tubos calculada fue 1 psi aproximadamente. Como la presión de diseño es de 55 psi será necesario usar abrazaderas para cada junta.

### 3.3. Bomba.

Para conocer la potencia útil se necesita calcular el cabezal total requerido que será la diferencia de altura entre el punto de drenado del tanque, el arreglo de tubos en serpentín del FBR y el punto de retorno todo al mismo nivel en la parte inferior del tanque; y la bomba que estará ubicada bajo tierra (revisar planos en el apéndice) más las pérdidas por fricción de las tuberías.

De los planos de diseño (revisar apéndice) se puede deducir la siguiente fórmula para la longitud total de tuberías:

$$L_{bomba} = L_f + 12 + 32d_f \quad (\text{ec. 8})$$

$$L_{bomba} = 120 + 12 + 32 * 0,1$$

$$L_{bomba} = 135,25\text{m}$$

Considerando que el arreglo de tuberías tienen 11 codos de 180°, 4 codos de 90°, y 7 válvulas esféricas; los valores de las constantes son  $k_{180^\circ}=0,25$   $k_{90^\circ}=0,26$  y  $k_v=5,8$ <sup>29</sup>, y que el coeficiente de fricción de la tubería  $f$  es de 0,012<sup>30</sup> el cabezal total de la bomba requerido se calcula con la siguiente fórmula:

$$H = \frac{v^2}{2g} \left( \frac{f * L_{bomba}}{d_f} + 11k_{180^\circ} + 4k_{90^\circ} + 7k_v \right) + Z^{31} \quad (\text{ec. 9})$$

Trabajando en sistema métrico se tiene que

<sup>28</sup> [http://www.plasticos-mecanizables.com/plasticos\\_coeficiente\\_friccion.html](http://www.plasticos-mecanizables.com/plasticos_coeficiente_friccion.html)

<sup>29</sup> (Edición), 2008) tabla 6.5

<sup>30</sup> (Edición), 2008) fig. 6.13

<sup>31</sup> (Edición), 2008)ec. 6.79

$$H = \frac{0,5^2}{2 * 9,8} \left( \frac{0,012 * 135,25}{0,1} + 11 * 0,25 + 4 * 0,26 + 7 * 5,8 \right) + 43$$

$$H = 43,91\text{m} \approx 144,305\text{pies}$$

La potencia útil obtenida fue:

$$\text{Pot} = \rho_{\text{H}_2\text{O}} * g * Q * H \quad (\text{ec. 10})$$

$$\text{Pot} = 998 * 9,8 * 0,25 * \pi * 0,22^2 * 0,5 * 43,91$$

$$\text{Pot} = 1740,171 \text{ W} \text{ o } 2,33 \text{ hp}$$

### 3.4. Tanque de Agua.

Para calcular el espesor de la plancha del casco cilíndrico vertical se aplica la siguiente fórmula:

$$t = \frac{P * R}{S * E - 0,6 * P} \quad (\text{ec. 11})$$

Donde:

P: presión de Diseño (psi).

S: esfuerzo del material (psi).

E: eficiencia de la junta = 0,7<sup>32</sup>

R: Radio interior del recipiente (in).<sup>33</sup>

La presión de trabajo es 55 psi y la altura recomendada del tanque es de 127 pies<sup>34</sup>, significa que para el volumen calculado el radio del recipiente es de 4,06

---

<sup>32</sup> (Megyesey, 1992)pág. 142

<sup>33</sup> (Megyesey, 1992)pág. 18

pulgadas. Si se utilizan planchas de Acero A36 el espesor mínimo requerido es de 1mm, para aumentar el factor de seguridad se seleccionarán de Ivan Bohoman planchas FORA de 4mm de espesor para el cuerpo y la parte hemisférica inferior por donde se inyectará CO<sub>2</sub> para volver la mezcla lo más homogénea posible. En la parte superior irá una maya de tela metálica soldada a un anillo empernado a la plancha anular superior del tanque cuyo diámetro del círculo de pernos corresponde a los  $\frac{3}{4}$  el diámetro del recipiente, los pernos serán UNC  $\frac{1}{4}$ . Todas las planchas vienen en tiras de (6x2) m.

Para la pintura del tanque el manual de recipientes a presión recomienda el sistema de pintura número SSPC – PS 12 para ambientes de alta humedad o atmósferas marinas, inmersión en agua fresca. Con recubrimiento superior apropiado para inmersión en agua salada y de mar, y exposición a ácidos químicos y humos alcalinos<sup>35</sup>. Para este caso se selecciona una pintura de cromado de zinc o de tipo alquídica con un 70% de sólidos por volumen.

Teóricamente un galón de pintura cubre 1600 pies cuadrados de superficie con una película de 1 milésima de pulgada de espesor, sabiendo que el área interna y externa del tanque considerando el casco y la cabeza es de 514,54pies<sup>2</sup>; con la pintura seleccionada el volumen mínimo necesario sería:

$$V_{pintura} = \frac{514,54}{1600 * 0,7}$$

$$V_{pintura}=0,5 \text{ galones}$$

Se recomiendan 5 pasadas es decir para el volumen necesario total serían de 2,5 galones de pintura de cromado de zinc.

### **3.5. Exposición a la Luz.**

---

<sup>34</sup> (Megyesey, 1992)pág. 29

<sup>35</sup> (Megyesey, 1992) pág. 220 tabla I

En el caso de que el tanque estuviera totalmente lleno y las válvulas de salida y de retorno cerradas, una vez abierta y con la bomba en funcionamiento el volumen total que el fluido tendría que recorrer sería el volumen del FBR más el volumen del tanque es decir de 2,26m<sup>3</sup>. Sabiendo que el caudal es de 3,927x10<sup>-3</sup>m<sup>3</sup>/s el fluido completaría un ciclo por todo el sistema en un intervalo de 10 minutos. Significa que en una jornada laboral que comience desde las 8 am hasta las 6 pm para aprovechar la mayor cantidad de luz solar el sistema daría 60 vueltas pero sólo absorbería el 43% de toda la radiación disponible en un día soleado. Es decir que las algas utilizando solamente luz solar estarían aprovechando netamente 4 horas 20 minutos de toda la radiación disponible.

El análisis del párrafo anterior se hizo considerando que las microalgas tuvieran un movimiento netamente lineal a lo largo de su trayectoria por la tubería del FBR, cuando en realidad si el flujo es turbulento cada micro partícula debería tener un movimiento ondulatorio como el que se muestra en la figura 2.2.6 - 1. Mientras menor sea el diámetro del tubo transparente mayor será la incidencia de la luz pero la turbulencia disminuiría por eso el diámetro seleccionado fue de 10 cm para mantener un balance adecuado entre turbulencia e iluminación.

Para calcular la cantidad de focos necesarios se aplicó la siguiente fórmula:

$$N. L. = \frac{\phi_T}{n \cdot \phi_L} \text{ (ec. 12)}$$

$\phi_T$ : flujo luminoso que un determinado local o zona necesita (lúmenes)

$\phi_L$ : flujo luminoso de una lámpara.

$n$ : número de lámparas por luminaria.

Conociendo la iluminancia el flujo luminoso necesario se calcula con la fórmula  $\phi_T = 11 \text{ klux} \cdot a \cdot b$ , donde para el arreglo del fotobiorreactor designado  $a = 32d_f$  y  $b = L_f/12$ . De esta manera el flujo luminoso necesario calculado fue de 357632 lm, dividiendo esta cantidad para el flujo luminoso del foco eco halógeno seleccionado se necesitan un total de 397 focos.

Una vez determinada la mínima cantidad de luminarias se procede a distribuir las uniformemente dentro del perímetro establecido con las fórmulas<sup>36</sup>:

$$N_{ancho} = \sqrt{\frac{N.L.*a}{b}} \quad (\text{ec. 13}) \quad N_{largo} = N_{ancho} \frac{b}{a} \quad (\text{ec. 14})$$

$$N_{ancho} = \sqrt{\frac{397 * 32 * 0,1}{10}}$$

$$N_{ancho} = 11,37$$

$$N_{largo} = 34,96$$

El arreglo de focos sería de 70 filas y 6 columnas, se dividirán en arreglos de 2 grupos conectados todos en paralelo con 120 v de corriente alterna, uno de 35 x 6 y otro de 31 x6 la potencia total sería de 23,8 KW. La altura a la que estarán ubicados los focos según recomendaciones de experimentos realizados con respecto al FBR será de 20 cm<sup>37</sup> y la separación entre focos es de 1.6 veces la altura. Para más detalles del circuito revisar los planos en el apéndice.

### 3.6. Abastecimiento de CO<sub>2</sub>

Para calcular cuánto CO<sub>2</sub> será necesario multiplicar el rango de consumo promedio por el volumen del fotobiorreactor y por los 90 días obteniendo un total de 32 toneladas. Cantidad equivalente a 5 tanques diarios de CO<sub>2</sub> de 10kg en un trimestre. <sup>38</sup> . El Dioxido de carbono inyectado podría causar un descenso en el pH del fotobiorreactor, por lo que se recomienda controlarlo para que se mantenga en un rango entre 7.7 a 8.5.

### 3.7. Presupuesto General de Construcción

---

<sup>36</sup> (Castilla Cabanes)

<sup>37</sup> (Hernández, 2014)

<sup>38</sup> <http://spanish.alibaba.com/product-gs/small-co2-gas-tank-for-beverage-dispenser-621375587.html>.

**Tabla 3.7-1 Presupuesto de construcción de un FBR de 200m<sup>2</sup>.<sup>39</sup>**

Rubro	Cant.	Unidad	P. Unitario (\$)	Subtotal (\$)
Alquiler de Grúa 35 ton	1	global	2000,00	2000,00
Construcción de estructura soporte FBR (M.O.)	112,19	m <sup>2</sup>	500,00	56096,00
Instalación de tubos del FBR (M.O.)	112,19	m <sup>2</sup>	1,50	168,29
Construcción del tanque de agua (M.O.)	25,16	m <sup>2</sup>	0,80	20,12
Bomba Semiaxial	1	u	2500,00	2500,00
Motor Eléctrico de 1,5 HP	1	u	250,00	250,00
Tuberías	135,25	m	30,00	4057,54
Instalaciones Eléctricas		global	200,00	0,00
Plancha FORA de (6x2)m	25,16	m <sup>2</sup>	186,08	4680,88
Algas	395,15	kg	1,50	592,73
Pintura	12,00	gal	15,00	180,00
Electrodo 7018	70	kg	2,70	189,00
Perfiles C soporte FBR	8,128	m	11,66	94,77
Abrazaderas	67,63		0,75	50,72

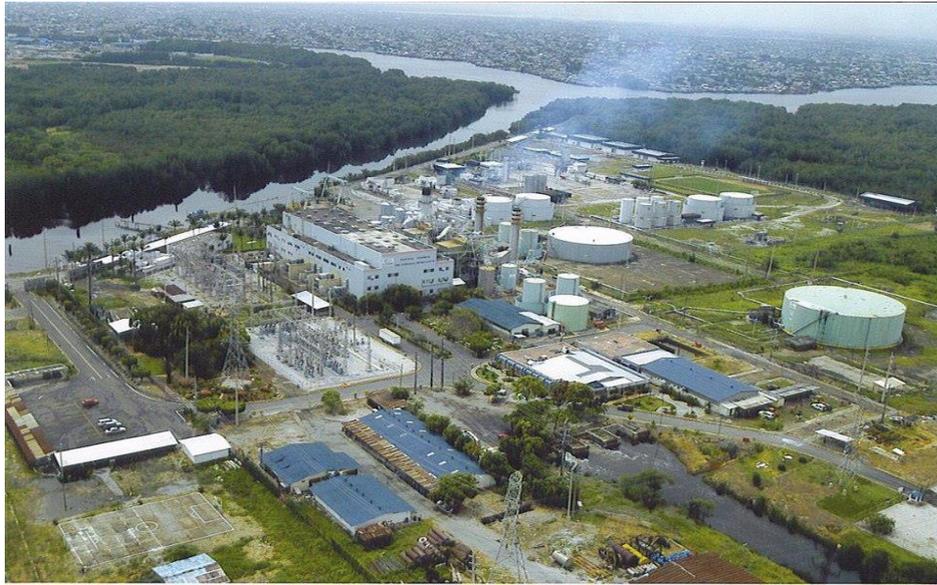
Total (\$)            70880,05  
 Costo por m<sup>2</sup> (\$)            631,77

El costo por metro cuadrado de un fotobiorreactor de este tipo sería de \$631,77.

### 3.8. Selección del terreno de trabajo.

<sup>39</sup> (Ronny Barra, 2010) pág. 68 tabla 1.

El terreno que ocupa la central termoeléctrica Gonzalo Zevallos es de aproximadamente 2 ha<sup>40</sup>. El espacio que ocupa el sistema de cultivo intensivo estaría alrededor de 3 áreas, a simple vista de la ilustración 3.6-1 se puede notar que las áreas verdes que se encuentran separadas de la central por el ramal del estero podrían utilizarse para establecer el monocultivo.



**Figura 3.8-1 Vista panorámica de las centrales Gonzalo Zevallos, Salitral, Aníbal Santos y del posible terreno disponible para el cultivo de algas.<sup>41</sup>**

---

<sup>40</sup><https://www.celec.gob.ec/electroguayas/index.php/generacion/central-gonzalo-zevallos>

# CAPÍTULO 4

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

### 4.1. Conclusiones

Como conclusiones a este trabajo final, se puede citar lo siguiente:

Se debe de tomar en consideración que este diseño al conocerse un caso claro con respecto al mismo, los resultados de productividad que tendría en caso que se quiera invertir en un proyecto como éste se correría un riesgo.

Al diseñar el fotobiorreactor se tomó como variable de entrada el consumo de Diésel que según estudios realizados necesitan para su arranque 2 turbinas a vapor de una central termoeléctrica en el lapso de un trimestre puede ser de 40000 lt.

Se ha seleccionado la microalga correspondiente a la especie chlorella, la cual es comercialmente utilizada a nivel mundial y que tiene un 20% de lípidos sobre el peso seco determinando, que para cubrir la demanda de combustible mencionada el FBR tendrá que producir 395 kg de algas en el plazo de tiempo establecido.

Para el sistema de los fotobiorreactores se ha seleccionado un arreglo de tubos y codos transparentes dispuestos en serpentín de 120 m de largo horizontalmente con respecto al suelo. Esta orientación es recomendada para zonas de bajas latitudes como Guayaquil, con un diámetro de tubo para el sistema del fotobiorreactor de 100 mm (4"). Siendo su productividad en 3 meses de al menos 140,09 kg de biomasa. Finalmente, considerando cada división de 10m como un solo fotobiorreactor en total, se hace necesario dividir esta área en 3 unidades para satisfacer la demanda establecida.

Se ha determinado que el caudal aproximado requerido en el sistema es de 62 gpm. A la vez se encontró que a una longitud de 2,72 m de la salida de la bomba empieza a desarrollarse completamente la turbulencia del fluido obteniendo una mejor mezcla en el cultivo. El cabezal requerido es de 144 pies, trabajando con un impeler de 4" y una potencia útil de 2,33 hp necesaria para la recirculación permanente de todo el sistema.

El espesor mínimo requerido de la plancha para el tanque de agua resultó de 1mm, por motivos conservadores se eligieron planchas FORA de IvanBohoman de 4 mm para el cuerpo cilíndrico y la cabeza hemisférica en la parte inferior.

El costo de la construcción de todo el sistema se aproxima a \$80000 con un costo estimado por metro cuadrado de \$700.

#### **4.2. Recomendaciones.**

Si la producción trimestral estimada de microalgas es de aproximadamente 395 kg; para el caso de la chlorella sólo el 20% de esta masa se la aprovecharía para la producción de Biodiesel. Los restantes 316 kilos pueden ser destinados para ganado, alimentación, productos naturales o para re cultivar en el sistema hasta que alcance el límite de su capacidad en el tanque de agua. Obviamente esta cantidad variaría en función de la especie, su porcentaje en lípidos y siempre y cuando se la puede cultivar en el FBR diseñado.

En cuanto a las principales ventajas y bondades del sistema de cultivo de microalga se puede decir lo siguiente:

- Materiales de construcción resistentes y duraderos.
- Orientación horizontal que permite captar mejor la luz del sol.
- Alto radio s/v y por consiguiente alta densidad celular.
- Mezcla adecuada del cultivo en el canal y en el tanque de agua.
- Adecuado control de temperatura del cultivo.

- Adecuado control y abastecimiento de CO<sub>2</sub>.
- Facilidades de operación en la siembra y en la cosecha del cultivo.
- Facilidades para realizar la limpieza del sistema en los tubos.
- Buena recolección de los sedimentos en los tubos transparentes.
- Facilidades para un adecuado intercambio de gases.
- Poca evaporación.

Y de las desventajas:

- Elevado consumo de electricidad para la iluminación en las noches.
- Costos de producción y mantenimiento relativamente caros
- Alta densidad celular del cultivo puede hacer que la concentración de sustancias inhibidoras del crecimiento en el medio de cultivo también sea alta y esto produce reducción en la productividad del sistema. También reduce la disponibilidad de nutrientes y hace que el cultivo sea más susceptible a los cambios químicos del medio.
- Difícil acceso para limpieza y mantenimiento dentro y fuera del tanque de agua.

# Bibliografía

- Contreras Flores, C., Peña Castro, J. M., Flores Cotera, L. B., & Cañizares Villanueva, R. O. (2003). Avances en el Diseño Conceptual de Fotobiorreactores para el Cultivo de Microalgas.
- Ramírez Mérida, L. G., Queiroz Zepka, L., & Jacob-Lopes, E. (2002). *FOTOBIOREACTOR: HERRAMIENTA PARA CULTIVO DE CIANOBACTERIAS*. Carabobo.
- Beltrán, M. I. (2013). *EVALUACIÓN DEL POTENCIAL ENERGÉTICO DE LA MICROALGA Chlorella Protothecoides EN EL ECUADOR PARA LA OBTENCIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES*. Sangolquí: Escuela Superior Politécnica del Ejército.
- BioExport. (5 de marzo de 2015). [www.bioexportpanama.com](http://www.bioexportpanama.com). Obtenido de <http://www.bioexportpanama.com/consejos/beneficios-y-propiedades-de-la-chlorella/>
- Cárdenas Dávila, C. A., & Perdomo Vincés, J. F. (2002). *Obtención de los Costos Variables en Centrales Térmicas, con Aplicación a la Central Térmica Ing. Gonzalo Zevallos Guzman*. Guayaquil: ESPOL.
- Castilla Cabanes, N. (s.f.). L U M I N O T E C N I A: Cálculo según el método de los lúmenes.
- (2008). *Compendio de la Producción de Bioenergía a Partir de las Algas*. Buenos Aires.
- Edición), F. M. (2008). *Mecánica de Fluidos*. Madrid: Editec.
- Enero, 2. d. (2011). Acumulación de algas causa mancha en río Guayas. *El Universo*.
- Estupiñán, D. R. (s.f.). Diseño de Fotobiorreactores de Alta Eficacia y Bajo Coste para el Cultivo de Microalgas. Canarias.
- Gladys Torres, C. P. (2005). *Calidad Ambiental del Bloom algal en área urbana del Estero Salado*. Guayaquil: Acta Oceanográfica del Pacífico.
- Hernández, M. C. (2014). Estimación de Iluminación en un Fotobiorreactor Productor de Biomasa a partir de Microalgas. (47).
- Hielscher Ultrasound. (s.f.). Ultrasonic Industrial Devices.
- junio, 2. (2011). Dos universidades obtendrán biodiésel usando microalgas. *Expreso*.
- Lorena Monserrate, F. M. (2008 - 2009). *Estudio de Condiciones Físicas, Químicas y Biológicas en la Zona Intermareal de Dos Sectores del Estero Salado con Diferente Desarrollo Urbano*. Guayaquil: Espol - FIMCM.
- Martínez, J. M. (2012). *Modelo de Biomasa Algal para la Captura de Dióxido de Carbono y su Desarrollo en un Software de Evaluación*. Trabajo de Fin de Master, Valladolid.
- Megyesey, E. F. (1992). *Manual de Recipientes a Presión Diseño y Cálculo*. México: LIMUSA.

- Riofrío, M. A. (2013). *DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PUESTA EN MARCHA DE UN FOTOBIORREACTOR PILOTO PARA EL CRECIMIENTO DE LA MICROALGA *Chlorella sp* EN EL LABORATORIO DE LA BIOTECNOLOGÍA Y ENERGÍAS RENOVABLES DE LA EMPRESA ELÉCTRICA QUITO*". Sangolquí: Escuela Politécnica del Ejército Departamento de Ciencias de la Vida.
- Ronny Barra, S. G. (2010). *Diseño de un Fotobiorreactor Industrial para Cultivo de Spirulina*. Guayaquil: Revista Tecnológica Espol.
- Torres Badillo, R. G., & Flores Tomalá, D. G. (2011). *CONTROL DE PROCESOS DE ENERGÍAS RENOVABLES: PROCESO DE PRODUCCIÓN DE BIODIESEL USANDO ALGAS. UNA ALTERNATIVA PARA NO AFECTAR EL ECOSISTEMA O LA CADENA ALIMENTARIA. ASPECTOS TÉCNICOS Y ECONÓMICOS*. Guayaquil: ESPOL.
- wikipedia. (30 de 3 de 2014). *Wikipedia*. Recuperado el 29 de 4 de 2014, de Wikipedia: <http://es.wikipedia.org/wiki/Alga>
- Zebik, T. (2008). *Microalgae Grown in Photobioreactors for Mass Production of Biofuel*. Rutgers University.

# APÉNDICE A

**Tabla A-4.2-1 Rubros de consumo de la Tv- 2 Abril 1999 - Abril 2000<sup>42</sup>**

**COSTOS DE PRODUCCIÓN DE DIESEL, LUBRICANTES, PRODUCTOS QUÍMICOS Y OTROS INSUMOS DE LA  
CENTRAL TERMICA GONZALO ZEVALLOS GUZMAN. ABRIL 1999 A ABRIL 2000**

**UNIDAD TV-2**

	Abr-99	May-99	Jun-99	Jul-99	Ago-99	Sep-99	Oct-99	Nov-99	Dic-99	Ene-00	Feb-00	Mar-00	Abr-00
ACIDO SULFÚRICO ( Kg )	804	790	952	1152	0	1819	1457	1107	989	1299	1125	953	1129
SODA CÁUSTICA ( Kg )	1577	1556	1556	1910	0	3887	2499	1885	1627	2223	1935	1626	1919
COLOR GAS ( Kg )	1136	1246	1388	950	170	1269	1580	1204	1318	1460	1459	1474	1246
HIPOCLORITO DE SODIO ( Kg )	2200	2400	2400	2200	300	2000	2600	2000	2200	2000	3200	2600	2800
FOSFATOS ( Kg )	1,4	1,5	2,4	4,7	0	5,8	4	3,7	3,5	3,5	3,7	3,9	3
HIDRAZINAS ( Kg )	23	33	28	34	2	70	68	51	47	55	48	39	43
CARBÓN ACTIVADO ( Lts )	50	50	50	60	0	120	90	70	60	80	70	60	70
RESINA ANIÓNICA ( Lts )	3	3	3	3	0	42	32	25	21	27,5	25	21	25
RESINA CATIÓNICA ( Lts )	18	18	18	21	0	6	5	4	3	4	4	3	4
HIDRÓGENO ( m³ )	58,6	47,9	49,6	53,4	0	57,1	50,9	49,9	52,8	57	49,2	45,6	46,4
AGUA POTABLE ( m³ )	8382	11224	8016	8461	1006	10489	9422	8681	8774	9377	8895	9045	8654
DIESEL ( gal )	311,2	420,9	348,5	342	98	5213,8	4062,5	566,6	278,5	107,4	605	1559,6	940
ENERGÍA ELÉCTRICA ( Kw-h )	1656,23	1801,95	1694,55	1777	239	2056,3	1788,5	2157,8	1920	2146,6	1829	1577,3	1780,1

**Tabla A--4.2-2 Rubros de consumo de la Tv- 3 Abril 1999 - Abril 2000<sup>43</sup>**

**COSTOS DE PRODUCCIÓN DE DIESEL, LUBRICANTES, PRODUCTOS QUÍMICOS Y OTROS INSUMOS DE LA  
CENTRAL TERMICA GONZALO ZEVALLOS GUZMAN. ABRIL 1999 A ABRIL 2000**

**UNIDAD TV-3**

	Abr-99	May-99	Jun-99	Jul-99	Ago-99	Sep-99	Oct-99	Nov-99	Dic-99	Ene-00	Feb-00	Mar-00	Abr-00
ACIDO SULFÚRICO ( Kg )	985	997	1081	930	1576	580	1085	1048	819	1063	911	856	1299
SODA CÁUSTICA ( Kg )	2195	2187	2109	1836	3149	1584	2310	1955	1399	1897	1652	1651	2202
COLOR GAS ( Kg )	1022	1245	1389	950	1076	27	1581	992	949	1460	1460	1474	1247
HIPOCLORITO DE SODIO ( Kg )	2200	2400	2000	2200	2200	0,3	1800	1600	1220	1400	2600	2600	2400
FOSFATOS ( Kg )	2,4	2,9	1,9	5,7	3,4	7,2	7,5	3,3	2,4	3,3	3,8	3,4	3,1
HIDRAZINAS ( Kg )	28	39	33	36	30	575	55	48	41	48	37	40	41
CARBÓN ACTIVADO ( Lts )	70	70	70	60	70	800	80	70	50	70	60	60	80
RESINA ANIÓNICA ( Lts )	4	4	4	21	35	40	28	25	18	25	20,5	21	27,5
RESINA CATIÓNICA ( Lts )	25	25	25	3	5	2	4	4	3	3,5	2,5	3	3,5
HIDRÓGENO ( m³ )	51,4	47,4	55,7	44,9	44,9	14	61,7	67,2	47,8	62,3	57,5	62,9	46,6
AGUA POTABLE ( m³ )	9291	11982	8497	9122	10040	3966	9038	8938	6366	8805	8330	9290	9113
DIESEL ( gal )	418,4	501,6	504	453,6	462	6456,9	1455,8	1971,8	12554,9	1011	272,7	1432,9	876
ENERGÍA ELÉCTRICA ( Kw-h )	1715,84	1922,63	1754,94	1881,6	1804,5	873,11	1921,8	2104,8	1457,6	2201,3	1840,9	1867,7	1953,6

<sup>42</sup> (Cárdenas Dávila & Perdomo Vines, 2002)

<sup>43</sup> (Cárdenas Dávila & Perdomo Vines, 2002)

Tabla A--4.2-3 Parámetros climáticos promedio de Guayaquil<sup>44</sup>

RETScreen

File Start Data Analytics Reporting

Site reference conditions Select climate data location

Climate data location Guayaquil A

Show data ▾

	Unit	Climate data location	Project location	Source
Latitude	°N	-2.2	-2.2	
Longitude	°E	-79.9	-79.9	
Elevation	m ▾	9	9	Ground
Heating design temperature	°C ▾	19.1		Ground
Cooling design temperature	°C ▾	32.2		Ground
Earth temperature amplitude	°C ▾	14.2		NASA

Month	Air temperature	Relative humidity	Daily solar radiation - horizontal	Atmospheric pressure	Wind speed	Earth temperature	Heating degree-days 18 °C	Cooling degree-days 10 °C
	°C ▾	%	kWh/m <sup>2</sup> /d ▾	kPa ▾	m/s ▾	°C ▾	°C-d ▾	°C-d ▾
January	26.7	73.8%	3.42	101.5	2.3	25.7	0	518
February	26.7	79.1%	4.47	101.5	2.1	24.1	0	468
March	27.1	76.7%	3.39	101.4	2.2	24.1	0	530
April	27.1	76.3%	4.36	101.4	2.2	24.0	0	513
May	26.4	74.1%	4.33	101.5	2.5	24.7	0	508
June	25.2	74.6%	3.58	101.6	3.2	24.3	0	456
July	24.4	74.8%	4.36	101.6	3.4	24.9	0	446
August	24.4	72.6%	3.64	101.6	3.6	26.7	0	422
September	24.8	71.7%	3.09	101.6	3.6	28.3	0	444
October	24.9	71.8%	4.17	101.6	3.6	29.2	0	462
November	25.4	70.1%	3.72	101.5	3.4	28.2	0	462
December	26.4	69.0%	4.01	101.5	3.0	26.9	0	508
<b>Annual</b>	<b>25.8</b>	<b>73.8%</b>	<b>4.14</b>	<b>101.5</b>	<b>2.9</b>	<b>26.0</b>	<b>0</b>	<b>5.759</b>
Source	Ground	Ground	Ground	Ground	Ground	NASA	Ground	Ground
Measured at				m ▾	10	0		

NASA, ITC, EOL, reep

<sup>44</sup> Anuario Meteorológico del Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología N° 52 - 2012. Pág 100

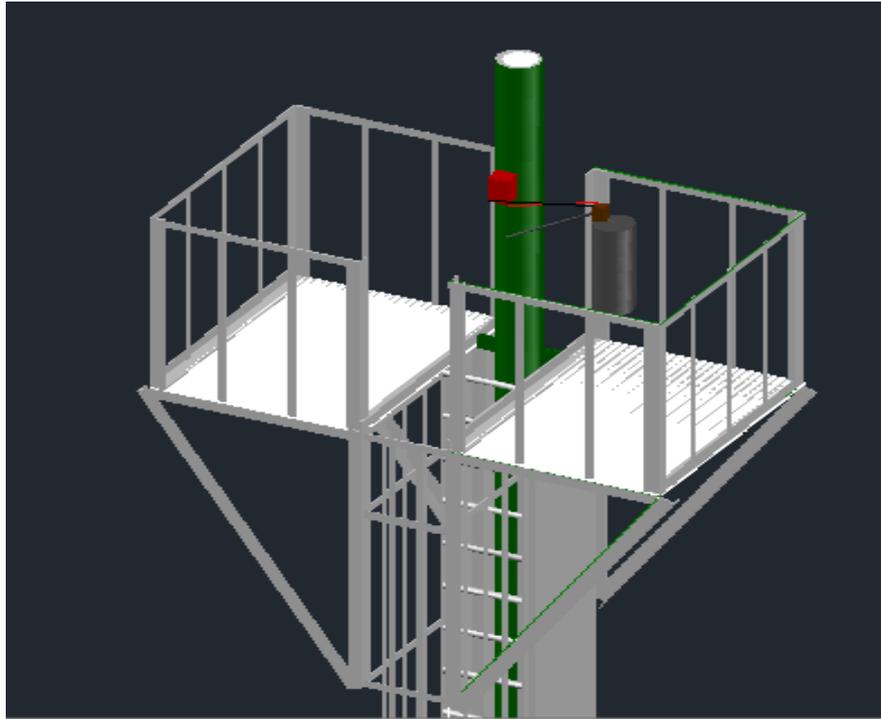


Figura A--4.2-1 Parte superior del tanque en donde se ve el esquema de la regulación de inyección de CO<sub>2</sub>.<sup>45</sup>

---

<sup>45</sup> El peachímetro (rojo) conectado a la electroválvula (café) automatiza el paso del gas.

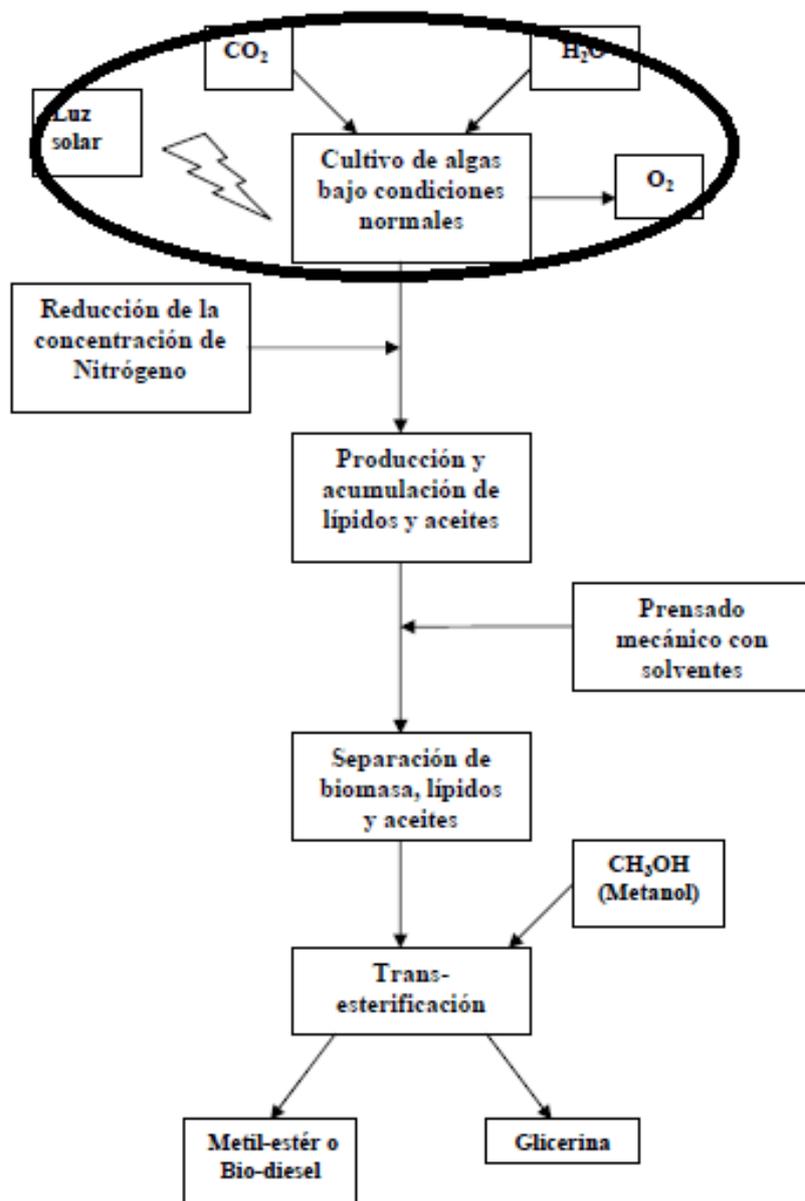


Figura A-4.2-2 Proceso de obtención de bio-diesel a partir de las algas<sup>46</sup>. El siguiente proyecto de graduación sólo tratará lo que está encerrado entre la elipse.

<sup>46</sup> (Compendio de la Producción de Bioenergía a Partir de las Algas, 2008) pág. 3

## Procedimiento de construcción del recipiente a presión

1. Rolar las planchas para formar el cuerpo del cilindro de tal manera que hayan 6 tramos de 6m y uno de 2,7m.
2. La parte externa del recipiente debe tener 2 placas de 100x100x5 separadas 10mm soldadas en cada extremo teniendo un total de 4 placas cada 10 pies comenzando desde la base.
3. El diámetro del perno que atraviesa las placas y el perfil C al cual se va a apoyar el recipiente es de 1" y estará ubicado a 25mm del extremo medio de las placas (Ver figura).

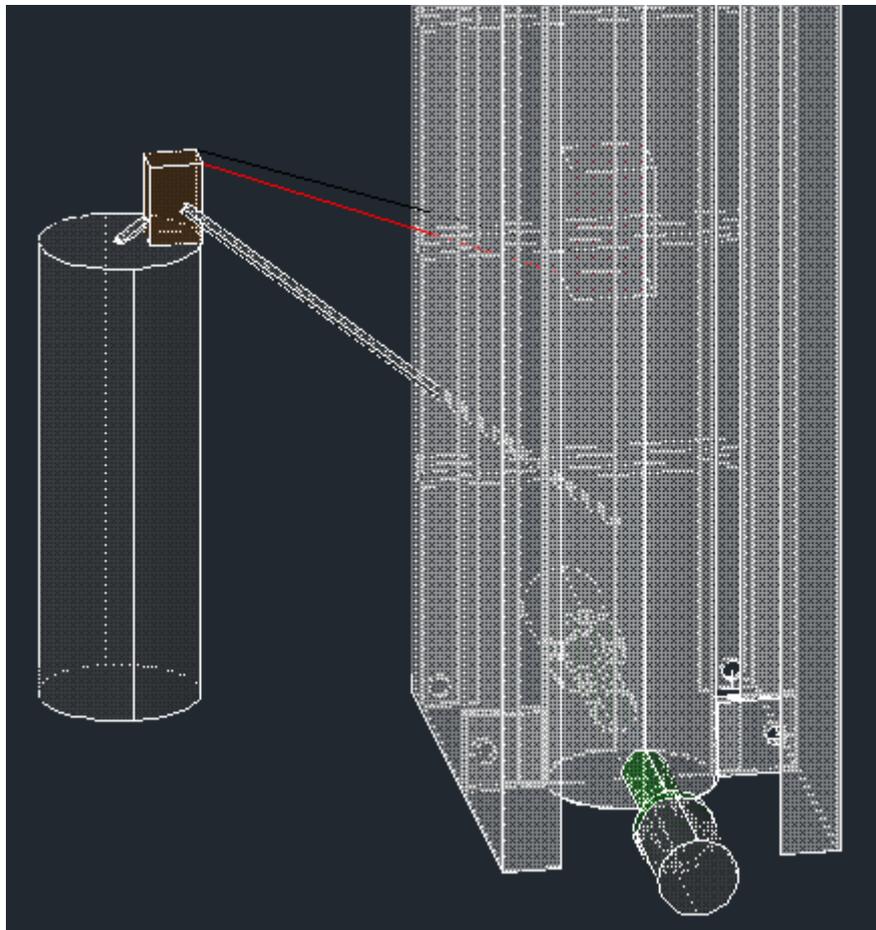
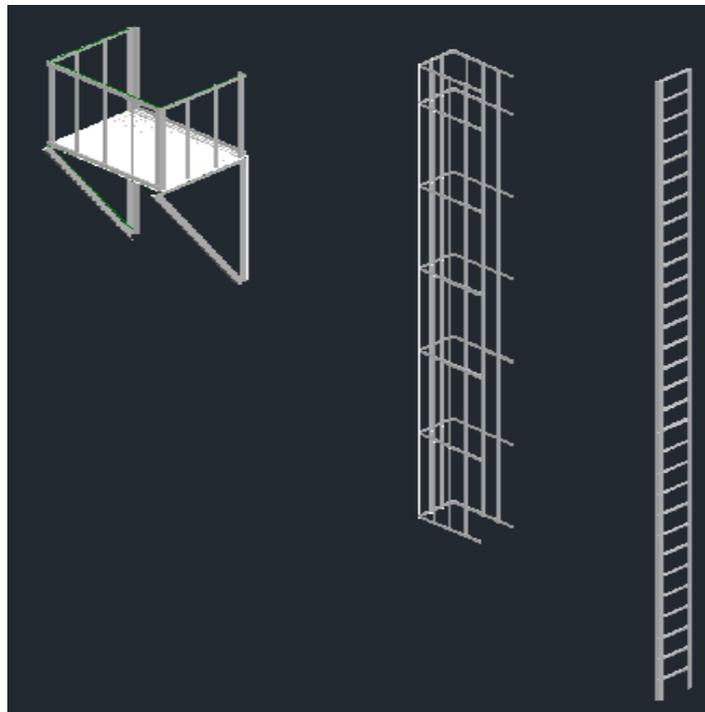


Figura 4.2-3 Vista inferior en rayos X del tanque sin conectar al fotobiorreactor.

4. Cortar los perfiles C que servirán como soporte para que el recipiente se encuentre en la posición vertical, las cuales deben tener las medidas que se indican en el plano.
5. Para el proceso de soldadura del recipiente a presión se deberá usar el proceso SMAW con electrodos 7018, además en cada pasada se debe hacer un análisis por ultrasonido para verificar que no haya fallas en el cordón de soldadura.
6. Colocar los accesorios, escalera, plataforma de descanso y rejillas de protección según las normas ANSI 14.3 – 1974 y OSHA respectivamente del manual de recipientes a presión.



**Figura 4.2-4 Platafomra de Descanso, jaula de protección y escalera diseñados conforme a las normas OSHA y ANSI 14.3 – 1974 respectivamente.**<sup>47</sup>

7. Debido a que para formar en cuerpo del recipiente se requieren 3 planchas FORA de 12m<sup>2</sup> se recomienda primero unir las planchas que van a formar el cuerpo comenzando desde la base, para luego soldar los perfiles de soporte a la altura de la 2da plataforma de descanso.

---

<sup>47</sup> (Megyesey, 1992) pág. 307

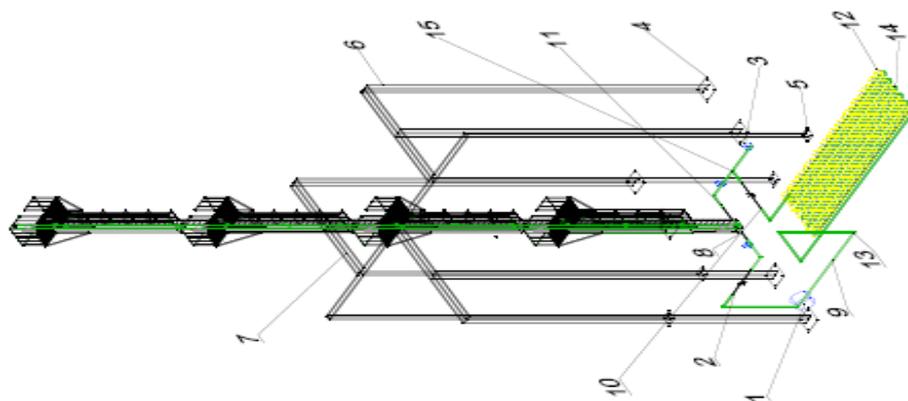
8. Una vez obtenido el cuerpo se deberá soldar en la parte superior del tanque, una placa anular junto con una maya metálica para el escape de oxígeno (ver figura A -0-1), con la ayuda de una grúa Zoomlion RT 35 a éste y de igual manera se debe tener un control con el cordón de soldadura cada vez que se realice un pase.
9. Posteriormente se procederá a colocar las válvulas de entrada y salida con sus respectivas bridas, así como el registro y los accesorios para medir temperatura, presión y nivel de agua y de PH y la inyección de CO<sub>2</sub>.
10. La longitud de la garganta de soldadura será de 6mm, para ver el resto de detalles revisar los planos y figuras del apéndice B.

# **APÉNDICE B**

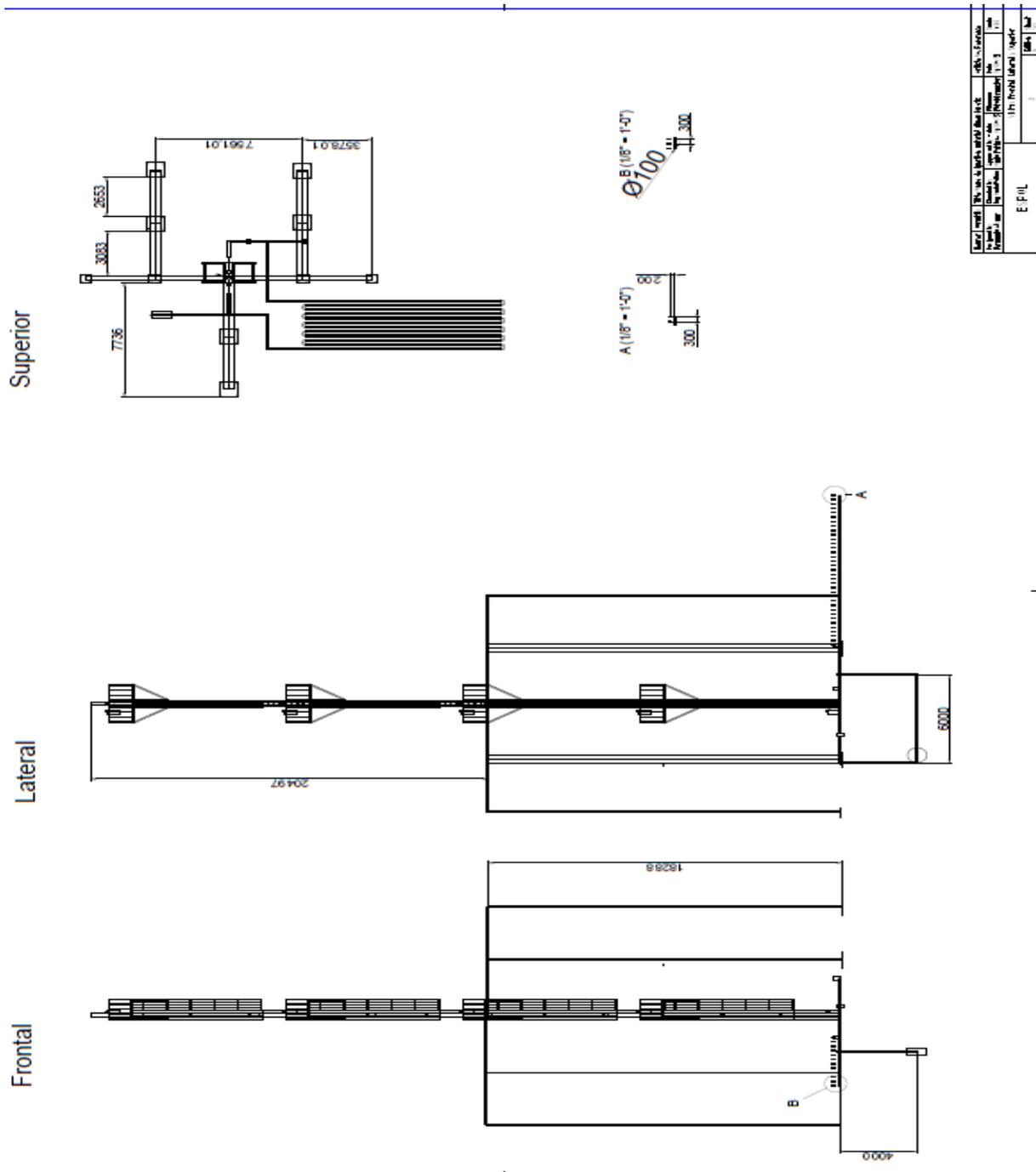
## **PLANOS ESQUEMÁTICOS**

### Elementos Auxiliares y complementarios

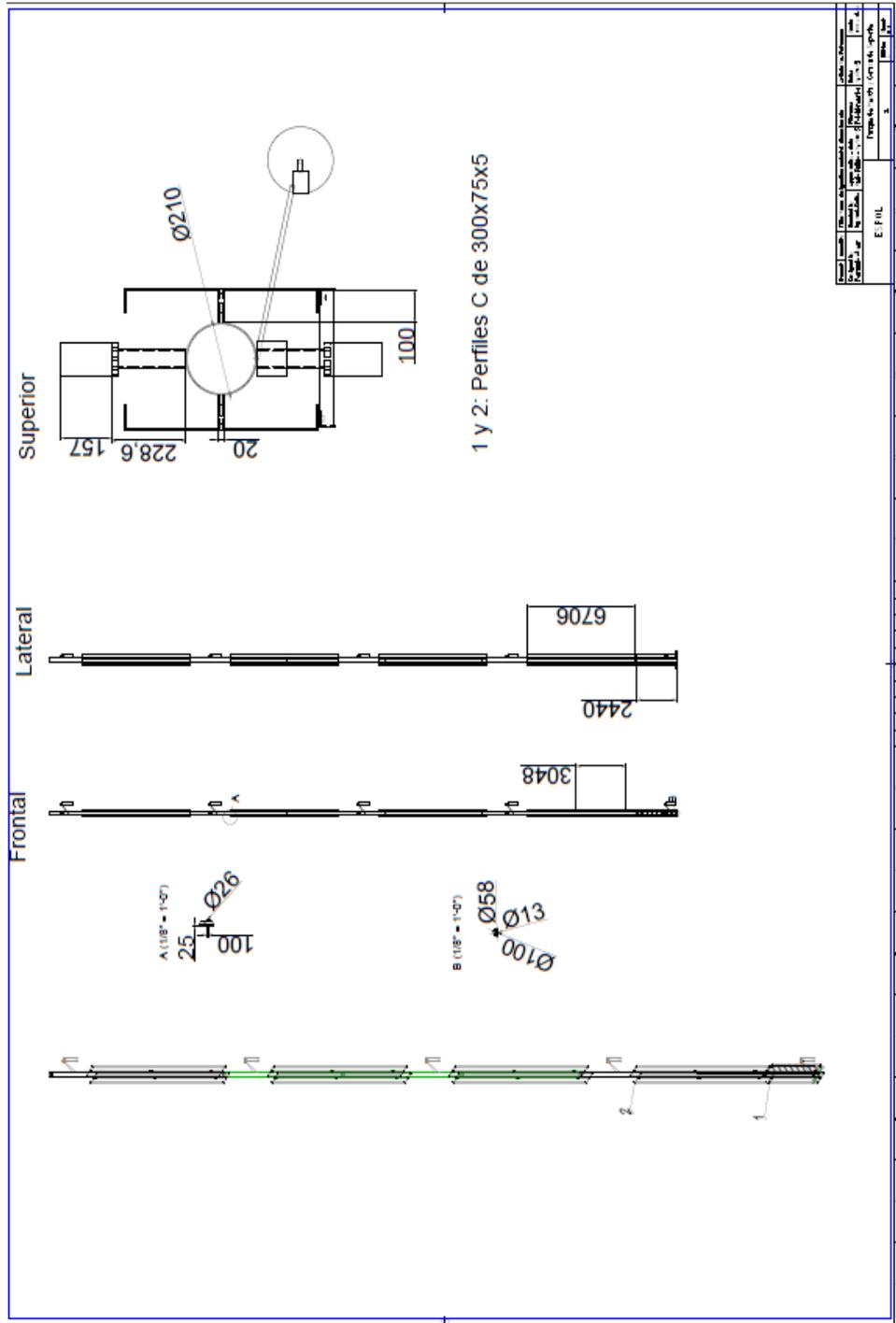
Ítem	Cantidad	Descripción
1	1	Bomba semiaxial hidromac de tipo KGG-4BM
2	2	Filtro Ratio DFR de 25mm
3	3	Válvula de compuerta de acero de 100mm
4	6	Placas de soporte 1000 x 1000 x 6 *
5	4	Placas de soporte de 600 x 600 x 6 *
6	16	Peril de 300 x 75 x 5 longitud 18288
7	8	Perfil 300 x 75 x 5 longitud 7241
8	2	Rotámetro con transmisor por microprocesador
9	72	Tubos de Metacrilato de 110 x 100 longitud 2000
10	4	Tubos de metacrilato con cambio de sección de 100 a 25 L=2000
11	2	Tubos con cambio de sección de 100 a 50
12	385	Luces eco halógenas Italigh de 60W 900 lm
13	7	Codos de metacrilato de 90° de 110 x 100
14	11	Codos de metacrilato de 180° de 110 x 100
15	2	T de metacrilato de 110 x 100
	*	Bases ancladas con pernos de 50mm



Plano 1 Elementos auxiliares y complementarios.



Plano 2 Vistas isométricas del fotobioreactor.



Plano 3 Coraza y Tanque de Mezcla.