

2012

INSTITUTO TECNOLÓGICO
DE TUXTLA GUTIÉRREZ



CARRERA:
INGENIERÍA QUÍMICA

REPORTE DE PROYECTO DE
RESIDENCIA

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN
FOTOBIORREACTOR”

PRESENTA:
ESTEPHANY SANTIAGO SILICEO

ASESOR:
DR. ARNULFO ROSALES QUINTERO



“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIORREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA

ÍNDICE

TÍTULO	PÁGINA
1.- INTRODUCCIÓN	2
2.- JUSTIFICACIÓN	3
3.- OBJETIVOS	4
4.- PROBLEMAS A RESOLVER	5
5.- ALCANCES Y LIMITACIONES	6
6.- FUNDAMENTO TEÓRICO	7
6.1 ANTECEDENTES	7
6.2 SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE ALGAS	9
6.3 FLUJO BIFÁSICO	13
6.4 RÉGIMEN DE LUZ	18
6.5 LA CURVA DOSIS-RESPUESTA A LA ENERGÍA LUMINOSA	20
6.6 DISEÑO DE FOTOBIORREACTORES BASADOS EN CONCEPTOS SOBRE DISTRIBUCIÓN DE LUZ.	21
6.7 FACTORES IMPORTANTES EN EL DISEÑO DE FOTOBIORREACTORES.	23
6.8 MATERIALES DE DISEÑO	30
6.8 RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO DE FOTOBIORREACTORES	34
7. PROCEDIMIENTOS Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS	36
7.1 DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS	37
8. RESULTADOS	40
8.1 DISEÑOS PRELIMINARES DE FOTOBIORREACTORES	40
8.1 DISEÑOS PRELIMINARES DE FOTOBIORREACTORES	61
8.3 CORRECCIONES DEL FOTOBIORREACTOR ELEGIDO (SISTEMA ABIERTO EN INTERIORES)	65
8.4 SIMULACIÓN DEL FOTOBIORREACTOR USANDO “COMSOL MULTIPHYSICS”	73
9 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	78
10.- FUENTES DE INFORMACIÓN	79
11.- ANEXOS	83
11.1 ANEXO 1: TECNOLOGÍA LED	83
11.2 ANEXO 2: CARACTERÍSTICAS DE LOS LEDS A USAR EN EL FOTOBIORREACTOR	86
11.3 ANEXO 3: PLANOS DEL PRIMER DISEÑO DE FOTOBIORREACTOR	87
11.4 ANEXO 4: PLANOS DEL SEGUNDO DISEÑO DE FOTOBIORREACTOR	89
11.5 ANEXO 5: PLANOS DEL FOTOBIORREACTOR CORREGIDO (FINAL)	91

1.- INTRODUCCIÓN

En la década de 1950 se postuló por primera vez que el empleo de luz solar y agua marina, para obtener cultivos masivos de microalgas ricas en proteína de alta calidad, podría ser una buena alternativa para obtener alimento para el ser humano (Becker, 1994).

Durante los años 60 y 70, diversos grupos de investigación tanto de países desarrollados como en vías de desarrollo, dedicaron esfuerzos a intentar lograr rendimientos de biomasa que pudieran equipararse a los obtenidos con microorganismos no autótrofos; principalmente levaduras (Contreras *et al.*, 2003).

En el transcurso de los años se pudieron diversificar las áreas donde las microalgas eucariotas (Vilchez *et al.*, 1997) y cianobacterias (Morales *et al.*, 2002; Prospero, 2000) cultivadas masivamente tienen aplicaciones prometedoras, especialmente en la producción de compuestos químicos "finos" y combustibles, en el tratamiento de aguas residuales, como intercambiadores iónicos y biofertilizantes, para la obtención de compuestos terapéuticos o aplicados a la terapéutica, y como alimento de consumo humano o animal(Contreras *et al.*, 2003).

Sin embargo, la productividad teórica estimada de 100 toneladas anuales por hectárea de cultivos microalgales (Richmond, 2000), no pudo ser alcanzada ni siquiera en los laboratorios de investigación, sino hasta principios de la década de los 90. Una limitante para lograr los estimados teóricos se debió a que el sistema en carrusel, que inicialmente fue el mejor sistema para desarrollar cultivos en masa por su facilidad de construcción y operación, paradójicamente resultó inapropiado como punto de partida para el desarrollo de sistemas de cultivo de alta productividad (Richmond, 2000).

Por tal motivo, el cultivo intensivo de microalgas ha sido posible en gran medida gracias al desarrollo de nuevos diseños de fotobiorreactores (Contreras *et al.*, 2003). Definimos como fotorreactor de microalgas, o fotobiorreactor, a un sistema capaz de generar la fotosíntesis de las clorofilas existentes en los ecosistemas marinos con el fin de producir microalgas, tanto para propósitos de investigación multidisciplinar, como para la obtención de biocombustibles alternativos (Beteta, 2009).

A continuación se expone el proceso del diseño de un prototipo de fotobiorreactor para la producción de microalgas.

2.- JUSTIFICACIÓN

Las microalgas han sido reconocidas como fuentes de compuestos químicos "finos" de alto valor agregado como vitaminas, ficobiliproteínas, pigmentos, ácidos grasos esenciales, etc. (Contreras *et al.*, 2003).

Varios de estos productos son todavía producidos comercialmente en sistemas en carrusel o en lagunas abiertas. Ejemplos de esto son la producción de ficobiliproteínas y biomasa de la cianobacteria *Spirulina*, en países como los Estados Unidos, India, China y Cuba, así como la producción de β -caroteno utilizando *Dunaliella* en Israel y Australia (Lorenz y Cysewski, 2000).

Aunado a esto en la actualidad, la obtención de biodiesel a partir de las algas marinas es ya una realidad. De hecho cada vez existen más países que disponen de extensos cultivos de algas dedicados a la obtención del preciado “oro verde” a escala industrial (Beteta, 2009).

La producción de todas estas sustancias a partir de microalgas es costosa, no obstante, el empleo de fotobiorreactores modernos sin duda será una contribución importante para reducir el costo de producción de estos compuestos y hacer más competitiva su producción mediante la utilización de microalgas (Contreras *et al.*, 2003).

3.- OBJETIVOS

GENERAL:

Diseñar un fotobiorreactor para el cultivo de micro algas, tomando en cuenta los múltiples factores que pueden incidir tanto en la hidrodinámica como en el crecimiento de las algas; todo esto con la ayuda del uso de herramientas de simulación asistida por computadora (Solid Works)

ESPECÍFICOS:

- I. Enlistar las recomendaciones importantes para el diseño de fotobiorreactores.
- II. Elaborar propuestas de diseño preliminar de un fotobiorreactor.
- III. Elegir un diseño de un fotobiorreactor el cual sea novedoso, ideal para el crecimiento de algas y económicamente rentable.
- IV. Realizar la simulación del reactor elegido.

4.- PROBLEMAS A RESOLVER

- Formular un diseño de fotobiorreactor el cual sea del material adecuado para tratar de que sea lo menos costoso posible.
- Tomar en cuenta que el fotobiorreactor esta diseñado para el crecimiento de microalgas, por lo tanto considerar que el material elegido permita el correcto crecimiento de las algas ayudado de luz solar o artificial.
- Comprobar que el diseño ayuda al crecimiento integral de la microalga a cultivar, ese diseño debe contener todos los parámetros que la especie requiera para subsistir y crecer (luz, pH, CO_2 , agitación y suministro de nutrientes).

5.- ALCANCES Y LIMITACIONES

5.1 ALCANCES:

- Al diseñar el fotobiorreactor mediante herramientas de computación podremos en todo momento cambiar su forma, las entradas de flujo, etc.; lo cual representa una gran ventaja debido a que sin esta herramienta tendríamos que construir y reconstruir cada reactor si en momento dado en la simulación hidrodinámica no se muestra resultados favorables, entonces ahorramos tiempo y esfuerzo y sobre todo material, lo que implica menos costo de construcción.

5.2 LIMITACIONES:

- La limitante principal que existe es la escalación. El reactor será diseñado para su uso en el laboratorio de investigación, por lo cual su tamaño debe ser adaptado a las necesidades del mismo, para que en su momento dado se experimente con el sea de fácil manejo para el operario. Entonces, si en algún momento dado se obtienen resultados alentadores y se decida construirse en escala mayor se debe volver a realizarse el diseño y la simulación, esto debido a que se tienen que considerar nuevamente todos los factores que están involucrados en el crecimiento de las algas y no solamente el volumen y área del fotobiorreactor.
- Otro factor importante que hay que tomar muy en cuenta, y que limita en gran parte al desarrollo del proyecto es la dificultad de obtención y manejo de los programas a utilizar (Solid Works y Comsol).

6.- FUNDAMENTO TEÓRICO

6.1 ANTECEDENTES

En la década de 1950 se postuló por primera vez que el empleo de luz solar y agua marina, para obtener cultivos masivos de microalgas ricas en proteína de alta calidad, podría ser una buena alternativa para obtener alimento para el ser humano (Becker, 1994).

En el transcurso de los años se pudieron diversificar las áreas donde las microalgas eucariotas (Vilchez *et al.*, 1997) cultivadas masivamente tienen aplicaciones prometedoras. (Contreras *et al.*, 2003).

El cultivo intensivo de microalgas ha sido posible en gran medida gracias al desarrollo de nuevos diseños de fotobiorreactores.

Existen dos diseños básicos para la producción de microorganismos fotoautotróficos (Grobbelaar, 2000), los sistemas abiertos en los que el cultivo está expuesto a la atmósfera y los sistemas cerrados, comúnmente denominados fotobiorreactores, en los que el cultivo tiene poco o ningún contacto con la atmósfera. La mayoría de los sistemas de producción industrial de biomasa de microalgas construidos antes de los años 90 fueron esencialmente sistemas abiertos tipo carrusel (Figura 6.1 adaptado de Contreras *et al.*, 2003), que permiten alcanzar densidades celulares de hasta 0,7g de células (base seca) por litro.

Estos sistemas, constituidos por canales poco profundos (nivel de agua de 15-20cm) en forma de circuito cerrado, generalmente requieren de grandes áreas de terreno (500- 5000m²), pero tienen como ventaja el bajo costo de producción de biomasa algal en algunas zonas geográficas específicas.

La baja densidad celular origina varios inconvenientes, incluyendo baja productividad, fácil contaminación, costosa recuperación del producto de medios diluidos y dificultad para el control de la temperatura. Estos inconvenientes estimularon el desarrollo de fotobiorreactores construidos con materiales transparentes como vidrio y policarbonato, entre otros materiales que se trataran posteriormente.

Las configuraciones de fotobiorreactores disponibles son numerosas (Lee, 1986; Tredici y Materassi, 1992; Borowitzka, 1996; Pulz y Scheinbenbogen, 1998), pero

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIORREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA

la mayoría se pueden clasificar en uno de dos tipos: o bien dispositivos tubulares o paneles planos. Estos pueden clasificarse de acuerdo con la orientación de los tubos o paneles, el mecanismo para la circulación del cultivo, el método utilizado para proporcionar luz, el tipo de sistema de intercambio de gas, la disposición de las unidades individuales de crecimiento, y los materiales de construcción empleados.

En la última década los fotobiorreactores tubulares y de placas planas (Figura 6.1 adaptada de Contreras *et al.*, 2003) han recibido, mucha atención, ya que permiten establecer cultivos de alta densidad celular, 3 o más veces en comparación con los sistemas convencionales de carrusel. Esto tiene ventajas como 1) facilidad para cosechar la biomasa, 2) mantenimiento del cultivo sin contaminación, 3) mejor control de las condiciones de cultivo y 4) menor inversión de capital en el fotobiorreactor.

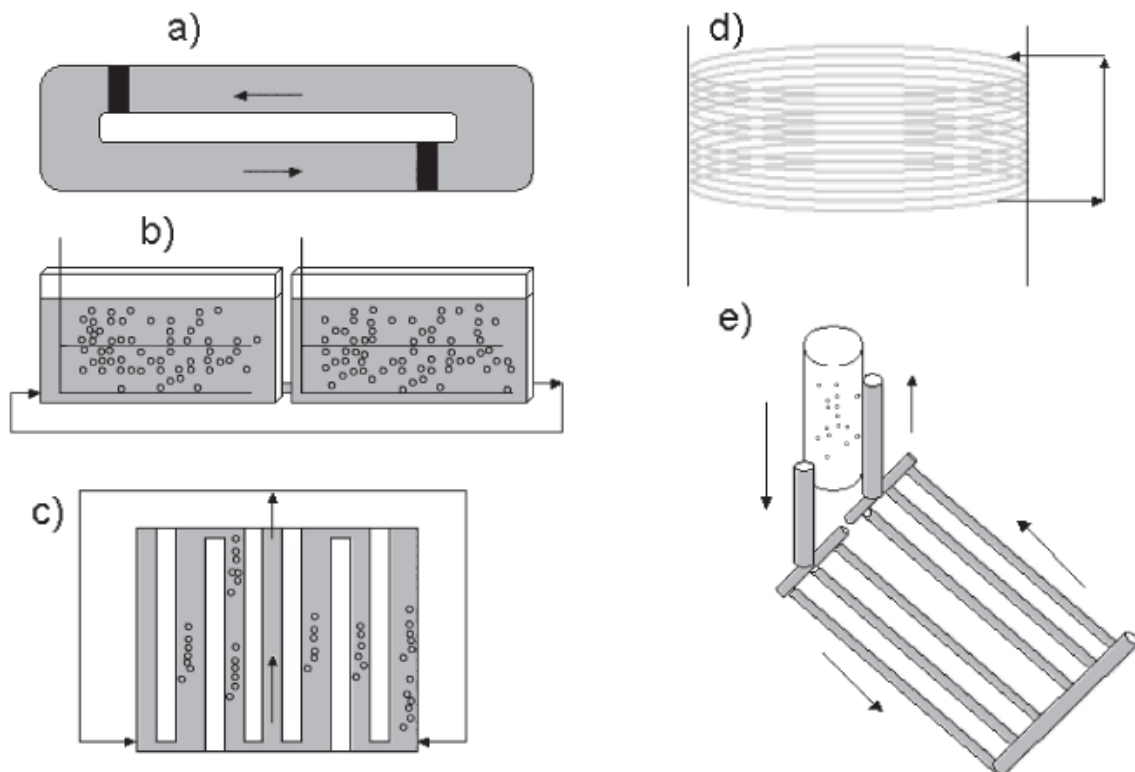


Figura 6.1 (adaptada de Contreras *et al.*, 2003) tipos básicos de fotobiorreactores a: Tipo carrusel, vista superior, los bloques negros indican propelas. b: Tipo plano,, vista horizontal. c: Con iluminación interna, los bloques blancos indican espacios de iluminación. d: Tipo serpentin. e: Tipo tubular horizontal con sistema airlift.

Algunos productos potenciales se enumeran a continuación en la Tabla 6.1

Producto	Organismo fuente ^{a,b}	Uso actual o potencial
Amphidinolides y amphidinins	<i>Amphidinium sp.</i>	Agente antitumor
Astaxantina	<i>Haematococcus pluvialis</i> , <i>Chlorella sp.</i>	pigmentos
β -Caroteno	<i>Dunaliella</i>	Colorante y suplemento alimenticio
Ácido docosahexaenoico	<i>Isochrysis galbana</i>	Ácido graso esencial
Ácido γ -Linolenico	<i>Spirulina sp.</i>	Ácido graso esencial
Otros ácidos grasos poliinsaturados	<i>Phaeodactylum tricornutum</i> , <i>Isochrysis galbana</i>	Cuidado de la salud, suplemento alimenticio
Fucoxantina	<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	antioxidante
Goniodomins	<i>Alexandrium hiranoi</i> ,	agente antifúngico
Ficobiliproteínas	Alga roja, cianobacterias	Colorantes
Oscillapeptin	<i>Oscillatoria agardhii</i>	Inhibidor de elastasa
Ficocianina	<i>Spirulina platensis</i>	colorante

^a Basado en Yamaguchi (1997) y Benemann (1989).

^b Sólo los ejemplos representativos están listados

Tabla 6.1 Posibles productos de alto valor a partir de microorganismos fotosintéticos^a

6.2 SISTEMAS DE PRODUCCIÓN DE ALGAS

Anteriormente ya habíamos mencionado brevemente las clasificaciones generales de los fotobiorreactores pero a continuación profundizaremos un poco más sobre ello.

6.2.1 Sistemas de cultivo abierto

Muchos sistemas de cultivo abierto, utilizando la luz solar natural, se construyeron después de finales de 1940. Los experimentos pioneros abiertos al aire libre para la producción de masa de algas fueron reportadas de Alemania y Estados Unidos.

La producción comercial de algas fue principalmente realizada en este tipo de sistemas abiertos, particularmente en estanques circulares, con la principal ventaja de usar la energía de la luz libre del sol.

Como sea, a gran escala el cultivo abierto de algas típicamente resulta en bajas densidades de celular, resultando en procedimientos costosos de cosecha y desfavorable económicamente en adición a la dificultad de control de las especies.

Estos sistemas son fácilmente contaminados por otros organismos, por lo que es difícil mantener un monocultivo en sistemas abiertos. Así estos sistemas solo se han probado para cultivos de especies específicas que crecen en ambientes altamente selectivos que excluyen a los microorganismos contaminantes.

Además el asentamiento causa bajos rendimientos, inestables poblaciones de algas y dificultad en la distribución de nutrientes. Por lo tanto varios sistemas de mezclado han sido añadidos, como hélices, paletas, ruedas, brazos rotatorios, bombas, etc.

Lo anterior ha incrementado el costo del capital de operación en estos sistemas. Aun considerando estos costos, los sistemas de estanques están entre los menos costosos, pero están frecuentemente entre los menos productivos.

6.2.2 Sistemas cerrados al aire libre

Hasta ahora, el cultivo de masas al aire libre de las algas ha sido sin duda el tema más candente en la biotecnología de algas, pero el énfasis excesivo en los sistemas de cultivos abiertos ha retardado sin duda el desarrollo de la biotecnología de algas.

Mientras que la tecnología de cultivo abierto está más o menos en un punto muerto, fotobiorreactores cerrados en espacios abiertos al aire libre (generalmente al aire libre) se han instalado para el cultivo de cepas de algas especializadas para la producción de sustancias bioquímicas específicas.

Los fotobiorreactores cerrados más ampliamente adoptados son los tubulares rígidos, paneles delgados, ó fotobiorreactores de placas planas.

Las ventajas de estos fotobiorreactores son:

1. Un mejor control ambiental de importantes variables fisicoquímicas (temperatura, pH, CO_2 , etc.).
2. Incrementa la concentración de biomasa lo cual facilita la cosecha.
3. Esterilización eficaz del sistema y facilitar el mantenimiento de un monocultivo, debido a la prevención de la contaminación importante del entorno.

Como sea estos sistemas siguen sujetos por las condiciones al aire libre y los problemas de asentamiento.

Variaciones estacionales, latitudinales y diurnas en condiciones de luz, temperatura ambiente y el oxígeno disuelto hacen reproducibilidad cultivo especialmente problemáticos.

Por lo tanto, para los sistemas de cultivo al aire libre, es técnicamente difícil de establecer cultivos de alta densidad de algas fotoautotróficas, si no imposible.

6.2.3 Sistemas cerrados en interiores

Con el fin de mejorar el nivel de la biotecnología de las algas, los ingenieros en bioprocesos han desarrollado fotobiorreactores cerrados bajo techo, con luz eléctrica para la irradiación. Como el uso de algas se expande para los fabricantes se deben garantizar la calidad de sus productos a base de algas.

Por lo tanto los fermentadores convencionales, tales como biorreactores de tanque agitado y columnas verticales cilíndricas, se han modificado mediante el empleo de fuentes de luz artificial: luces fluorescentes (tubos de luz), fibras ópticas o diodos emisores de luz, y placas.

Los radiadores internos son especialmente conocidos por distribuir energía de la luz de manera más eficiente dentro de fotobiorreactores que los radiadores externos.

Debido a las geometrías complejas de estos fotobiorreactores se puede supervisar y controlar las condiciones ambientales de los cultivos y de los parámetros de crecimiento, y el diseño sistemático y la estrategia de ampliación de estos fotobiorreactores se han examinado para el éxito de la industrialización a escala comercial.

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIOREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA

Sin embargo, estos fotobiorreactores, cerrados, de interiores están actualmente restringidos a operaciones a escala de laboratorio, y su uso generalizado ha sido limitado por el costo alto de instalación y problemas de escalamiento.

Es difícil comparar directamente las características de rendimiento de los sistemas abiertos, cerrados y fotobiorreactores interiores. Cada sistema tiene sus ventajas y desventajas, y la elección del sistema depende del coste de producción, el valor de los productos deseados y la cantidad de producción de los productos.

El desempeño de sistemas reportados anteriormente se enumeran en la tabla 6.2.3, la cual demuestra claramente que la luz es el principal factor limitante. Mayores productividades y la concentración de células puede estar en los fotobiorreactores con una alta relación S / V.

Referencia	Diseño de la cámara de cultivo	Vol* L totales	Relación S/V	Productividad		Biomasa máxima g/L
				Por área g m ² day ¹	Por volumen g L ¹ day ¹	
Davis, 1953 [93]	Tubular	1	170 ^a	11.7	1.3	18.5
Tamiya, 1953 [94]	Tubular	40	40 ^a	17		17.5 ^a
Juttner, 1977 [95]	Column	30	28.6 ^a			1.85 ^a
Pirt, 1983 [30]	Tubular	4.6	127	52.8		20
Mori, 1985 [38]	Tank	2.4	580		1.65 ^a	5
Roubicek, 1986 [96]	Falling-film	190	7.5 ^a			1.2
Torzillo, 1986 [97]	Tubular	8,000	10	25		1.2
Driessens, 1987 [98]	Column	2	1 ^a		10.41 ^f	4.19
Miyamoto, 1988 [99]	Column	4.6	80	23	0.57	
Treat, 1989 [100]	Tank	2.5				8.2
James, 1990 [101]	Column	200	0.66 ^a		0.246	
Lee, 1990 [102]	Helix	0.315	127			4.6
Javanmardian, 1991 [39]	Cylinder	1	320		1.51	7.5 ^a
Ratchford, 1992 [31]	FPARL ^c	10	50			2.27
Tredici, 1992 [32]	VAP ^b		80	23.9		7
Takano, 1992 [103]	LDOF ^d	2.5	692 ^e		1.94	11.2
Yongmanitchai, 1992 [104]	Tank	5.6	19.3		0.51	2.67
Burgess, 1993 [105]	LDOF	2.5				1.9
Torzillo, 1993 [106]	Tubular	145	54	27.8		6.3
Lee, 1995 [69]	Slab	0.1	100	44	3.15	25
Hu, 1996 [107]	Inclined slab	6	85	51.1	4.3	15.8
Hu, 1998 [108]	Flat-plate	0.34	132		28.8	26.6
Degen, 2001 [55]	Flat-panel	1.5	56		2.64	4.8

^a Valores no dados por los autores. Los valores fueron estimados indirectamente por otros parámetros basados en el artículo. ^b VAP significa panel alveolar vertical. ^c **FPALR representa** un reactor air-lift de placas planas. ^d LDOF significa difusión de luz por fibras ópticas. ^e valor corregido para un cultivo fotomixotrófico

Tabla 6.2 adaptado de soo suh y gyun lee 2003. Comparación del desempeño de varios fotobiorreactores de algas.

6.3 FLUJO BIFÁSICO

Muchas situaciones naturales y artificiales proporcionan ejemplos de flujo de dos fases como las burbujas que suben en una bebida carbonatada, las gotas que caen a través del aire, gasolina y aire que reaccionan en un motor de automóvil, etc.

Común a todos los flujos de dos fases es la existencia de interfaces discernibles o límites que separan una fase de la otra. Si el flujo consiste en dos líquidos inmiscibles, un líquido y un sólido, un líquido y un vapor o un sólido y un vapor, la topología interracial cambia constantemente como las fases interactúan, intercambian energía, momento y masa a menudo.

Estas interacciones y los cambios en la topología interracial son el aspecto más difícil del modelo de flujo de dos fases. Aunque poco progreso se ha hecho en la descripción de la dinámica detallada de los primeros principios, las propiedades macroscópicas de los flujos de dos fases pueden ser determinadas satisfactoriamente a partir de modelos aproximados. Estos modelos son esenciales para la operación segura y económica de una gran cantidad de sistemas comerciales de la generación de energía, calefacción y refrigeración, procesamiento de materiales y sistemas de transporte para nombrar unos pocos.

En el caso que nos atañe, para el diseño de un fotobiorreactor debemos tomar en cuenta la presencia del flujo de dos fases, en este caso entre un gas y un líquido.

6.3.1 Regímenes de flujo en tuberías verticales

Los flujos de dos fases presentan diversos regímenes de flujo, o patrones de flujo, dependiendo de la concentración relativa de las dos fases y la velocidad de flujo.

Un conjunto sencillo pero generalmente adecuado conjunto de fases descriptivas para la mayoría de los regímenes de flujo importantes líquido-vapor se compone de flujo de burbujas, flujo pistón, flujo revuelto, flujo anular, y flujo de gotitas.

Flujo de burbujas: describe el flujo de regiones distintas de vapor, aproximadamente esféricas, rodeadas de líquido continuo. El diámetro de la burbuja es generalmente considerablemente menor que la del recipiente a través del cual fluyen. El flujo de burbujas ocurre generalmente a bajas concentraciones de vapor.

Flujo pistón: se le conoce así cuando el vapor y el líquido están fluyendo a través de un tubo, las burbujas pueden unirse dentro de la larga región de vapor que tiene al menos el mismo diámetro que el tubo.

Flujo revuelto: A concentraciones de moderadas a altas velocidades de flujo y aproximadamente igual de vapor y líquido, el patrón de flujo es a menudo muy irregular y caótico. Si el flujo no contiene entidades distintas con esférica o, en una tubería, la simetría cilíndrica, se dice que es un flujo revuelto.

Flujo anular: A alta concentración de vapor, el líquido puede existir como una película delgada que moja la pared de la tubería (flujo anular) o como pequeñas gotitas aproximadamente esféricas en la corriente de vapor (flujo gota). Si tanto una película delgada y las gotas de existen, el flujo se describe como flujo de gotitas anular.

En la figura 6.3.1-1 podemos observar los primeros cuatro distintos tipos de flujo de dos fases, los cuales mencionamos anteriormente:

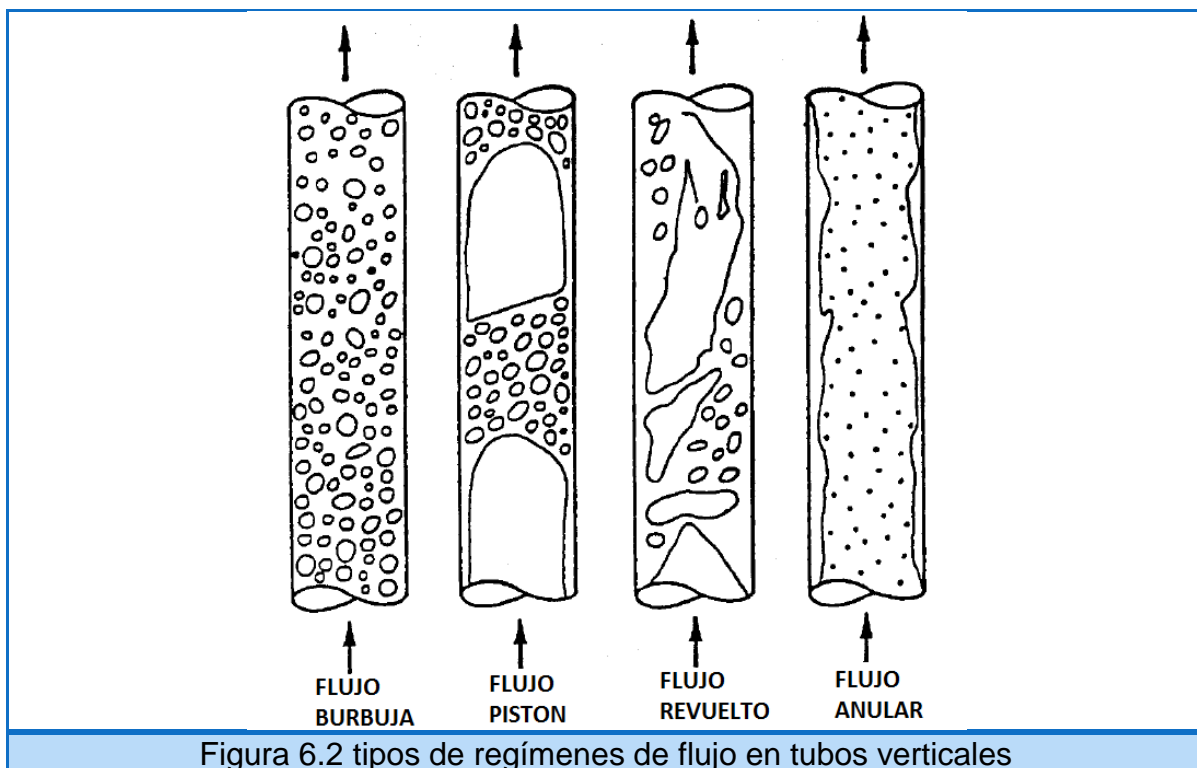


Figura 6.2 tipos de regímenes de flujo en tubos verticales

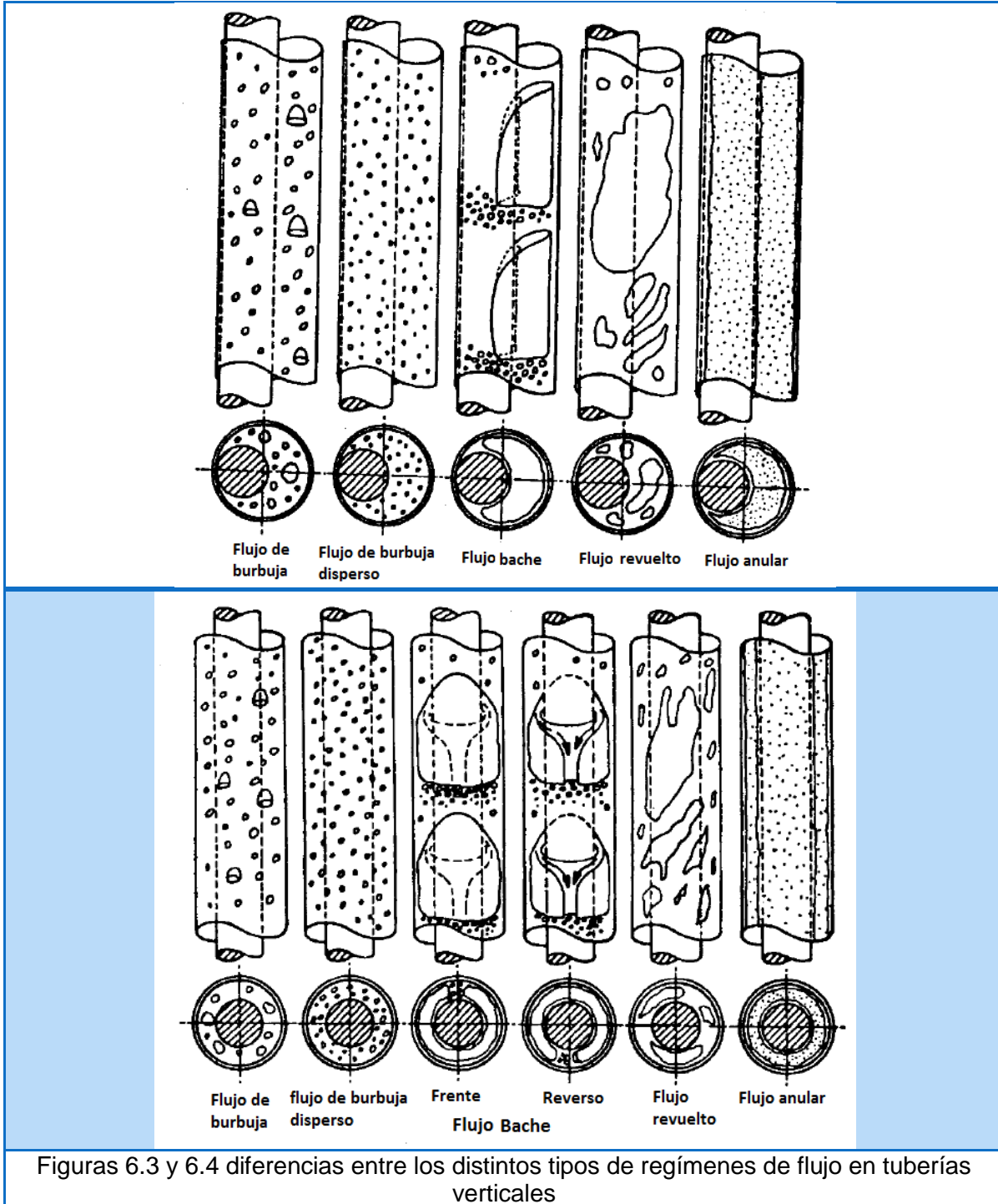
Flujo bache: este patrón de flujo está caracterizado por burbujas largas en forma de balas con una suave interfase gas-líquido y un largo mayor al diámetro de la

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIOREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA

tubería, y un flujo intermitente con baches de liquido los cuales contienen pequeñas burbujas de gas.

A continuación se muestra la comparación de los tipos de flujo de dos fases.



Figuras 6.3 y 6.4 diferencias entre los distintos tipos de regimenes de flujo en tuberías verticales

6.3.2 Regímenes de flujo en tuberías horizontales

Los patrones de flujo en tuberías horizontales son:

Segregado:

- * **Estratificado:** se caracteriza por una separación completa de las fases, en la cual el líquido fluye por el fondo de la tubería y el gas por la parte superior de la misma.
- * **Ondulado:** se produce al aumentar la velocidad del gas con respecto a la que se tenía en el estratificado, produciendo ondas en la interface gas-líquido.
- * **Anular:** éste se evidencia al manipular grandes caudales de gas. Usualmente se observan gotas de líquido desplazándose a través del centro gaseoso y, a consecuencia del efecto de la gravedad, la película del fondo de la tubería es generalmente más gruesa que la superior.

Intermitente:

- * **Pistón:** El flujo pistón se caracteriza por que exhibe una serie de unidades de tapón, cada uno es compuesto de un depósito de gas llamado burbujas de Taylor y una cubierta de líquido alrededor de la burbuja. Los tapones van incrementando su tamaño hasta cubrir toda la sección transversal de la tubería.
- * **Bache:** En este caso las crestas de las ondulaciones pueden llegar hasta la parte superior de la tubería en la superficie del líquido.

Distribuido:

- * **Burbuja:** El flujo de burbujas se caracteriza por una distribución uniforme de la fase gaseosa así como la presencia de burbujas discretas en una fase líquida continua. El régimen de flujo de burbujas, se divide en flujo burbujeante y flujo de burbujas dispersas. Los dos tipos difieren en el mecanismo de flujo. El flujo burbujeante ocurre a tasas de flujo relativamente bajas, y se caracteriza por deslizamiento entre las fases de gas y líquido. El flujo de burbujas dispersas ocurre a tasas altas de flujo, moviéndose las burbujas de gas a lo largo de la parte superior de la tubería. La fase continua es el líquido que transporta las burbujas

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIOREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA

- * Niebla: El líquido está completamente "disuelto" en el gas; es decir, la fase continua es el gas y lleva en "suspensión" las gotas de líquido.

En la siguiente figura se ilustran los distintos tipos de flujo bifásico en tuberías horizontales:

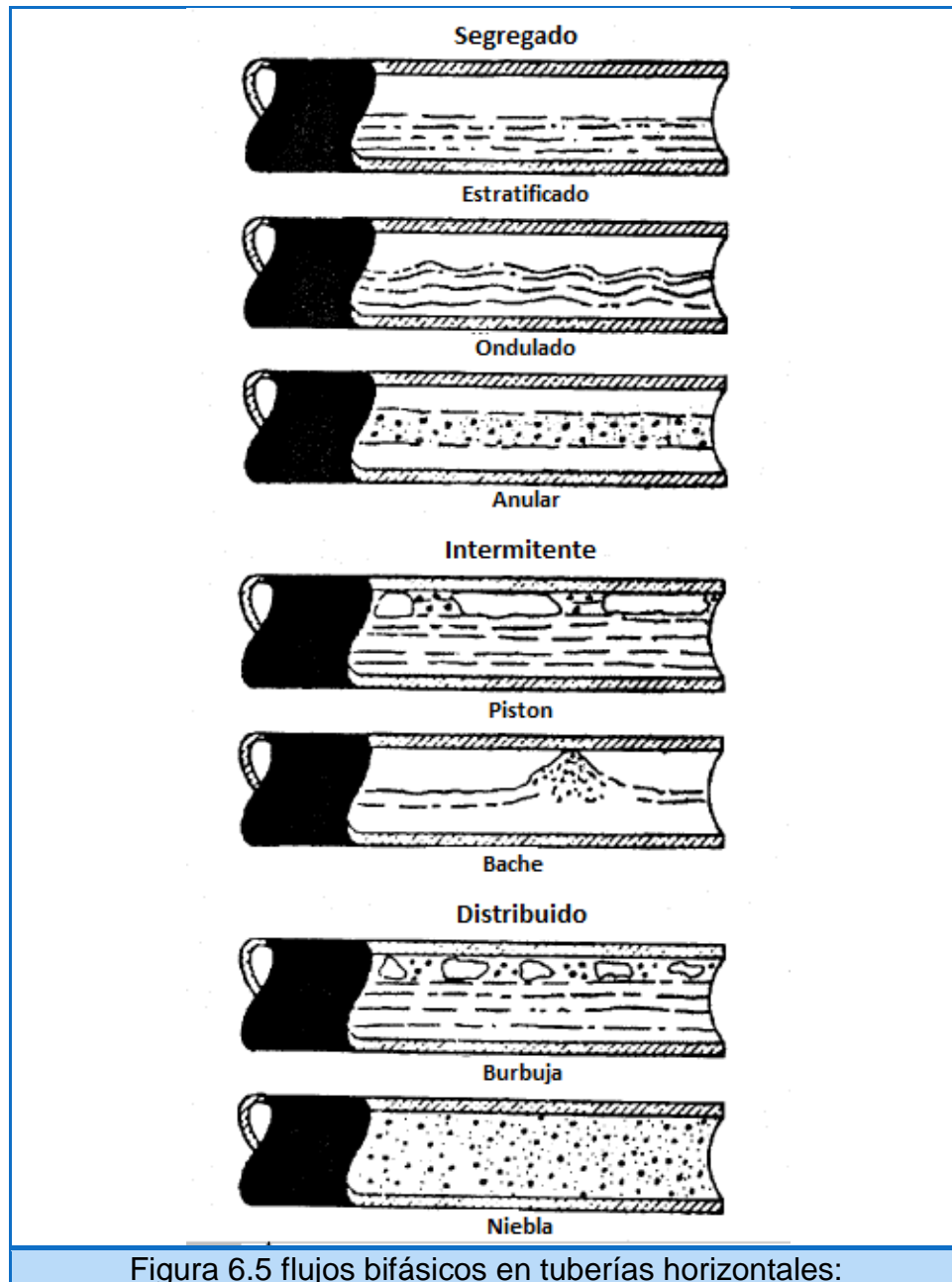


Figura 6.5 flujos bifásicos en tuberías horizontales:

6.4 RÉGIMEN DE LUZ

6.4.1 ¿Cómo afecta la luz a la productividad?

La disponibilidad y la intensidad de la luz son los factores principales que controlan la productividad de los cultivos fotosintéticos (Lee and Low, 1992; Pulz y Scheinbenbogen, 1998). En el cultivo continuo, normalmente practicado por microalgas, la productividad de biomasa (p) es una función de la concentración celular (CB) en el efluente y la tasa de dilución (D), así:

$$p = DC_b \quad (1)$$

En estado estacionario, la tasa de dilución es igual a la tasa de crecimiento específico (μ), que se rige por la cantidad de luz, el factor de control de la velocidad. La dependencia de μ en la irradiancia media se ha expresado de diversas maneras tal como se resume en la Tabla 6.3.1 (adaptado de Molina *et al.*, 1999). Generalmente, μ aumenta con la irradiancia creciente, alcanzando un valor máximo, μ_{max} . El aumento adicional en la irradiancia en realidad puede inhibir el crecimiento, este fenómeno es conocido como fotoinhibición.

Ecuación	Referencia
1. $\mu = \frac{\alpha\mu_{max}I}{\mu_{max} + \alpha I}$	(2) Tamiya et al. (1953)
2. $\mu = \mu_{max}\left(1 - e^{-\frac{I}{I_{max}}}\right)$	(3) Van Oorschot (1955)
3. $\mu = \frac{\mu_{max}I}{I_{max}} e^{\left(1 - \frac{I}{I_{max}}\right)}$	(4) Steele (1977)
4. $\mu = \frac{\mu_{max}I}{(K_t^m + I^m)^{\frac{1}{m}}}$	(5) Bannister (1979)
5. $\mu = \frac{\mu_{max}I}{K_s + I + \frac{I^2}{K_t}}$	(6) Aiba (1982)
6. $\mu = \frac{\mu_{max}I^n}{I_k^n + I^n}$	(7) Molina Grima et al. (1994)

Adaptado de Molina *et al.*, 1999

Tabla 6.3 Modelos para la tasa de crecimiento específica en la dependiente de la luz

Las ecuaciones (2) a (4) y la ecuación. (7) en la Tabla 2 no toman en cuenta la fotoinhibición. En la Tabla 2, sólo la ecuación (5) y la ecuación. (6) consideran los efectos inhibitorios de la luz excesiva.

Los estudios sugieren que los modelos de crecimiento que expresan μ en términos de irradiancia media plantean una potencia mayor que las observaciones experimentales (Fernández Sevilla, 1995; Pulz y Scheinbenbogen, 1998). Por lo tanto, se estableció la ecuación (Molina *et al.*, 1996):

$$\mu = \frac{\mu_{\max} \cdot I_{av}^{\left(b + \frac{c}{I_o}\right)}}{\left[I_k \left(1 + \left(\frac{I_o}{K_i} \right)^a \right) \right]^{\left(b + \frac{c}{I_o}\right)} + I_{av}^{\left(b + \frac{c}{I_o}\right)}} \quad (8)$$

6.4.2 ¿Qué es la irradiancia promedio?

La irradiancia media (I_{av}) es el nivel de luz que experimenta una célula al azar en movimiento dentro del cultivo (Rabe y Benoit, 1962). En un sistema libre de células la irradiancia media es independiente del estado de la mezcla.

Cuando las células se distribuyen homogéneamente, la irradiancia media en condiciones dadas de nuevo es el mismo para todas las células, sin embargo la irradiancia media no es un criterio suficiente de rendimiento cultivo, ya que sólo tiene en cuenta la longitud total de la oscuridad y los periodos de luz y no la frecuencia de los cambios.

Ignorando por el momento la dinámica de la célula, el nivel de irradiancia media (I_{av}) en el interior del cultivo depende de los siguientes factores: la irradiación externa (I_o), la geometría del reactor (Frohlich *et al.*, 1983; Lee y Low, 1991, 1992; Quiang *et al.*, 1996; Acién *et al.*, 1997), la concentración y morfología de las células.

Los métodos actuales de estimación de un nivel de “irradiancia promedio” no tienen en cuenta los ciclos de luz-oscuridad asociada con el movimiento de fluidos en un biorreactor. En realidad, el régimen de luz experimentada por las células, es decir, la iluminación total acumulado y la frecuencia de movimiento de luz y oscuridad, es lo que lógicamente debería afectar a la productividad de la biomasa.

Los métodos existentes de estimación de iluminación promedio emplean un enfoque que consiste en lo siguiente:

- (i) La estimación de la radiación total incidente fotosintéticamente activo en la superficie del fotobiorreactor.
- (ii) El uso de la ley de Beer-Lambert para determinar el nivel de radiación en cualquier profundidad en el interior del cultivo..
- (iii) Alguna forma de promedio de la intensidad de radiación en el interior del recipiente.

6.5 LA CURVA DOSIS-RESPUESTA A LA ENERGÍA LUMINOSA

Un aspecto de suma importancia en el cultivo de organismos fotoautotróficos en general, es el relacionado con el aprovechamiento de la energía radiante durante la fotosíntesis. La tasa de fotosíntesis celular F (capacidad de captación de fotones) depende de la energía luminosa que reciben las células.

La curva dosis-respuesta que describe esta relación representa una respuesta típica del crecimiento respecto a la disponibilidad de sustrato (Richmond, 2000). A bajos niveles de intensidad luminosa la rapidez de la fotosíntesis aumenta con la intensidad de luz, pero niveles de energía incidente superiores a un cierto valor (E_k) inducen sólo pequeños cambios en F (Figura 6.5 adaptada de Richmond, 2000).

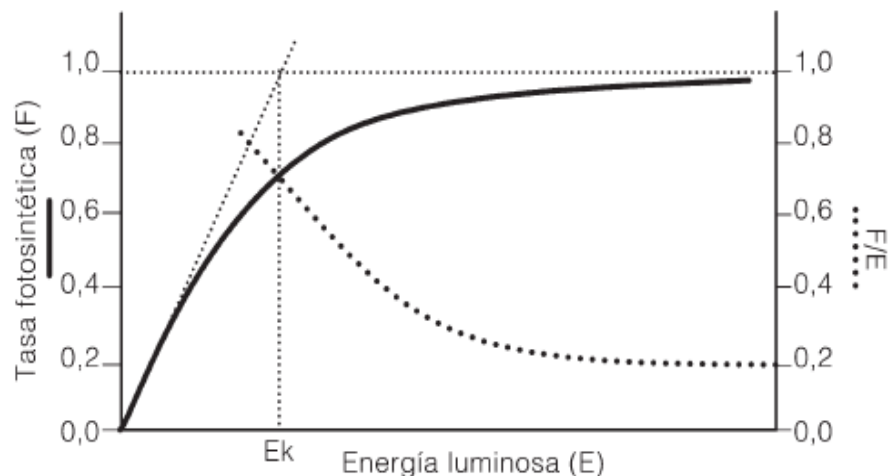


Figura 6.6 Adaptada de Richmond 2000. Efecto de la energía luminosa (E) en la tasa fotosintética (F) y en la eficiencia fotosintética (F/E). E_k es la constante de saturación

La constante específica E_k , característica para cada organismo, indica el nivel de energía luminosa al que comienza a saturarse el fotosistema de un organismo. La

energía incidente puede llegar a niveles que causan inhibición de los fotosistemas celulares, lo cual puede deteriorar el cultivo y causar incluso un daño irreversible. Por otro lado, la eficiencia (F/E) con la que la luz incidente es utilizada disminuye rápidamente al aumentar el flujo de fotones y tiende a valores mínimos cuando la energía incidente alcanza niveles superiores a E_k (a mediodía en cultivos expuestos a la luz solar).

La curva dosis-respuesta describe lo que sucede cuando la luz es el factor limitante y todas las células reciben la misma cantidad de energía luminosa.

Bajo ciertas condiciones, los cultivos con mayor densidad celular, son capaces de utilizar la luz incidente con mayor eficiencia en comparación con cultivos convencionales diluidos.

La fotoinhibición puede no presentarse aún en cultivos expuestos a intensidades de luz elevadas. Esto en gran medida se debe a una dilución de la luz, como resultado del autosombreado.

Siempre que la densidad celular aumenta con relación a la luz incidente, el cultivo no alcanza a saturarse por completo. Entonces, la inhibición del crecimiento por un exceso de luz (fotoinhibición) implica en esencia que la densidad celular no se ajusta a la intensidad de la fuente de luz.

6.6 DISEÑO DE FOTOBIOREACTORES BASADOS EN CONCEPTOS SOBRE DISTRIBUCIÓN DE LUZ.

En cultivos de microorganismos fotoautótrofos en los que otros factores no son limitantes, la disponibilidad de luz determina la intensidad a la que se realiza la fotosíntesis y, como consecuencia, determina también la velocidad de crecimiento (μ). Sin embargo, en todos los sistemas de cultivo, las células más cercanas a la superficie iluminada impiden la penetración de la luz hacia el seno del medio de cultivo y producen un efecto de sombreado sobre las células más alejadas de la superficie. En algunos cultivos se ha estimado que la luz penetra solo de 1 a 2mm más allá de la superficie, de manera que la zona fótica representa solo una pequeña fracción (10-30%) del volumen total del cultivo (Figura 6.6)

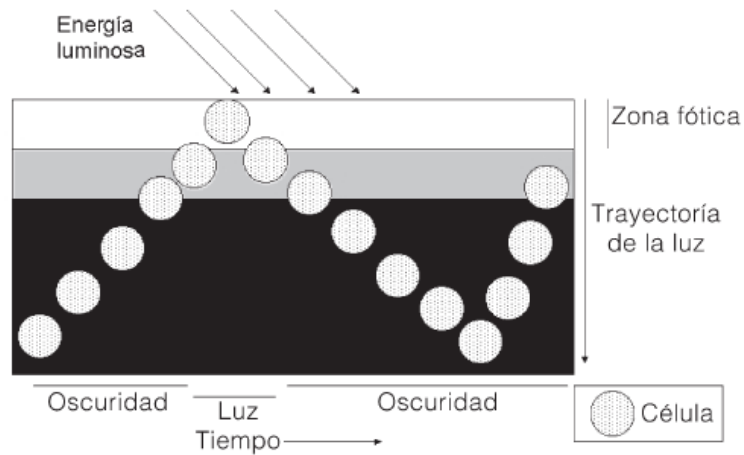


Figura 6.7 Adaptada de Contreras *et al.*, 2003. Ilustración de la trayectoria de la luz y de los ciclos luz/oscuridad.

En condiciones reales, el factor que determina la actividad fotosintética es la cantidad de energía disponible para cada célula individual, más que la cantidad de energía luminosa incidente (Lu y Vonshak, 1999). Los parámetros que pueden considerarse como básicos para describir la disponibilidad de energía bajo una iluminación intermitente son dos, la relación de los periodos luz/oscuridad (L/O) y la frecuencia de los ciclos L/O.

Para asegurar la máxima actividad fotosintética y la mejor utilización de la luz incidente, se requiere de un régimen de iluminación óptimo. No obstante, a pesar de su importancia, éste no puede determinarse cuantitativamente.

6.6.1 Trayectoria de la luz

La trayectoria de la luz es la distancia transversal que debe recorrer un fotón para pasar a través de un fotobiorreactor (Richmond, 1996), concepto que se ilustra en la Figura 6.6 (Contreras *et al.*, 2003).

La trayectoria de la luz es determinada por la profundidad de líquido en un reactor de tipo carrusel, por la separación entre las placas en un reactor de placas (horizontal o vertical) o por el diámetro del tubo en un reactor tubular. Incrementar la trayectoria de la luz implica reducir el volumen iluminado en relación al volumen no iluminado en el fotobiorreactor.

Un incremento de la trayectoria de la luz reduce tanto la frecuencia promedio con la que las células son expuestas a la luz, como la relación de los periodos L/O (Grobbelaar, 1994; Ogbonna y Tanaka, 1998). Por el contrario, una trayectoria pequeña de la luz aumenta la relación de volúmenes iluminado/oscuro, permitiendo así periodos L/O mayores, una mayor frecuencia con la que las células son expuestas en promedio a la luz y por ende un mejor régimen de iluminación.

En virtud de lo anterior, actualmente no es recomendable utilizar rutas luminosas de más de 10cm en ningún tipo de biorreactor.

6.7 FACTORES IMPORTANTES EN EL DISEÑO DE FOTOBIOREACTORES.

Para lograr una alta productividad se deben mantener altas densidades celulares, pero sin que la velocidad de crecimiento disminuya significativamente. La factibilidad de esto depende, como ya se discutió, de un suministro adecuado de luz a las células, pero además se requiere alinear cuidadosamente las condiciones ambientales en el reactor con las necesidades de la cepa seleccionada. Independientemente de la configuración del fotobiorreactor se deben considerar otros factores fundamentales como el mezclado, el autosombreado entre las células, el suministro de nutrientes (incluyendo CO_2), el control de la temperatura y la remoción del O_2 producido fotosintéticamente.

6.7.1 Importancia del mezclado en fotobiorreactores.

El mezclado favorece el intercambio gaseoso, evita la sedimentación de células, la formación de gradientes de condiciones ambientales y de concentración de nutrientes, pero su función principal es permitir que todas las células puedan acceder a las zonas iluminadas en un fotobiorreactor (Ogbonna y Tanaka, 2000; Ugwu *et al.*, 2002).

Los sistemas basados en la aireación del cultivo con aire comprimido (columnas burbujeadas o airlift), se usan comúnmente por su sencillez y porque pueden diseñarse para inducir un esfuerzo de corte pequeño que no cause daño mecánico a las células (Richmond *et al.*, 1993; Sánchez *et al.*, 2000).

En un mismo fotobiorreactor es posible establecer diferentes condiciones de mezclado para manipular el régimen de iluminación y así la tasa de fotosíntesis.

Condiciones de mezclado recomendados son de 0.6 a 4.21 l/min, donde al aumentar la aireación incrementa la productividad.

Para lograr una alta productividad y un aprovechamiento óptimo de la luz, Richmond (1996) recomienda una iluminación intensa (mediodía), el uso de reactores con una trayectoria de la luz pequeña, y un mezclado vigoroso hasta donde lo permita la fragilidad de las células.

El mezclado de un cultivo permite una utilización óptima de la luz y un “mejor régimen de iluminación”, sin embargo, puede también causar daño a las células. La fragilidad celular es con frecuencia un factor que limita la intensidad de mezclado; los niveles óptimos de mezclado dependerán de cada especie cultivada (Gudin y Chaumont, 1991).

6.7.2 Circulación del medio de cultivo en el reactor.

La elección del método para circular el líquido es otra consideración importante en el diseño de fotobiorreactores. Las paletas rotatorias, las bombas de tornillo, rotatorias o de desplazamiento positivo, y en general cualquier método mecánico, tiene la desventaja de producir importantes esfuerzos de corte y daño celular.

La velocidad del medio de cultivo en los tubos tiene que ser suficiente para asegurar un flujo turbulento que evite el crecimiento en la pared del tubo o la sedimentación de las células por una parte, y por otra que asegure un régimen de iluminación favorable para establecer una fotosíntesis intensa (Gudin y Chaumont, 1991, Camacho et al., 1999; Molina et al., 1999). Una baja velocidad de circulación del líquido (<15cm/s) casi siempre produce crecimiento en la pared y posiblemente inhibición del crecimiento por altas concentraciones de O_2 disuelto. Una velocidad de líquido en los tubos de 30- 50cm/s es apropiada en la mayoría de los casos.

Como ya se mencionó, disminuir la trayectoria de la luz incrementa la eficiencia de utilización de luz y la productividad. Sin embargo, emplear rutas luminosas muy cortas implica obstáculos técnicos adicionales.

Tanto en reactores tubulares como planos, una trayectoria de la luz de 1-2cm podría ser el mínimo práctico para operar fotobiorreactores cerrados.

6.7.3 Cultivos de alta y ultra alta densidad.

Una tecnología que surgió a finales de los años 80 fue la de cultivos algales de Alta Densidad Celular (ADC) y Ultra Alta Densidad Celular (UADC), que implican mantener concentraciones celulares superiores a 3g/l de biomasa para los primeros (Lee y Palsson, 1994) y de 15 a 80g/l para los segundos, ambos en base seca (Hu et al., 1996a, b; 1998). Al aumentar la densidad celular es posible evitar la fotoinhibición, aún a altas intensidades de luz incidente, pero por otro lado los efectos de sombreado entre las células se vuelven más severos debido a que la luz penetra menos en cultivos densos.

Cuando el suministro de nutrientes y las condiciones ambientales no son limitantes, el mezclado es determinante para la eficiencia fotosintética y la productividad a densidades celulares por encima de 3g/l.

En células mantenidas a varias densidades celulares encontraron que la cantidad de energía luminosa que para células en cultivos de menor densidad celular es sumamente tóxica, para las de cultivos de mayor densidad es óptima. Una dificultad adicional de los cultivos a altas densidades celulares es que las microalgas secretan sustancias autoinhibitorias (Richmond, 2000).

Concentraciones de hasta 80g/l se han obtenido en reactores verticales con una trayectoria de la luz pequeña, una agitación vigorosa y con remoción de sustancias autoinhibitorias. Hasta ahora la remoción de estas sustancias ha sido semicontinua y externa al fotobiorreactor en cultivos de UADC.

Para lograr cultivos de UADC se han utilizado diversas geometrías de fotobiorreactores y fuentes de iluminación, tales como reactores planos verticales con lámparas fluorescentes de luz blanca (Hu et al., 1998), reactores iluminados cuasi-internamente por diodos (Lee y Palsson, 1994), reactores iluminados internamente mediante fibra óptica (Javanmardian y Palsson, 1991), y reactores planos inclinados con iluminación solar mantenidos en exteriores (Hu et al., 1996b).

Una ventaja de mantener cultivos de UADC es la disminución de la respiración nocturna, en la cual la célula consume O_2 y oxida los carbohidratos endógenos acumulados durante el día. La pérdida de peso celular puede llegar a ser de hasta 50% en el sistema de carrusel, mientras que en UADC la pérdida puede ser menor del 5% debido a que la alta densidad celular reduce de manera importante la

disponibilidad de O_2 que cada célula puede utilizar en la respiración (Hu et al., 1996b).

En cultivos de UADC el contenido proteico de las células puede ser inferior en un 40% con respecto a células crecidas a baja densidad celular. Si se piensa utilizar el producto como fuente de proteínas en alimento humano o animal esto podría representar una desventaja.

6.7.4 Fotoinhibición por oxígeno.

Para escalar fotobiorreactores planos, usualmente se aumenta la capacidad del cultivo con unidades conectadas en serie o “cascada” (Hu et al., 1996a). En el caso de reactores tubulares y de serpentín, el escalamiento se hace aumentando la longitud de la tubería. Cuando se usan solo estos criterios de escalamiento, la acumulación de O_2 disuelto puede representar un fuerte obstáculo para el crecimiento de las algas. Altos niveles de O_2 disuelto en el medio de cultivo causan inhibición de la fotosíntesis (Camacho et al., 1999) y en condiciones extremas pueden incluso causar la muerte de las células por daño oxidativo.

La remoción del O_2 producido fotosintéticamente es una necesidad al escalar reactores cerrados. En los reactores tubulares horizontales, una estrategia común es instalar etapas de aireación tipo airlift para remover por desorción el O_2 del medio de cultivo. El tiempo entre etapas de aireación depende de la velocidad lineal del medio de cultivo, de la distancia entre etapas de aireación y de la velocidad de fotosíntesis (Richmond et al., 1993).

6.7.5 Remoción de oxígeno.

El oxígeno es un producto de la fotosíntesis, pero un alto nivel de oxígeno disuelto inhibe el crecimiento del alga, incluso cuando hay altas concentraciones de CO_2 . Particularmente, en fotobiorreactores cerrados la sobresaturación de oxígeno alcanza no más de 400-500%, incluso bajo condiciones de mezclado suficientemente intensos. La respiración en la región oscura, o durante la noche, también acumula el nivel de oxígeno disuelto en suspensión de algas.

Sin embargo, muchas especies de algas no pueden soportar la exposición de 2-3 horas a niveles de oxígeno muy por encima de la saturación (7,5 mg / L a 30 ° C).

Esta inhibición de O_2 de la fotosíntesis es, precisamente, discuten en términos del efecto Waburg, la fotorrespiración o fotorreducción.

La remoción de exceso de O_2 es un problema de transferencia de masa comparable al suministro de CO_2 . Las posibilidades de control principales se disminuyen a: menor presión de oxígeno, mayor agitación, y temperatura más alta. En la actualidad, las dos soluciones principales son, (1) aumento de la turbulencia y (2) arrastre de O_2 con aire, están abiertos al diseño y operación del fotobiorreactor.

Una mezcla vigorosa disminuye la tensión de O_2 en el cultivo, particularmente cuando la mezcla es administrada por un dispositivo correctamente diseñado. Los sistemas de intercambio de gas eficientes son también instalados como una estación de gasificación, en los sistemas de fotobiorreactores.

6.7.6 Suministro de nutrientes

La disponibilidad de nutrientes es un factor importante que controla los niveles de producción primaria de organismos fotosintéticos. Medios con diferentes composiciones son suministrados a las células en la forma de dióxido de carbono. Agua y sales minerales en macro o micro cantidades.

Los macronutrientes son considerados esenciales para el crecimiento normal incluyen el carbón nitrógeno fósforo, hidrógeno, oxígeno, sulfuro, calcio, magnesio, sodio, potasio y cloro. Los micronutrientes que se necesitan en cantidades de trazas de micro, nano o incluso pico gramos por litro son: hierro, boro, magnesio, cobre, molibdeno, vanadio, cobalto, níquel, silicio y selenio.

Algunos macronutrientes pueden requerir un agente quelante para permitir que se disuelvan o minimizar su toxicidad. Los requerimientos de los nutrientes se pueden estimar desde la composición elemental de la biomasa o la estequiometría del crecimiento.

Las algas pueden secretar compuestos autoinhibitorios cuando los nutrientes más grandes son agotados durante la cultivación por lotes. Así el gasto medio es removido y repuesto por perfusión con medio fresco, o por filtración en línea con el medio altamente concentrado (incluyendo la diálisis y ultrafiltración).

La diferencia más grande entre los dos métodos es si el reactor pierde biomasa durante el proceso de reposición. Un semi-lote no puede ser usado cuando la acumulación de autoinhibidores retarda o inhibe el crecimiento algal y la fotosíntesis.

6.7.7 Control de pH

Cuando se lleva a cabo el escalamiento de fotobiorreactores, el pH del medio de cultivo puede variar significativamente.

La concentración de CO_2 puede ser controlada mediante su inyección en las zonas donde la concentración ya no permite la capacidad fijadora máxima. El pH se controlará al mismo tiempo debido al conocido equilibrio del CO_2 con el agua (Camacho et al., 1999).

La concentración de CO_2 depende del cultivo algal con el que se trabaje, por lo cual es de buena importancia considerar este factor en la regulación del pH. A continuación se muestra una relación del consumo de CO_2 (mg/L*d) de varias especies de microalgas

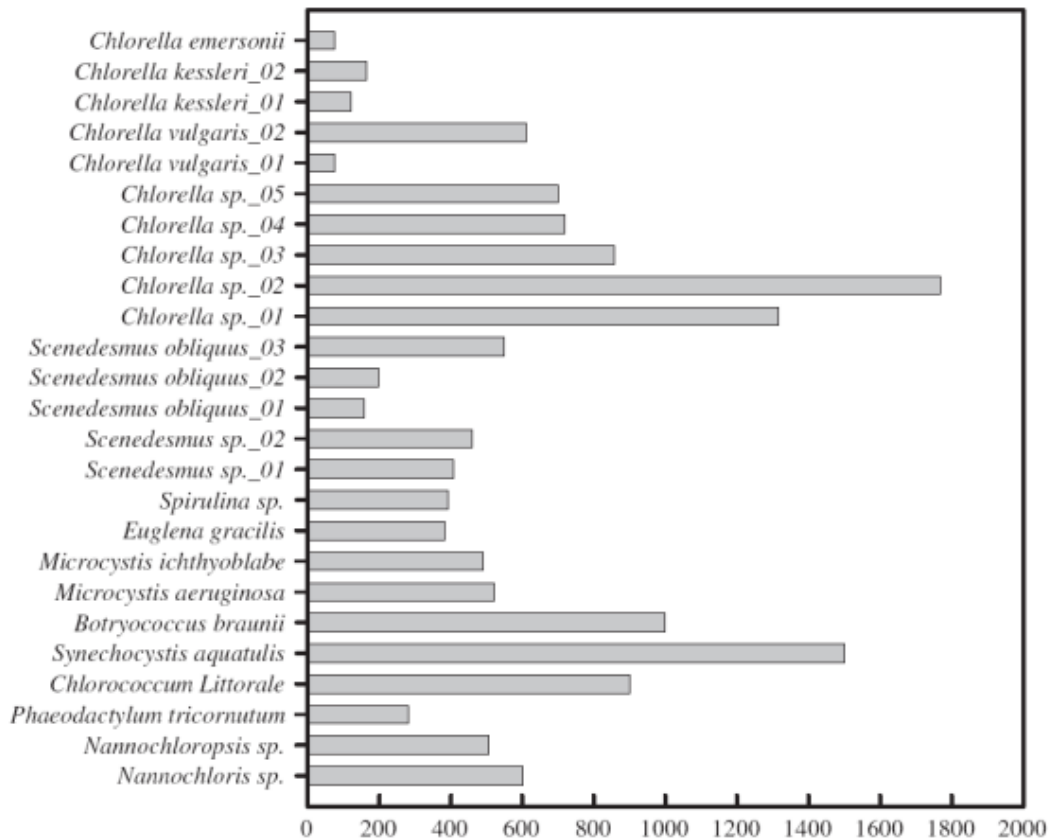


Figura 6.8 Adaptada de Ho, et al., 2011

6.7.8 Control de temperatura

El control de la temperatura es uno de los factores ambientales más característicos de las variaciones estacionales y diurnas de la temperatura ambiente.

Payer *et al.* Investigaron las respuestas de control de temperatura de 34 especies diferentes verdes y verde-azul. La mayoría de las algas exhibió una temperatura de crecimiento con un amplio intervalo en la curva de respuesta de temperatura óptimo con un descenso repentino fuera de este rango.

El cambio de la temperatura de cultivo también influye profundamente en la productividad global o la composición celular, como la fotosíntesis y la respiración son fundamentalmente reacciones basadas en enzimas (Torzillo y Materassi 1991, Thompson *et al.* 1992)

Los efectos de la temperatura sobre la fotosíntesis de las algas han sido revisados, centrándose en las diferencias fenotípicas y genotípicas, las variaciones en el metabolismo fotosintético y en la tasa de crecimiento máximo práctico y concreto, como una función de la temperatura (Raven y Geider 1988, Davison 1991).

La temperatura es casi invariablemente medida y controlada durante el funcionamiento del fotobiorreactor. Las algas en fotobiorreactores al aire libre están expuestas a variaciones estacionales y diurnas de la temperatura y la intensidad de la luz. Sin el equipo de control de temperatura, la temperatura, durante el verano, en un fotobiorreactor cerrado puede alcanzar 10-30 °C superior a la temperatura ambiente durante varias horas.

Por lo tanto, la refrigeración por evaporación y el sombreado se usan convencionalmente, por la aspersion de agua sobre la superficie del fotobiorreactor y mediante el bloqueo de la luz del sol a un cierto grado, respectivamente. Los intercambiadores de calor se incorporan principalmente para la calefacción de los cultivos en climas más fríos.

Con el fin de reducir el costo de refrigeración y aumentar las velocidades de reacción diferentes dentro de la célula, la temperatura de cultivo debe funcionar a la máxima posible para no introducir el estrés en el organismo.

6.8 MATERIALES DE DISEÑO

Muchas configuraciones de fotobiorreactores se han diseñado y construido. Estos van desde cámaras tubulares y cilíndricas en los sistemas de lado plano y vertical. Cada uno de estos sistemas emplea una amplia variedad de materiales para la construcción fotobiorreactor. Esta revisión se ocupa de los aspectos clave involucrados en la selección del material para el diseño de fotobiorreactores para asegurar la rentabilidad y alta eficiencia.

Los materiales para la construcción de fotobiorreactores representan un problema práctico significativo tanto desde el punto de vista del coste de la inversión y el rendimiento biológico. Los materiales utilizados para el reactor incluyen vidrio, plexiglás, cloruro de vinilo acrílico o poli (PVC) y el más común, polietileno. Más adelante se abarca sobre las características y beneficios junto con las desventajas de algunos materiales predominantes utilizados para la construcción de un fotobiorreactor.

6.8.1 Vidrio

El vidrio es más comúnmente usado en fotobiorreactores destinados a la producción de biohidrógeno a partir de algas

6.8.1.1 Características y Beneficios:

- * Reactores para fotoautótrofos, como microalgas, deben ser totalmente transparentes, sin ninguna pérdida en la transparencia sobre tiempo para el cual el vidrio se emplea generalmente.
- * Entre los tipos de vidrio, el vidrio de borosilicato (Pyrex) es comúnmente usado en colectores de agua caliente de fotobiorreactores
- * La energía contenida del vidrio se ubica entre 13.0 y 18.6 MJ.kg^{-1} para los vidrios de ventanas, de 15.9 MJ.kg^{-1} para vidrio flotado y 22.6 MJ.kg^{-1} para vidrio templado.
- * Los tubos de vidrio tienen una duración de 20 años, igual a la vida útil de una planta de servicios.
- * Para un fotobiorreactor tubular, el vidrio tiene significante más altos NER's (Net Energy Ratio, ó mayor proporción de energía neta en español)
- * Si se requiere un fotobiorreactor con bajo contenido de energía, el vidrio puede ser un material adecuado en un principio.

6.8.1.2 Desventajas:

- * El uso de tubos de vidrio requiere de muchos más accesorios de conexión mientras que estos en longitudes de más de unos pocos metros no se producen, o de lo contrario son difíciles de transportar y montar.
- * Los tubos de vidrio además requieren una estructura de soporte.
- * El sistema que emplea el vidrio es potencialmente viable, sólo cuando limitaciones específicas sobre las tasas fotosintéticas de conversión microbiana establezcan la generación de fase de H_2 , y las eficiencias de recolección de H_2 se cumplan

6.8.2 Película de polietileno de baja densidad (PEBD)

Fotobiorreactores tubulares hechos de mangas de polietileno han sido utilizados comercialmente para el cultivo de algas

6.8.2.1 Características y beneficios:

- * Las variantes de las películas de plástico PEBD básicas son PEDB de una sola capa, polietileno lineal de baja densidad (PELBD) y polietileno de baja densidad reforzado con fibras.
- * Las estimaciones del contenido de energía de película de PEBD son 78,1 MJ / kg y 74,0 MJ / kg.
- * Los beneficios de usar PEBD incluyen mayor luz visible y transmisión infrarroja cercana, baja transmisión UV, y bajo costo.
- * En algunos fotobiorreactores, el material de la cámara se compone de un polímero compuesto de múltiples capas que comprende una capa de película de nylon de plástico unido a ambos lados unida con una capa de agente de unión y una capa de polietileno de baja densidad (PEDB).
- * La película de plástico de nylon-PEBD usada en fotobiorreactores pueden variar en el espesor, dependiendo de las especies de alga y el correspondiente nivel de turbulencia requerido para completar un ciclo de luz, limitaciones de esfuerzo cortante, etc.
- * Un tamaño preferido de película de nylon-PEBD es de 3.5 milésimas de pulgadas de espesor. En este espesor, una cantidad moderada de turbulencia dentro de la cámara de fotobiorreactor tendría un pequeño efecto en la integridad estructural de la película.

6.8.2.2 Desventajas:

- * La principal desventaja de usar este tipo de materiales es su corta vida incluso con la adición de estabilizadores de UV, la máxima duración de la película de PEDB es de sólo 3 años.
- * Los factores ambientales pueden afectar el tiempo de vida de la película incluyendo la radiación UV, temperatura, ciclos térmicos, y el contacto con las superficies rígidas y productos químicos (incluyendo contaminantes atmosféricos).

6.8.3 Polietileno de alta densidad (PEAD)

El polietileno de alta densidad es usado en la chaqueta de fotobiorreactores para superar los problemas en el uso de PEBD para el cultivo de algas.

6.8.3.1 Características y beneficios:

- * El PEAD es el plástico más prometedor usado en cultivo de algas, dado que es barato y comercialmente viable.
- * El PEAD costaría sólo un tercio que los materiales plásticos usados actualmente.
- * Los reactores que emplean PEAD son creados para producir algas con un contenido de aceite superior al 1% que la de las películas de PEBD reforzados
- * La opacidad del PEAD ayudan a prevenir daños fotooxidativos o por fotoinhibición.
- * También es menos propenso a la contaminación biológica (acumulación de capa de algas que bloquea buena parte de la luz solar)

6.8.3.2 Desventajas:

- * El PEAD no es tan bueno como el PEBD o el plástico de 5 capas, ya que es difícil de soldar y por lo tanto muestra menos fuerza de tensión.

6.8.4 ACRÍLICO RÍGIDO (PMMA)

El acrílico, químicamente se refiere al polimetacrilato de metilo (PMMA) es un material común para la construcción de la mayoría de fotobiorreactores de investigación debido a sus cualidades superiores.

6.8.4.1 Características y beneficios:

- * Los tubos de acrílico son también conocidos con el nombre comercial de plexiglás.
- * Los tubos de acrílico transparente ha sido utilizado en buen numero en sistemas fotobiorreactores prototipo, con diámetros exteriores en el rango de 30 a 60mm y espesor de pared de 3 a 5mm.
- * La energía contenida del PMMA es estimada en el rango de 131.4 MJ.kg^{-1} . La vida útil de acrílico en condiciones al aire libre es de al menos 10 años.
- * Estudios indican que la lámina de acrílico transmite el 95% de la luz incidente desde 390 a 800nm. Basado en su excelente transmitancia en el PAR, el acrílico es un material de construcción adecuado para fotobiorreactores.
- * Los tubos de acrílicos y bobinas actúan como colectores solares, lo que aumenta la temperatura y se extiende la estación de crecimiento.
- * Otras ventajas son que incrementa la productividad, se pierde menos agua por evaporación, descarta a las algas contaminantes, se tiene un mejor control sobre los cultivos, y la capacidad de cultivar algas puras.

6.8.4.2 Desventajas:

- * Los tubos de acrílico son usados para la construcción de fotobiorreactores pero los costos de instalación hacen al sistema muy costoso.
- * El exceso de oxígeno producido por la alga durante su crecimiento puede inhibir el mismo.
- * El alga se puede pegar dentro de los tubos bloqueando la luz solar, y los tubos pueden ponerse muy calientes.

6.8.5 CLORURO DE POLIVINILO (PVC).

Las foto etapas basal y helicoidal de un fotobiorreactor helicoidal están hechos generalmente de tubos transparentes de cloruro de polivinilo (PVC).

6.7.5.1 Características y beneficios:

- * Las membranas de cloruro de polivinilo contienen agentes inmovilizados han sido ampliamente documentados y utilizados para preparar sensores de membrana en fotobiorreactores.

- * La tecnología de bloqueo UV único evita las longitudes de luz ultravioleta perjudiciales que penetran el PVC mientras que permite que longitudes de onda de luz beneficiosos pasen a través del tubo transparente de PVC.
- * Las ventajas incluyen la resistencia a la corrosión, la no conductividad y peso ligero de construcción.
- * El uso de tuberías especiales de PVC transparente es beneficioso en el uso de fotobiorreactores, debido a que la claridad es crítica, permitir la luz dentro del proceso para ayudar en el crecimiento de las algas y su alimentación.

6.7.5.2 Desventajas:

- * Tubos de PVC flexibles han sido utilizados, pero debido a los dañinos rayos UV el PVC tiende a romperse o a ser quebradizo.
- * El PVC cuando es atacado por los rayos UV, sobre un PVC convencional, se decolora la superficie de la tubería, lo que limita el paso de la luz.

La revisión interpreta claramente la criticidad de la selección del material en la determinación de la eficiencia del fotobiorreactor. La elección de los materiales y el diseño de la construcción fotobiorreactor por lo tanto debe considerar la eficiencia del material, incluida la transmisión de luz, esperanza de vida y reciclabilidad.

6.8 RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO DE FOTOBIOREACTORES

De la discusión de todos los temas anteriores se pueden proponer varias recomendaciones para el diseño de fotobiorreactores:

1. La trayectoria de la luz debe ser pequeña.
2. Mantener una alta densidad celular (>8-15g/l)
3. Un mezclador vigoroso para asegurar ciclos L/O de alta frecuencia (flujo turbulento)
4. Evitar inhibición del crecimiento por acumulación de O_2 (mismo que se puede regular con la adición de CO_2 al sistema)

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIORREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA

5. Evitar acumulación de sustancias inhibitorias
6. Así como evitar el asentamiento del cultivo
7. Mantener temperatura optima
8. Mantener pH óptimo

7.- PROCEDIMIENTOS Y DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS

Las actividades realizadas se muestran en el siguiente cuadro a continuación se realiza la especificación de cada una de ellas.

Periodo No.	Actividad	Periodo de realización	Justificación
1	Investigación documental y aprendizaje del uso de los programas de simulación.	20 de agosto al 10 de septiembre del 2012	Indagación bibliográfica para la recopilación de datos teóricos y técnicos para el proyecto. Además se aprendió a usar los programas de simulación.
2	Discusión de propuestas, planteamiento del diseño	de 11 de septiembre al 23 de septiembre del 2012	Junto al asesor se discutieron propuestas preliminares de diseños, se discutió sobre la información indagada.
3	Reporte del primer informe.	24 y 25 de septiembre del 2012	Presentación del primer reporte.
4	Elaboración del primer y segundo diseño	26 de septiembre al 22 de octubre del 2012	Se realizó la construcción en Solid Works de las propuestas de diseño.
5	Reporte del segundo informe.	22 y 23 de octubre del 2012	Presentación del segundo reporte.
6	Simulación y correcciones del fotobiorreactor elegido.	24 de octubre al 22 de noviembre del 2012	Se realizaron las correcciones necesarias al fotobiorreactor y se realizó el mallado del mismo (simulación)
7	Elaboración del reporte final del proyecto	23 de noviembre al 3 de diciembre del 2012	Finiquito del proyecto.

Tabla 7.1 Actividades de residencia profesional.

7.1 DESCRIPCION DE LAS ACTIVIDADES REALIZADAS

7.1.1 Primer periodo. (Investigación documental)

Como inicio del proyecto, en esta primera etapa se recopilaron datos sobre que es un fotobiorreactor, su uso y la implementación que tienen estos para el cultivo de las micro algas y como han evolucionado a los largo de los años, también se indagó sobre los parámetros que un fotobiorreactor debe cumplir para el optimo crecimiento de las microalgas. La información aquí presentada es recopilada de artículos de revistas científicas a nivel internacional.

En esta primera etapa también se aprendió a utilizar el programa de construcción y simulación llamado Solid Works (que es popular mente usada como una herramienta CAD), al igual que otro programa llamado Comsol (simulación y construcción)

7.1.2 Segundo periodo. (Discusión de propuestas, planteamiento del diseño)

Para este periodo, con los conocimientos adquiridos del periodo anterior y junto con el asesor se discutió dicha información, para llegar a un acuerdo de un tipo general de fotobiorreactores que vayan más enfocados a la experimentación en laboratorio (este proyecto está pensado a futuro para su construcción y su utilización en los laboratorios de posgrado e investigación del ITTG).

A partir de esta discusión se comienzan a plantear las propuestas para el diseño del fotobiorreactor. Los factores más importantes a considerar se enumeran a continuación:

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIORREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA

1. Se eligió diseñar un tipo de fotobiorreactor para interiores los cuales pueden ser: cerrados o abiertos, más adelante se mostrará la discusión sobre la elección de los dos tipos anteriores
2. La trayectoria de la luz debe ser pequeña. La distancia más larga a la fuente de iluminación no debe superar los 10 cm.
3. Un mezclado vigoroso para asegurar ciclos L/O (luz/oscuridad) de alta frecuencia. Esto se logrará haciendo al flujo turbulento.
4. Evitar inhibición del crecimiento por acumulación de O_2 .
5. Evitar el asentamiento del cultivo. Este problema se evita haciendo turbulento el flujo.
6. Mantener temperatura optima. Las microalgas no se desarrolla a temperaturas más bajas de 20°C y no mayores a 35°C debido a que el agua se evapora y los nutrientes no llegan a todas ellas
7. Asegurar el flujo de nutrientes, y pH a todas las microalgas. Esto también se resuelve cuando el flujo es turbulento.
8. El material de diseño que será usado es acrílico.

7.1.3 cuarto periodo. (Elaboración del primer y segundo diseño)

En este periodo se consideraron todos los factores importantes vistos anteriormente en el periodo segundo. A partir de todas esas consideraciones y mediante la utilización del programa “Solid Works” se realizaron la construcción del primer y segundo diseño en el programa.

Estos diseños serán mostrados posteriormente en resultados.

7.1.4 Sexto periodo. (Simulación y correcciones del fotobiorreactor elegido)

Una vez elaborados los diseños en el cuarto periodo, se elige el diseño más favorable en todos los aspectos y este es llevado a la simulación con el segundo programa: “Comsol”.

En este programa se realiza el mesh, mejor conocido como mallado, donde literalmente se “mallea” al reactor y en cada intersección del mallado se resuelven las ecuaciones de flujo y condiciones de frontera del reactor.

Los resultados son expuestos más adelante.

8.- RESULTADOS

8.1 DISEÑOS PRELIMINARES DE FOTOBIORREACTORES

Como se menciona antes en el cuarto periodo se realizaron las construcciones de los diseños preliminares de fotobiorreactores en el programa Solid Works. Los resultados se exponen a continuación

8.1.1 Fotobiorreactor 1: sistema cerrado en interiores.

Para la elaboración de este primer fotobiorreactor se tomó en cuenta su posible uso futuro, que es la experimentación con microalgas en los laboratorios de investigación y posgrado del instituto, por lo que este factor influye en el tipo de sistema: en interiores.

En este primer diseño se utilizó la primera opción: sistema cerrado. Por lo que este fotobiorreactor está en la clasificación: “sistema cerrado en interiores”. Para su construcción se pensó entonces en un modelo que cubriera con las siguientes características:

- ⊕ Debe de ser cerrado. Por lo cual para cumplir este criterio debe tener una tapa, que no permita la interacción con el ambiente exterior.
- ⊕ Ser pequeño (puesto que estará en el interior de un laboratorio y su uso es de experimentación).
- ⊕ Distribución y entradas de flujo de aire, y nutrientes. Para ello se debió pensar en un diseño que lograra hacer al flujo turbulento.

Una vez reunido todas esas características se obtuvo el siguiente diseño:

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIOREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA

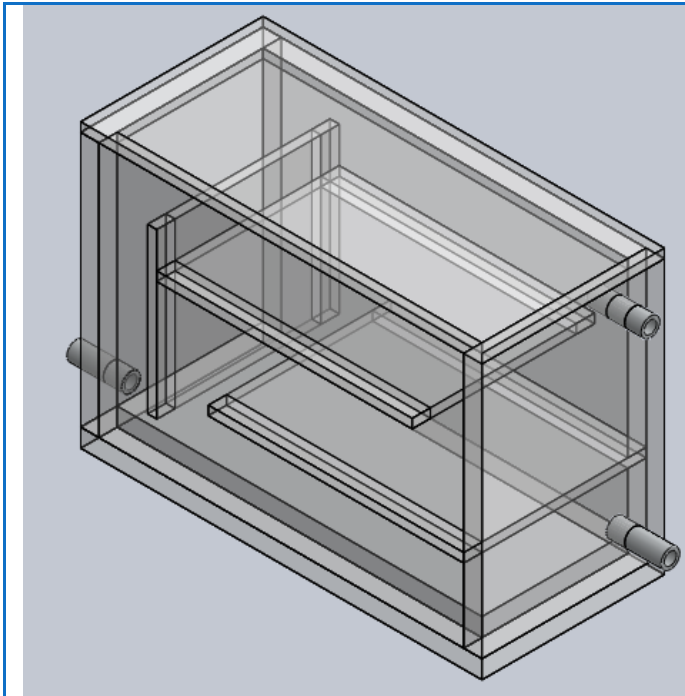


Figura 8.1 Vista isométrica

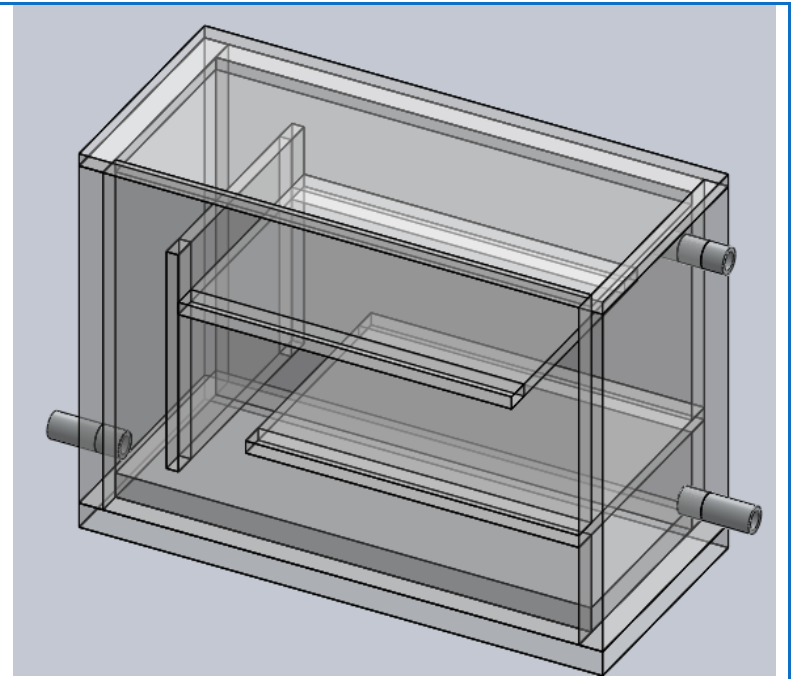


Figura 8.2 Vista trimétrica

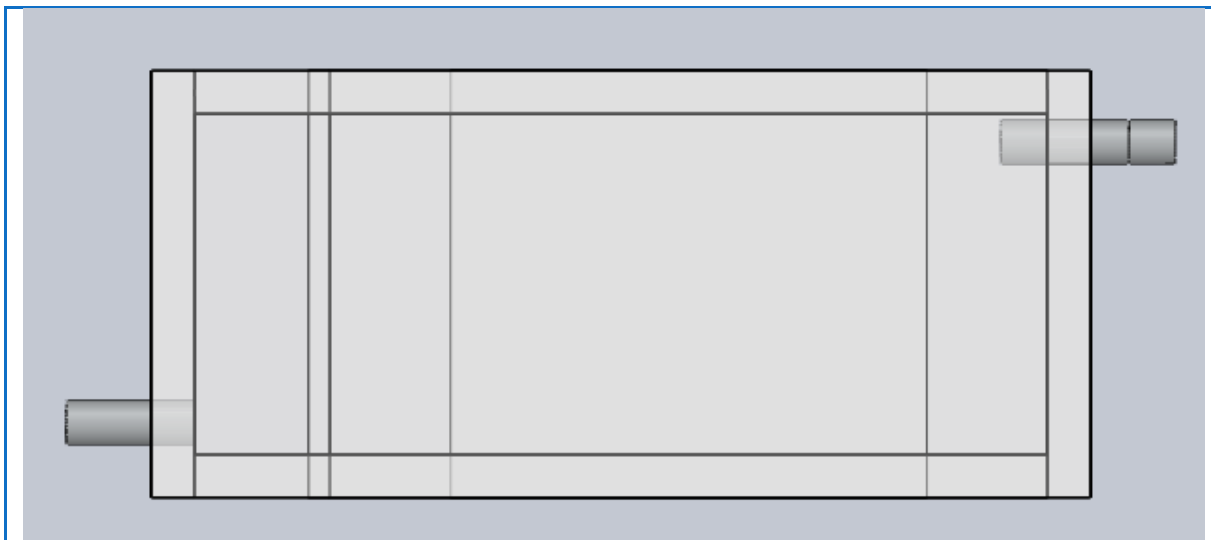


Figura 8.3 vista superior

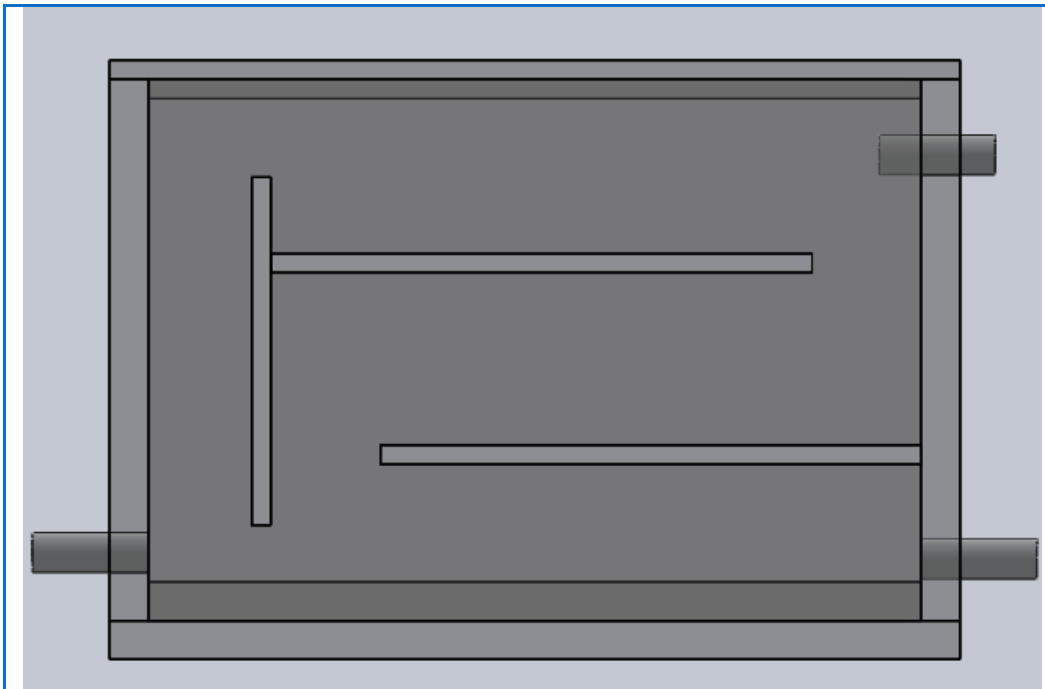


Figura 8. 4 vista frontal

8.1.1.1 Materiales de construcción:

- Acrílico rígido. (cuerpo, paredes y placas internas). La razón de utilizar este material es debido a que:
 - ⊕ Estudios indican que la lámina de acrílico transmite el 95% de la luz incidente desde 390 a 800nm. Basado en su excelente transmitancia en el PAR, el acrílico es un material de construcción adecuado para fotobiorreactores
 - ⊕ La vida útil de acrílico en condiciones al aire libre es de al menos 10 años. En interiores la vida se puede prolongar varios años más.
 - ⊕ Otras ventajas son que incrementa la productividad, se pierde menos agua por evaporación, descarta a las algas contaminantes, se tiene un mejor control sobre los cultivos, y la capacidad de cultivar algas puras.

- ☑ Aluminio (tubería). Este material decidió usarse las siguientes razones:
 - ⊕ La tubería de este reactor es muy pequeña (1.03cm) y es muy difícil de conseguir en acrílico.
 - ⊕ Aunado a lo anterior en el diseño se necesita que uno de los tubos entren en el interior del reactor, por lo cual estarán en contacto con el medio del alga, si la tubería fuera de otro material, por ejemplo: cobre, este además de contaminar el medio también intercambiaría sus iones, alterando así el medio del alga, siendo un factor q no se podría controlar en un momento dado. El aluminio no reacciona y no contamina al medio.

8.1.1.2 Propiedades físicas:

Las siguientes propiedades físicas del reactor son calculadas por el mismo programa de construcción: Solid Works.

- ➔ Masa = 1559.69 gramos
- ➔ Volumen = 1559.69 centímetros cúbicos
- ➔ Largo: 22 centímetros
- ➔ Alto: 15.5 centímetros
- ➔ Ancho: 10 centímetros
- ➔ Espesor de pared: 1 centímetro
- ➔ Área de superficie = 3912.91 centímetros cuadrados
- ➔ Centro de masa: (centímetros)

X = -0.53

Y = 6.68

Z = -0.00

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIORREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA

→ Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (gramos * centímetros cuadrados). Medido desde el centro de masa.

$I_x = (1.00, -0.01, -0.00)$	$P_x = 60630.30$
$I_y = (0.01, 1.00, -0.00)$	$P_y = 93820.03$
$I_z = (0.00, 0.00, 1.00)$	$P_z = 117334.39$

→ Momentos de inercia: (gramos * centímetros cuadrados). Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de resultados.

$L_{xx} = 60636.76$	$L_{xy} = -460.29$	$L_{xz} = -67.59$
$L_{yx} = -460.29$	$L_{yy} = 93813.65$	$L_{yz} = -10.62$
$L_{zx} = -67.59$	$L_{zy} = -10.62$	$L_{zz} = 117334.30$

→ Momentos de inercia: (gramos * centímetros cuadrados). Medido desde el sistema de coordenadas de salida.

$I_{xx} = 130225.67$	$I_{xy} = -5940.70$	$I_{xz} = -66.57$
$I_{yx} = -5940.70$	$I_{yy} = 94245.26$	$I_{yz} = -23.50$
$I_{zx} = -66.57$	$I_{zy} = -23.50$	$I_{zz} = 187354.82$

8.1.1.3 Vistas del fotobiorreactor en plano

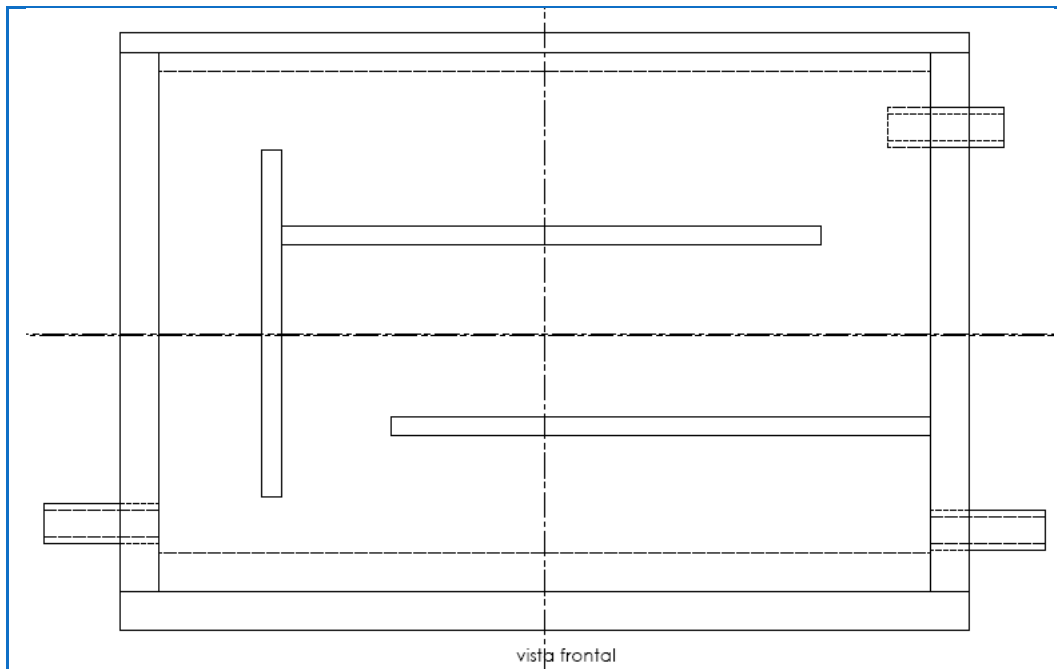
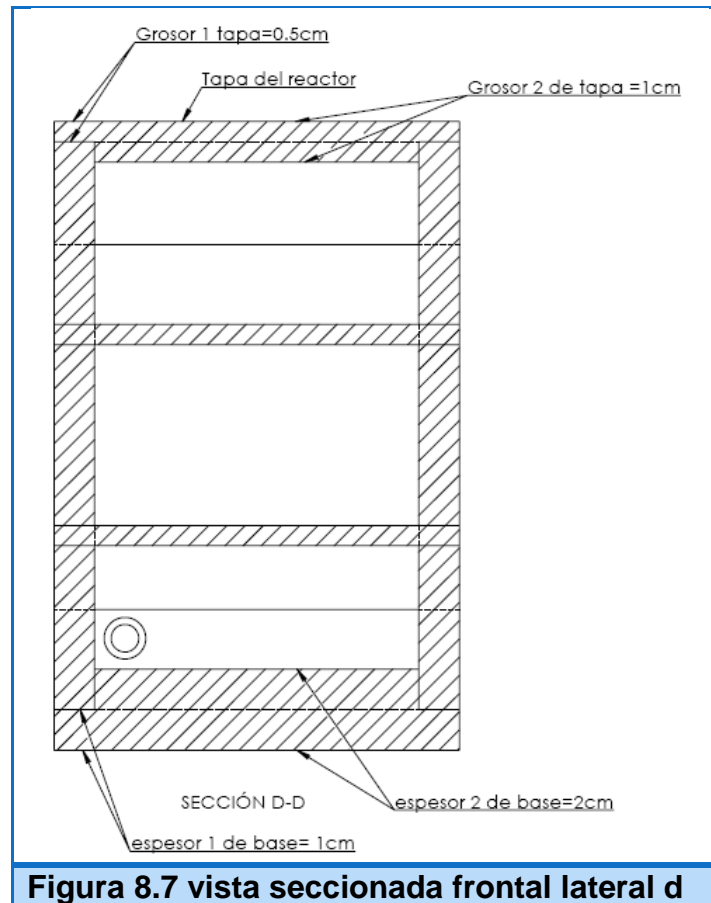
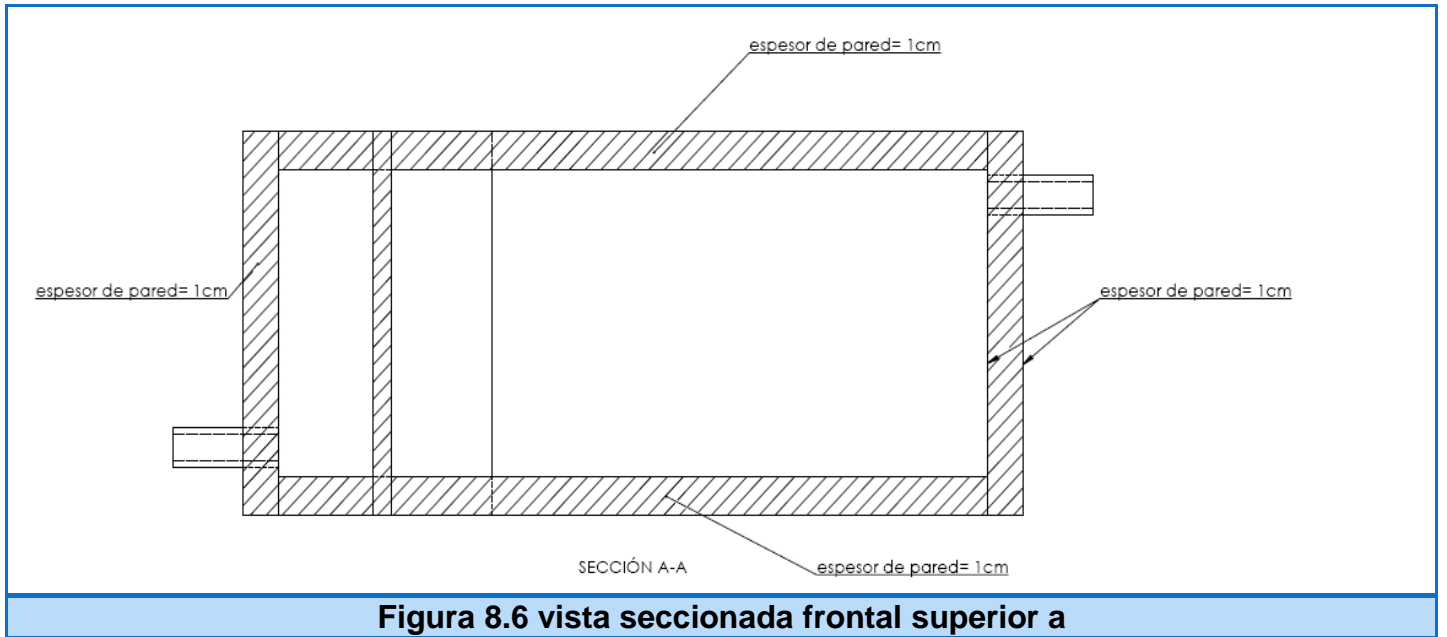


Figura 8.5 Vista frontal

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIORREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA



“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIOREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA

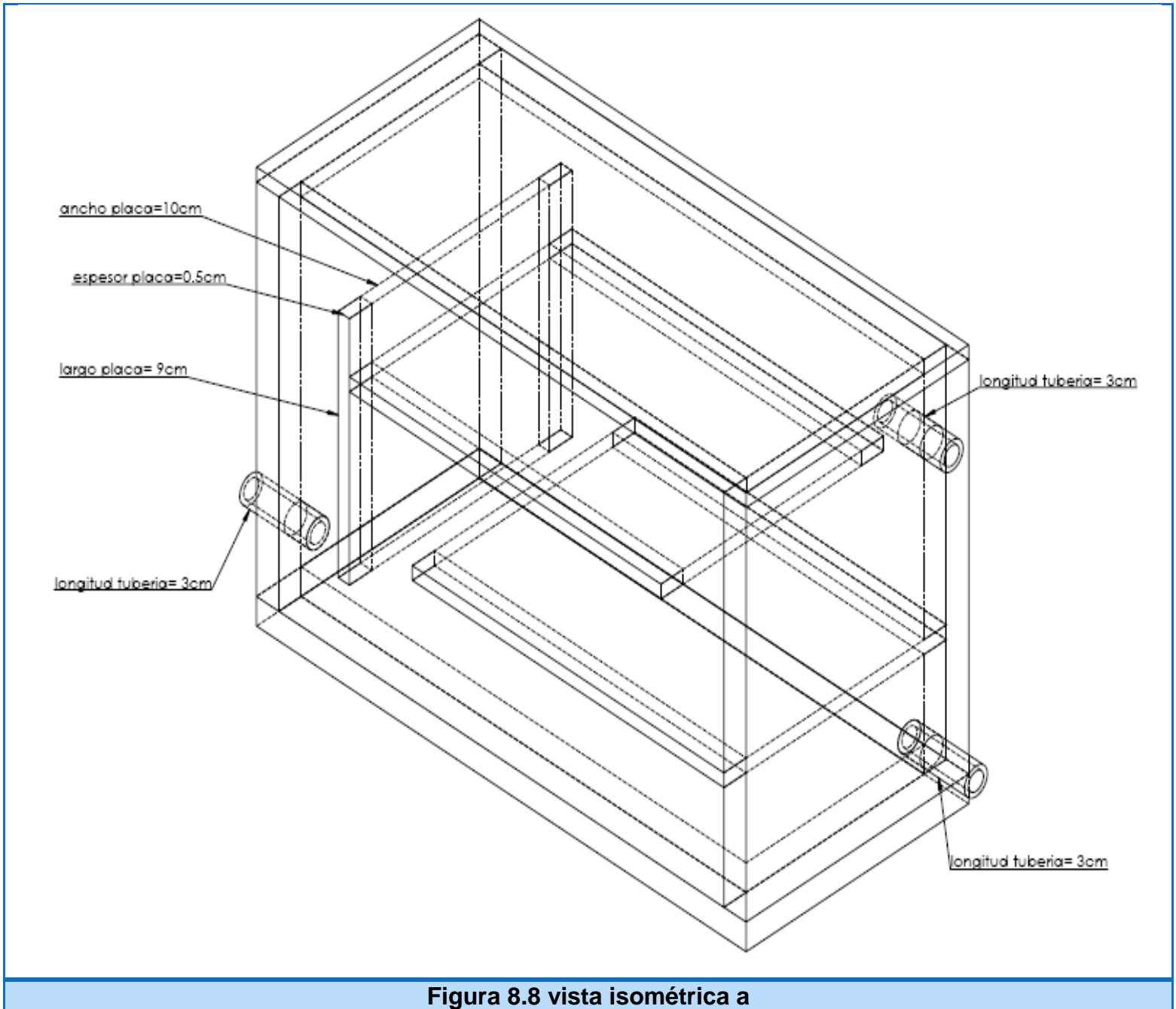


Figura 8.8 vista isométrica a

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIORREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA

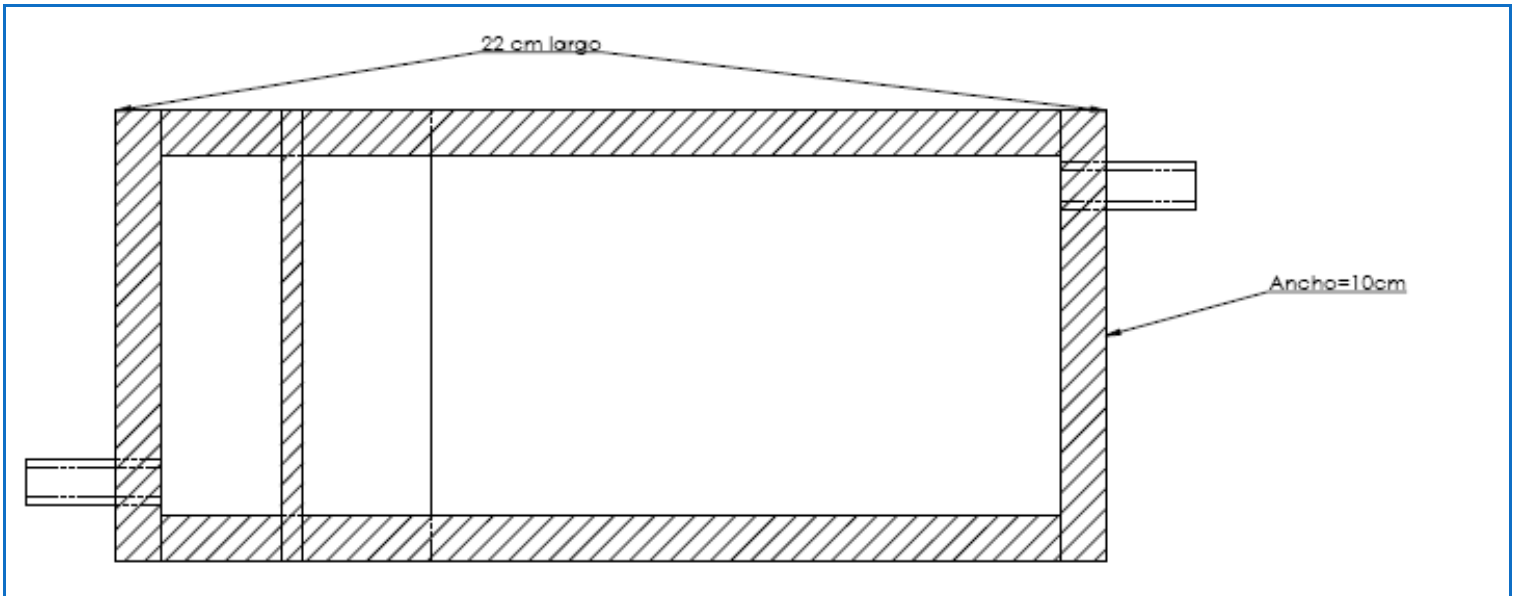


Figura 8.9 vista seccionada frontal inferior b

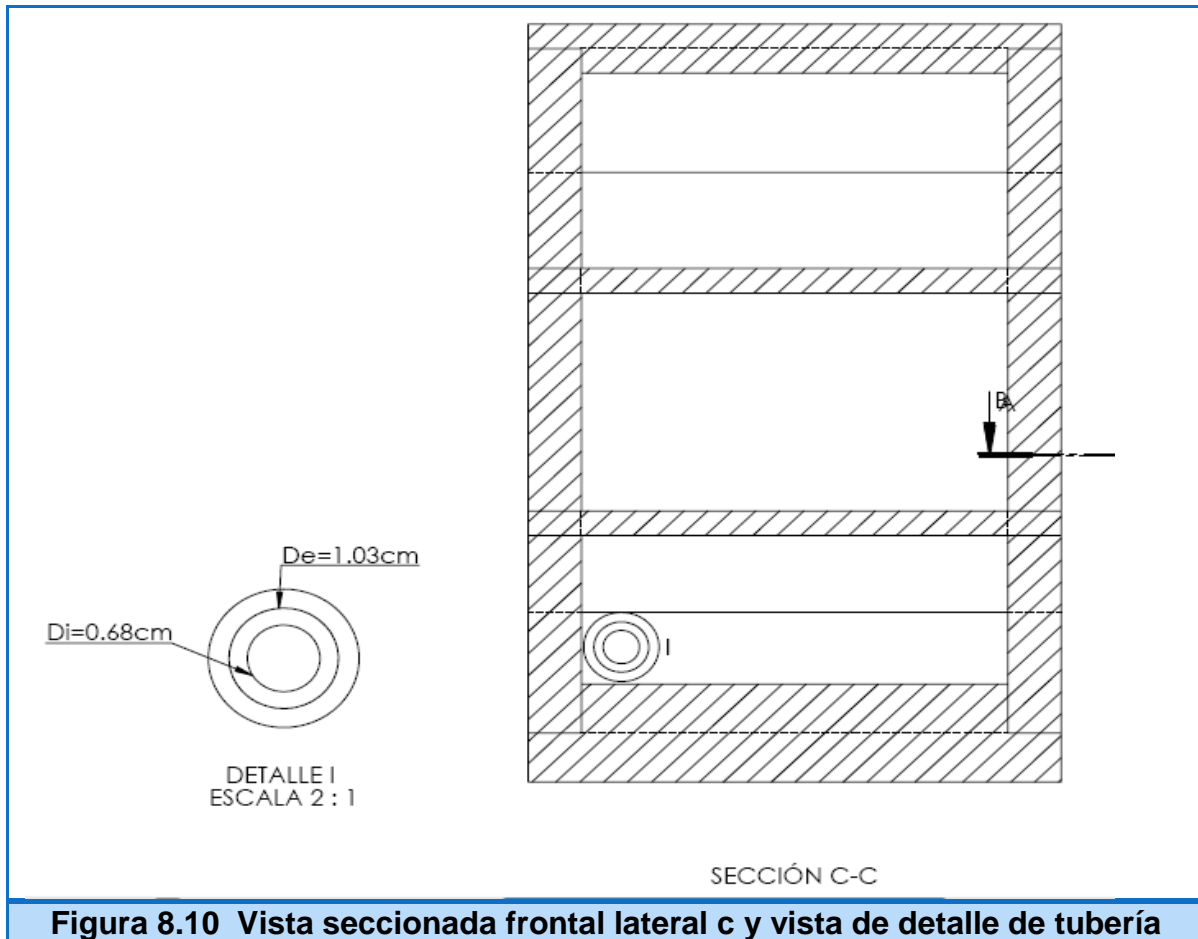


Figura 8.10 Vista seccionada frontal lateral c y vista de detalle de tubería

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIORREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA

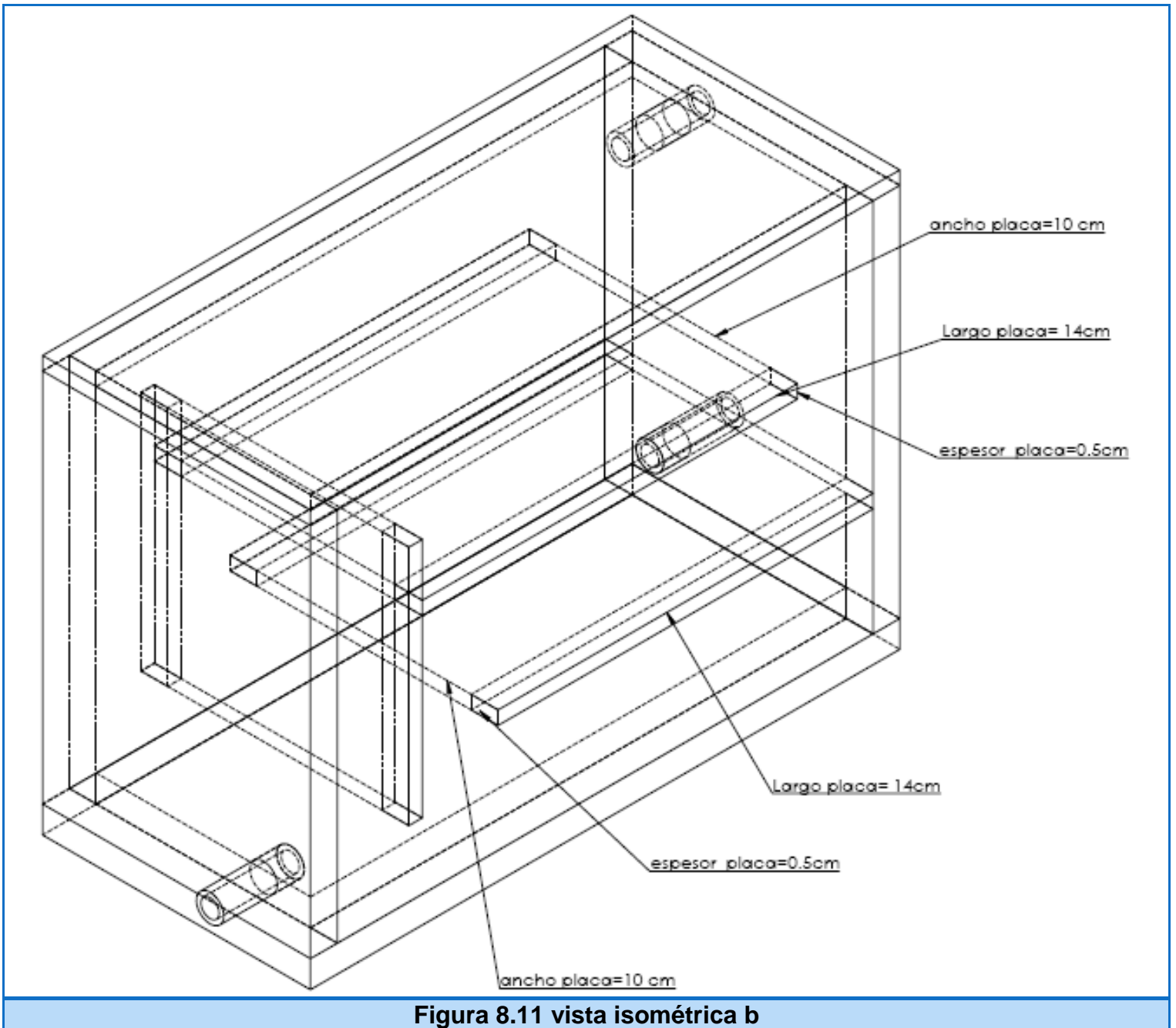


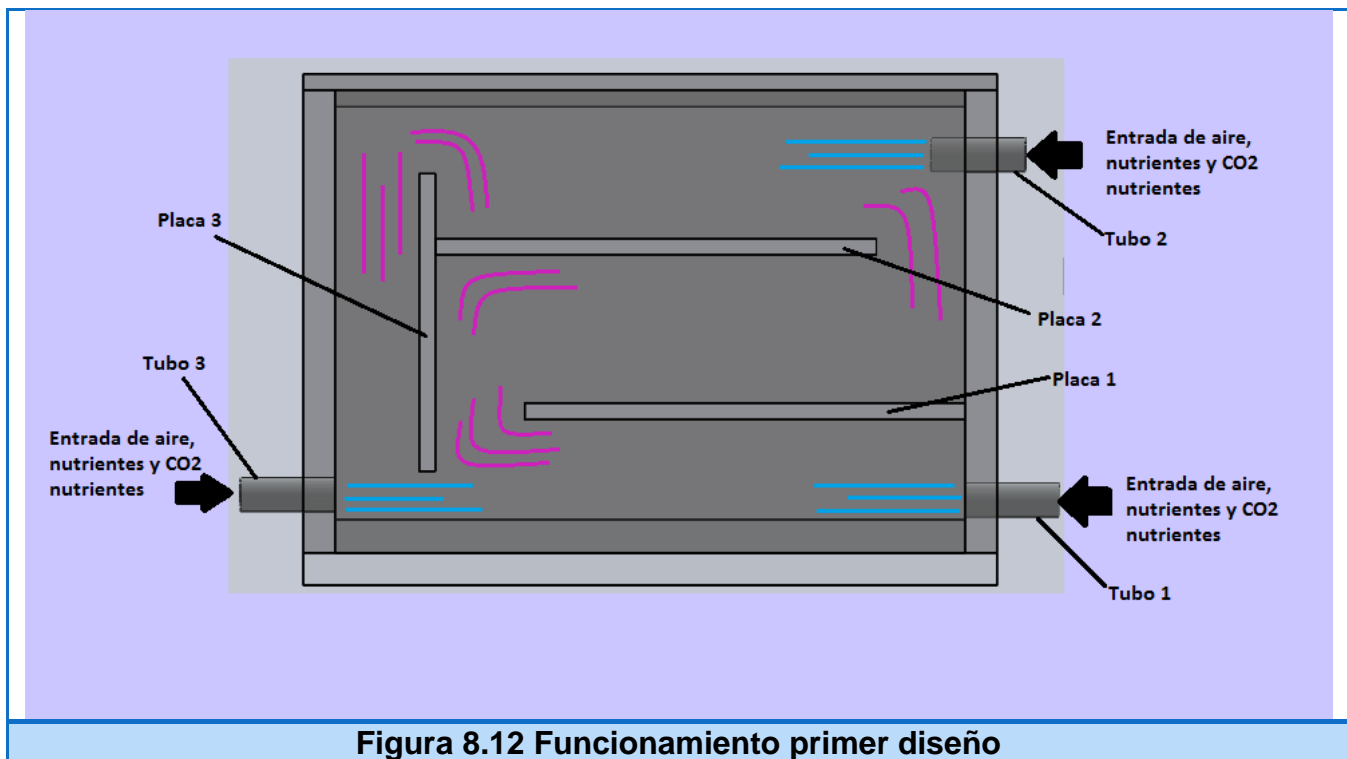
Figura 8.11 vista isométrica b

8.1.1.4 Funcionamiento:

El funcionamiento de este reactor se pensó de la siguiente manera (figura 8.1.1.4):

El agua con el medio y las microalgas será siempre el mismo, no entra ni sale. En este tipo de reactores, como el aire al es menos denso que el agua, busca salir por lo que al abrirse paso mueve al agua.

En el tubo 1 entran nutrientes, CO_2 y principal mente aire, lo que hace que el agua con el medio (y las microalgas) se desplacen a la izquierda chocando con la placa 3. Al chocar con la placa 3, como el aire busca salir va subiendo hasta chocar con la placa 2, lo que provoca que se mueva a la derecha junto con el medio. Al llegar al espacio entre la placa 2 y la pared del reactor nuevamente el medio será impulsado hacia arriba por el aire que busca salir, pero al llegar arriba la corriente del tubo 2 (nutrientes, CO_2 y aire principalmente) desplazará al flujo nuevamente hacia la izquierda, y al chocar nuevamente con la placa 3 este caerá. Al bajar la corriente de entrada del tubo 3 (nutrientes, CO_2 y aire principalmente) será impulsado a la derecha, que al chocar nuevamente con el flujo de entrada del tubo 1 propiciara que el ciclo inicie nuevamente.



8.1.2 Fotobiorreactor 2: sistema abierto en interiores

Para la elaboración de este segundo fotobiorreactor, de igual manera, se tomó en cuenta su posible uso futuro en los laboratorios de investigación y posgrado del instituto, y como se menciona en el punto 8.1.1, este factor influye en el diseño sobre el tipo de sistema: en interiores.

En este diseño se utilizó la segunda opción: sistema abierto. Por lo que este fotobiorreactor está en la clasificación: “sistema abierto en interiores”. Para su construcción se pensó entonces en un modelo que cubriera con las siguientes características:

- ⊕ Debe de ser abierto. Por lo cual para cumplir este criterio no se creó una tapa, aunque esto permite que el sistema entre al contacto con el exterior, no se verá muy afectado debido a que las condiciones climáticas y atmosféricas en el laboratorio pueden ser controladas.
- ⊕ Ser pequeño (puesto que estará en el interior de un laboratorio y su uso es de experimentación).
- ⊕ Distribución y entradas de flujo de aire, y nutrientes. Para ello se debió pensar en un diseño que lograra hacer al flujo turbulento.
- ⊕ Integrar un sistema de luz artificial al diseño. Esto permitirá al medio un mejor desarrollo.

Una vez reunido todas esas características se obtuvo el siguiente diseño:

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIOREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA

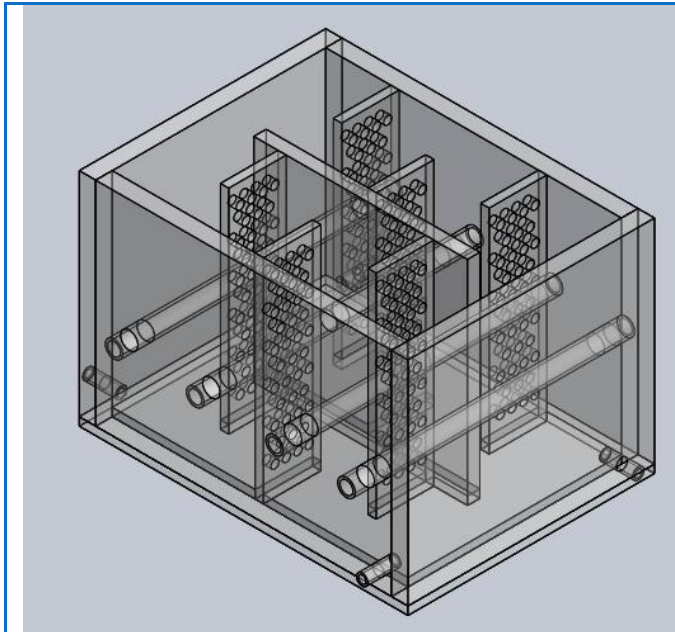


Figura 8.13 vista isométrica

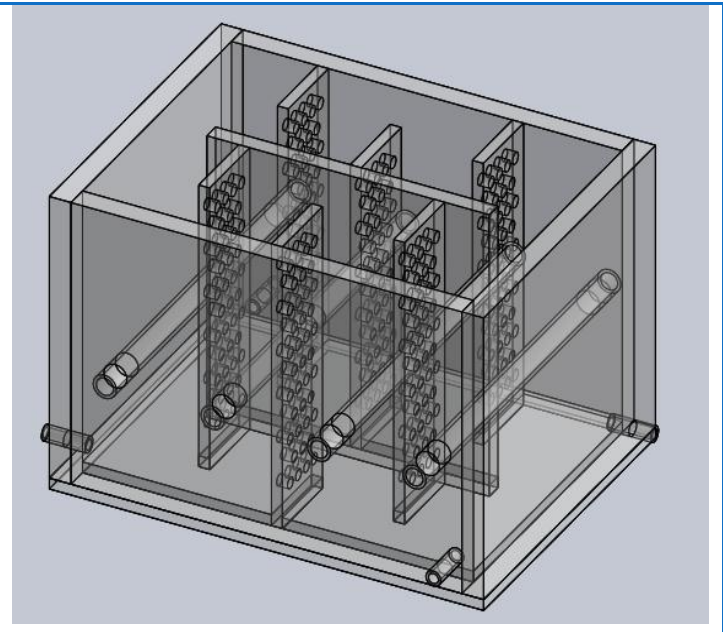


Figura 8.14 vista trimétrica

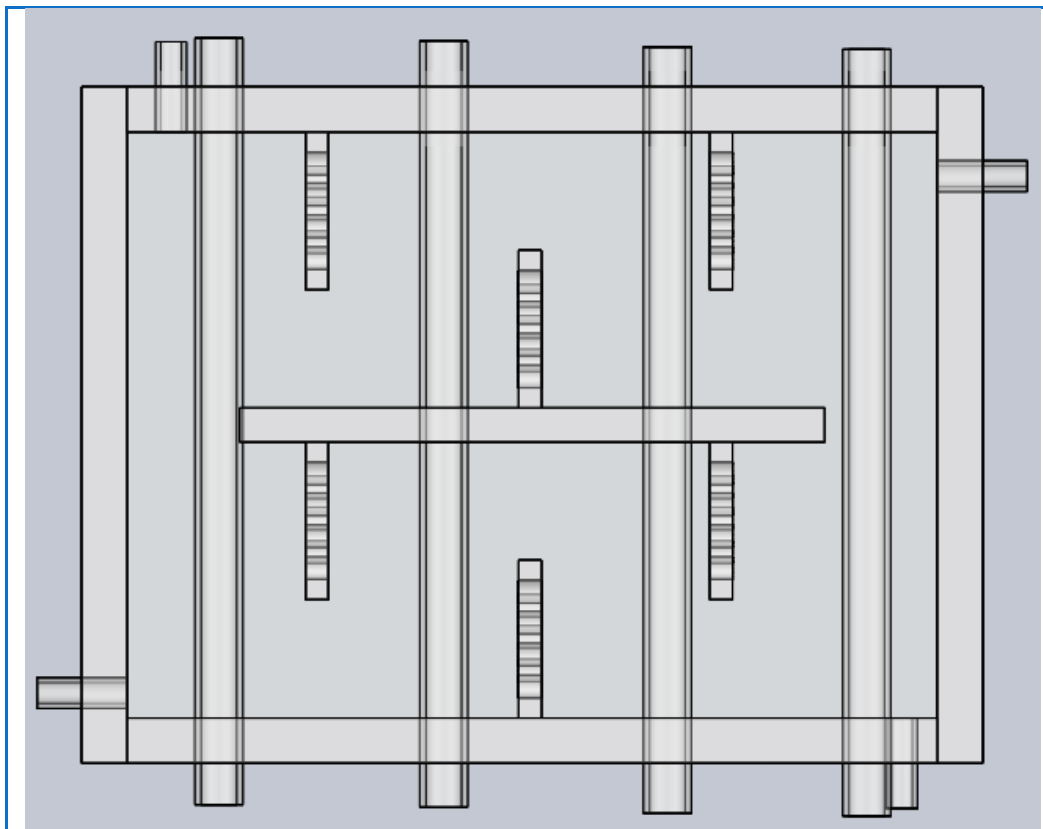
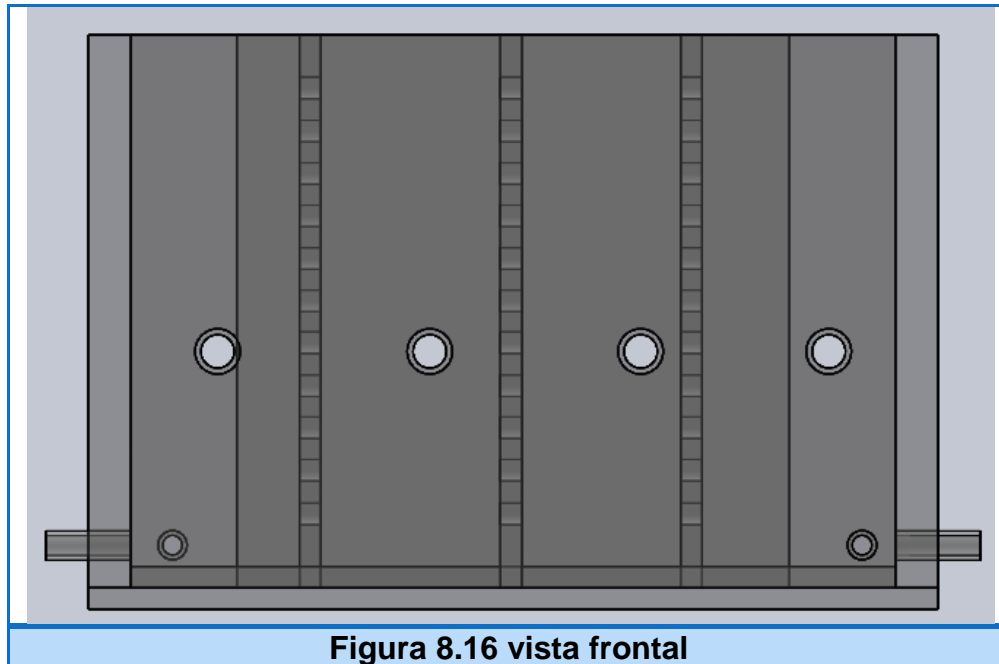


Figura 8.15 vista superior



8.1.2.1 Materiales de construcción:

- ☑ Acrílico rígido. A diferencia del diseño de reactor anterior, en este se utilizó completamente acrílico, esto debido a los siguientes criterios:
 - ⊕ En este caso implementaremos luz artificial dentro del reactor por lo cual aprovecharemos los beneficios de los tubos de acrílico transparente, que han sido utilizados en buen número en sistemas de fotobiorreactores prototipo.
 - ⊕ La energía contenida del PMMA es estimada en el rango de 131.4 MJ.kg^{-1} . La vida útil de acrílico en condiciones al aire libre es de al menos 10 años.
 - ⊕ Estudios indican que la lámina de acrílico transmite el 95% de la luz incidente desde 390 a 800nm. Basado en su excelente transmitancia en el PAR, el acrílico es un material de construcción adecuado para fotobiorreactores.

- ⊕ Los tubos de acrílicos y bobinas actúan como colectores solares, lo que aumenta la temperatura y se extiende la estación de crecimiento.
- ⊕ Otras ventajas son que incrementa la productividad, se pierde menos agua por evaporación, descarta a las algas contaminantes, se tiene un mejor control sobre los cultivos, y la capacidad de cultivar algas puras.

8.1.1.2 Propiedades físicas:

- Masa = 10994.11 gramos
- Volumen = 10994.11 centímetros cúbicos
- Área de superficie = 16866.74 centímetros cuadrados
- Largo: 40 centímetros
- Alto: 27 centímetros
- Ancho: 30 centímetros
- Espesor de pared: 2 centímetros
- Centro de masa: (centímetros)

X = -2.21

Y = 10.80

Z = -0.07

- Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (gramos * centímetros cuadrados). Medido desde el centro de masa.

$I_x = (1.00, -0.00, 0.00)$	$P_x = 1956303.39$
$I_y = (0.00, 0.01, -1.00)$	$P_y = 2697127.67$
$I_z = (0.00, 1.00, 0.01)$	$P_z = 3086946.20$

- Momentos de inercia: (gramos * centímetros cuadrados). Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de resultados.

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIORREACTOR”

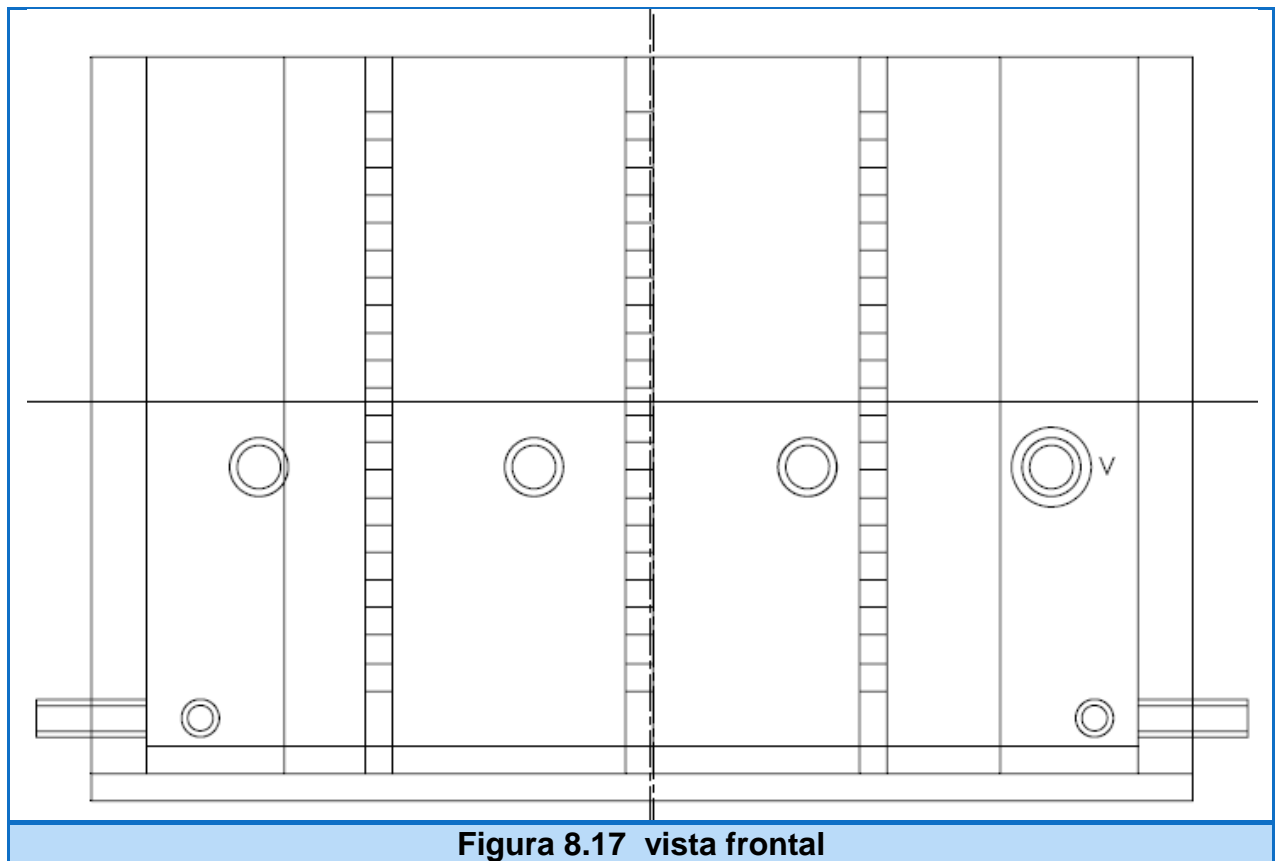
REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA

$L_{xx} = 1956306.64$	$L_{xy} = -1019.91$	$L_{xz} = 1310.48$
$L_{yx} = -1019.91$	$L_{yy} = 3086932.54$	$L_{yz} = -2229.65$
$L_{zx} = 1310.48$	$L_{zy} = -2229.65$	$L_{zz} = 2697138.09$

→ Momentos de inercia: (gramos * centímetros cuadrados). Medido desde el sistema de coordenadas de salida.

$I_{xx} = 3238598.67$	$I_{xy} = -262931.33$	$I_{xz} = 2922.95$
$I_{yx} = -262931.33$	$I_{yy} = 3140479.25$	$I_{yz} = -10123.81$
$I_{zx} = 2922.95$	$I_{zy} = -10123.81$	$I_{zz} = 4032879.62$

8.1.2.3 Vistas del fotobiorreactor en plano



“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIORREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA

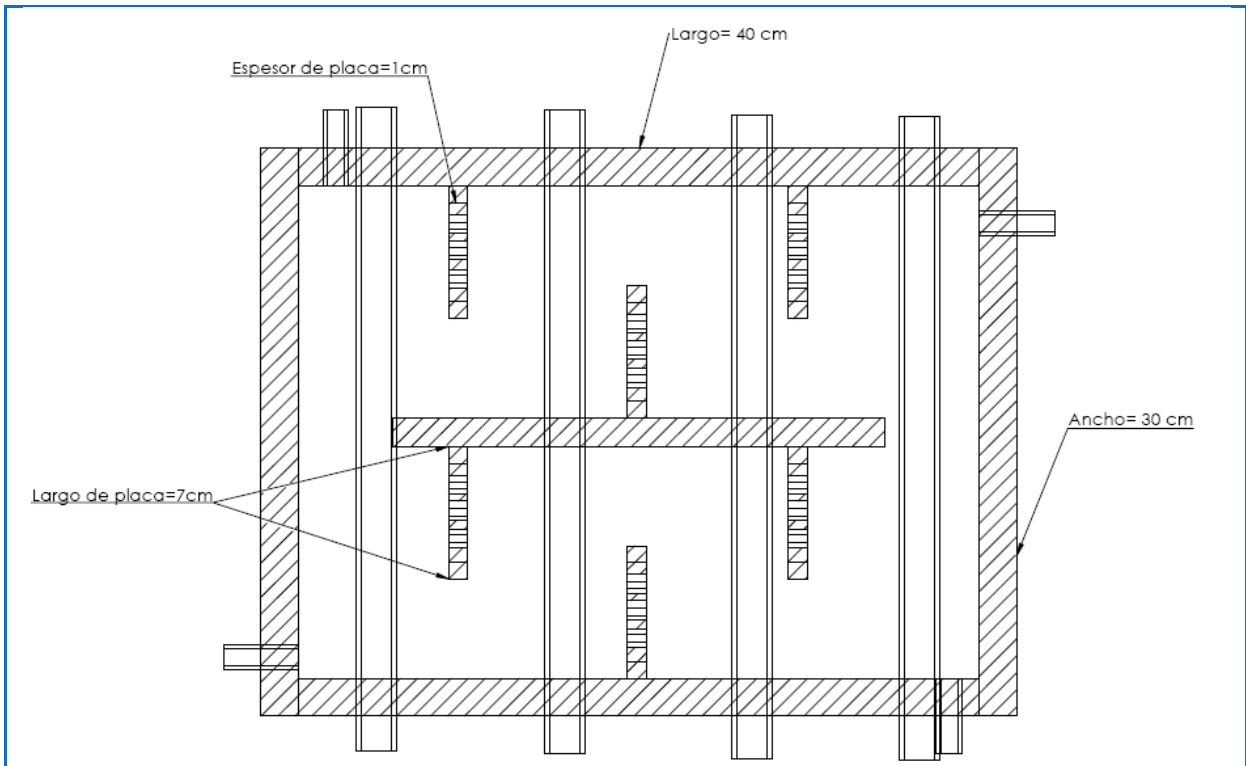


Figura 8.18 vista de seccionada frontal superior a

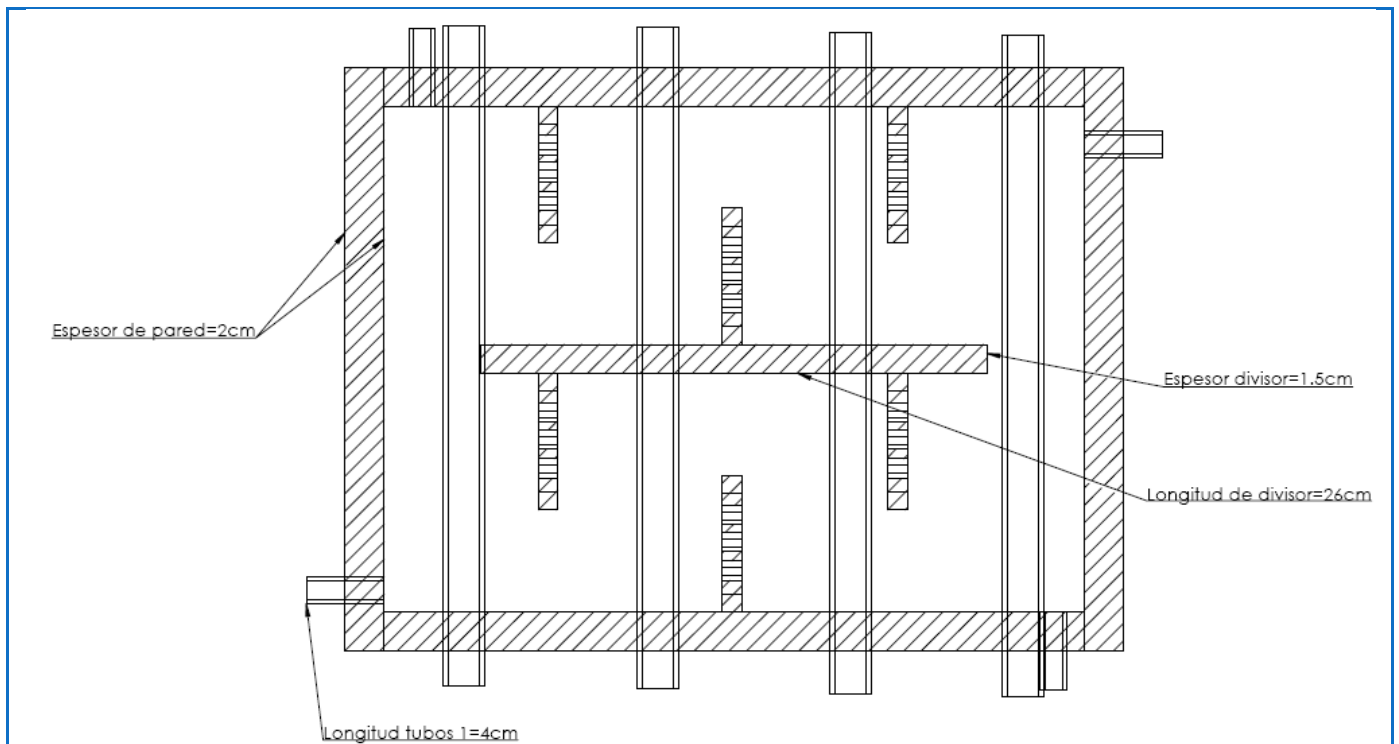
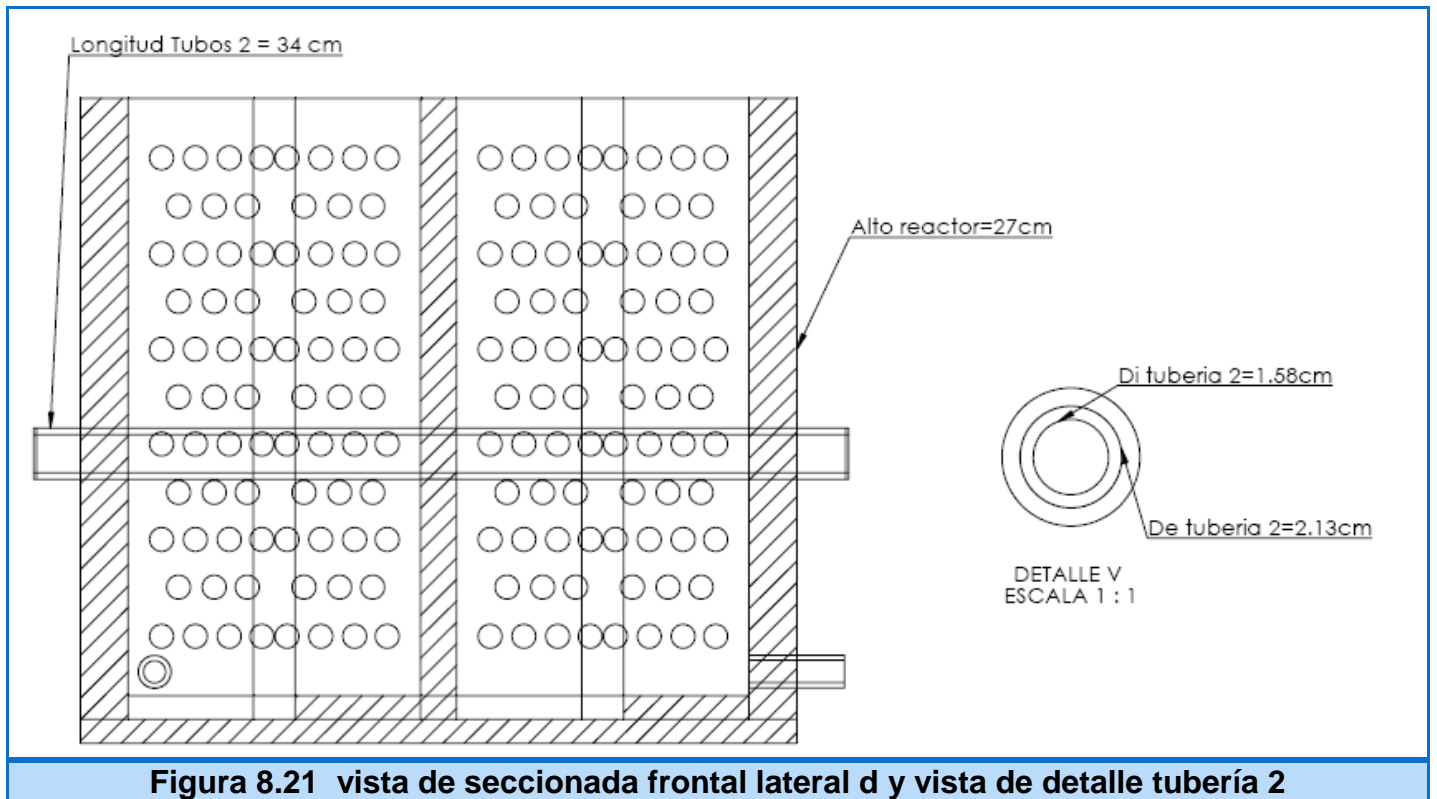
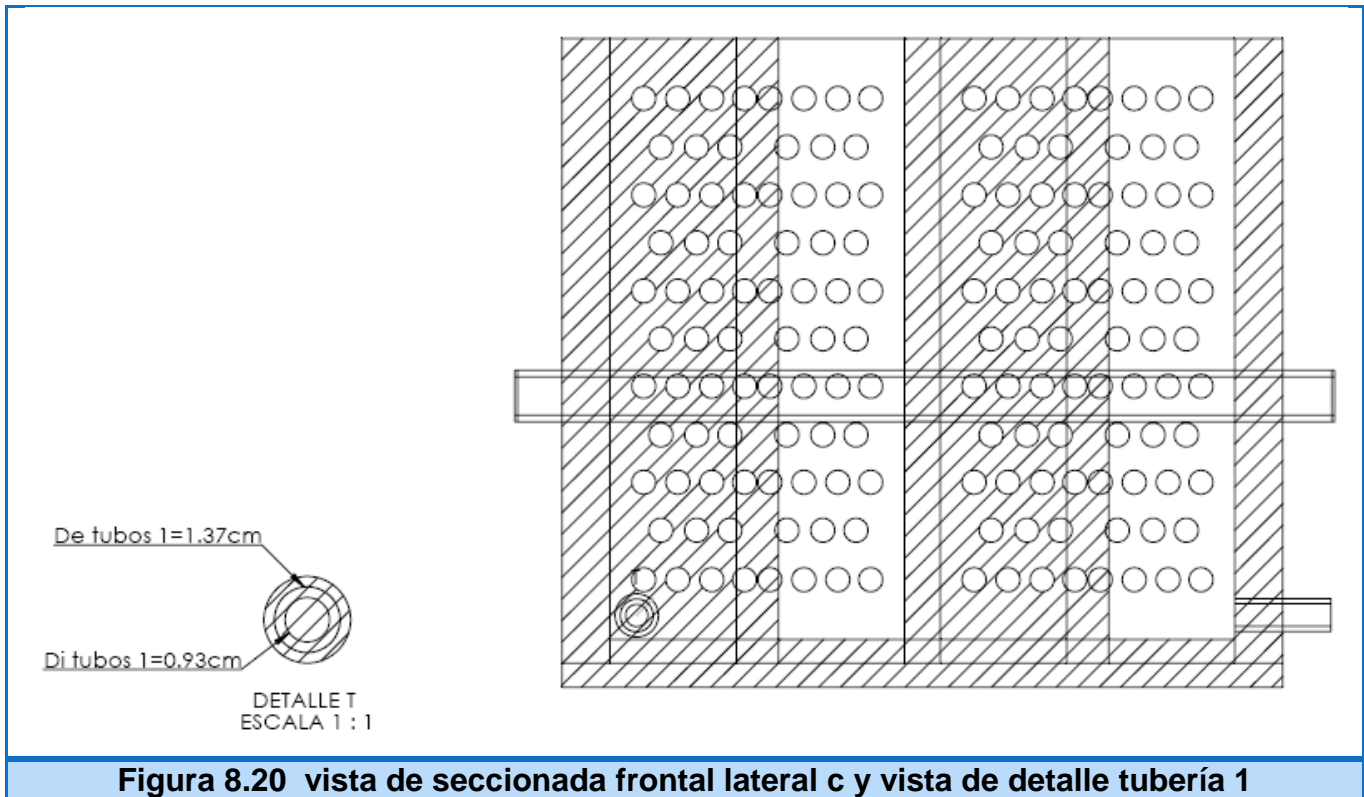


Figura 8.19 vista de seccionada frontal inferior b

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIORREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA



“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIORREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA

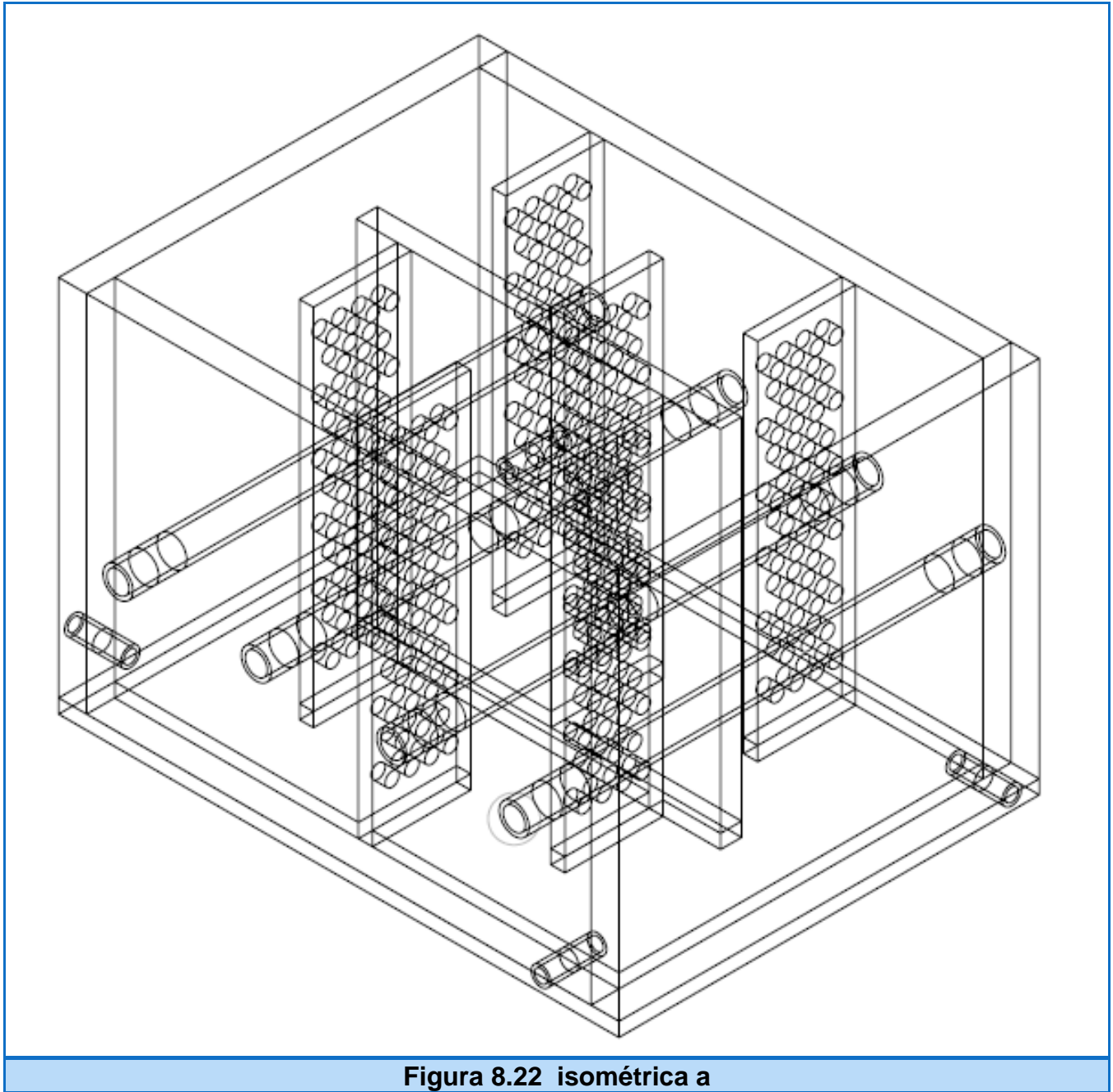


Figura 8.22 isométrica a

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIORREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA

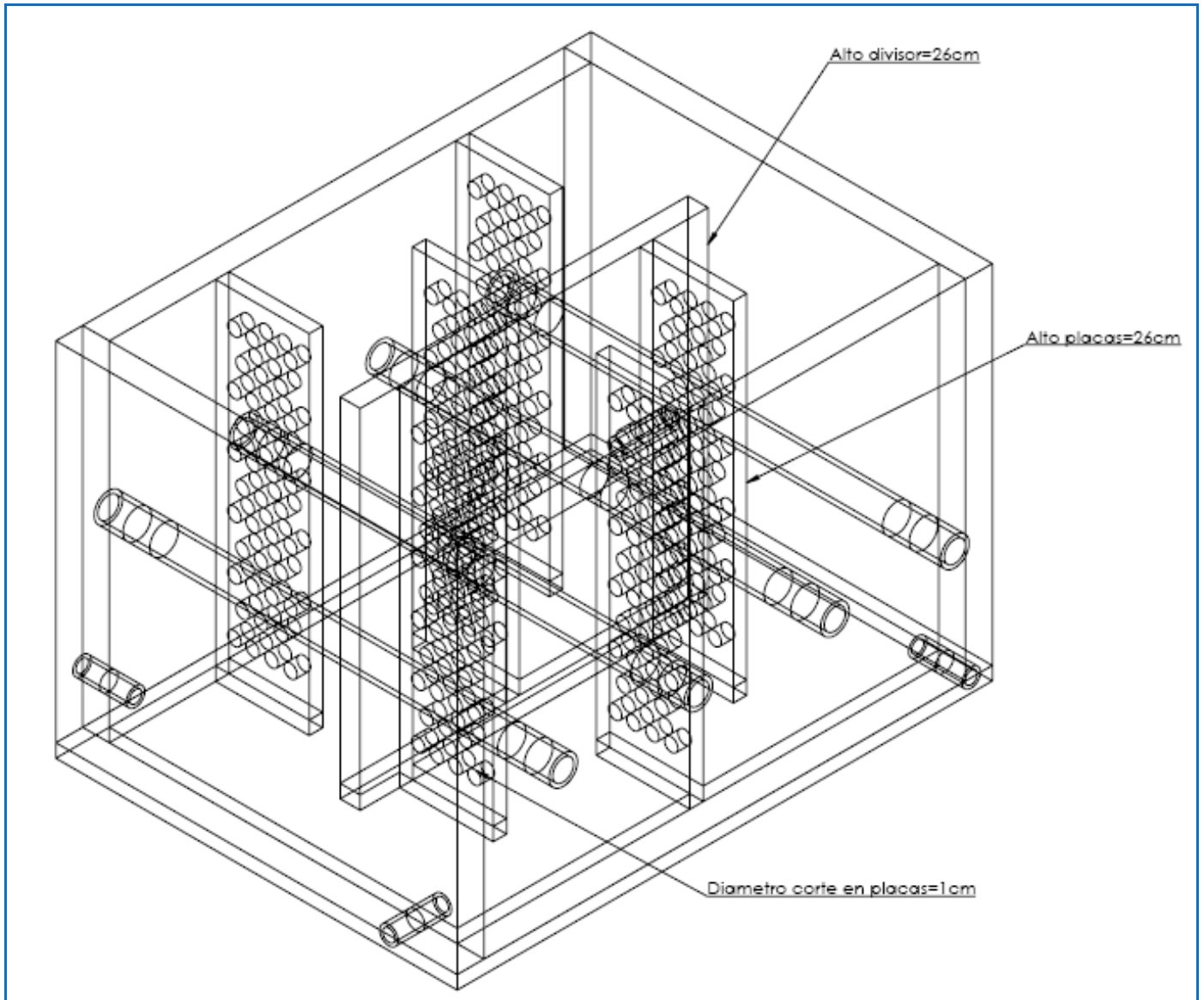


Figura 8.23 isométrica b

8.1.2.4 Funcionamiento:

El funcionamiento de este fotobiorreactor es el siguiente:

El agua con el medio y las microalgas será siempre el mismo, no entra ni sale. El reactor puede llenarse mínimamente a $\frac{3}{4}$ partes del volumen.

En la tubería de luz se colocarán dos tiras de LEDS de mismo largo de los tubos y de 1.2 cm de ancho, una por arriba y otra por abajo. Esta iluminación artificial permitirá al alga realizar sus funciones reproductivas dado que se encuentran a una distancia no mayor de 10cm una de otra y del fondo.

En el tubo 1 entran nutrientes, CO_2 y principal mente aire, lo que hace que el agua con el medio (y las microalgas) se desplacen a la izquierda chocando con la placa perforada, aquí parte del flujo pasa a través de la placa y otra la esquiva y se va por un lado, esto provocará turbulencias, además el flujo que se desplaza a un lado vuelve a chocar con otra placa perforada siguiendo el mismo comportamiento, y así pasa hasta llegar a la segunda entrada de alimentación (tubería 2), donde la el aire que entra desplaza al medio hacia el otro lado de la placa divisora de flujo, ahí al toparse con la tercera entrada de flujo se desplaza a la derecha y pasa chocando con cada una de las placas perforadas, que dejan pasar parte del flujo y otra parte de esquiva hacia uno de los lados, lo que sigue provocando un flujo turbulento.

Es justamente el flujo turbulento lo que se desea para que se asegure que las microalgas se mueven constantemente permitiendo tener oportunidad de captar más luz uniformemente.

A continuación en la siguiente figura se puede explica gráficamente en funcionamiento anterior.

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIORREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA

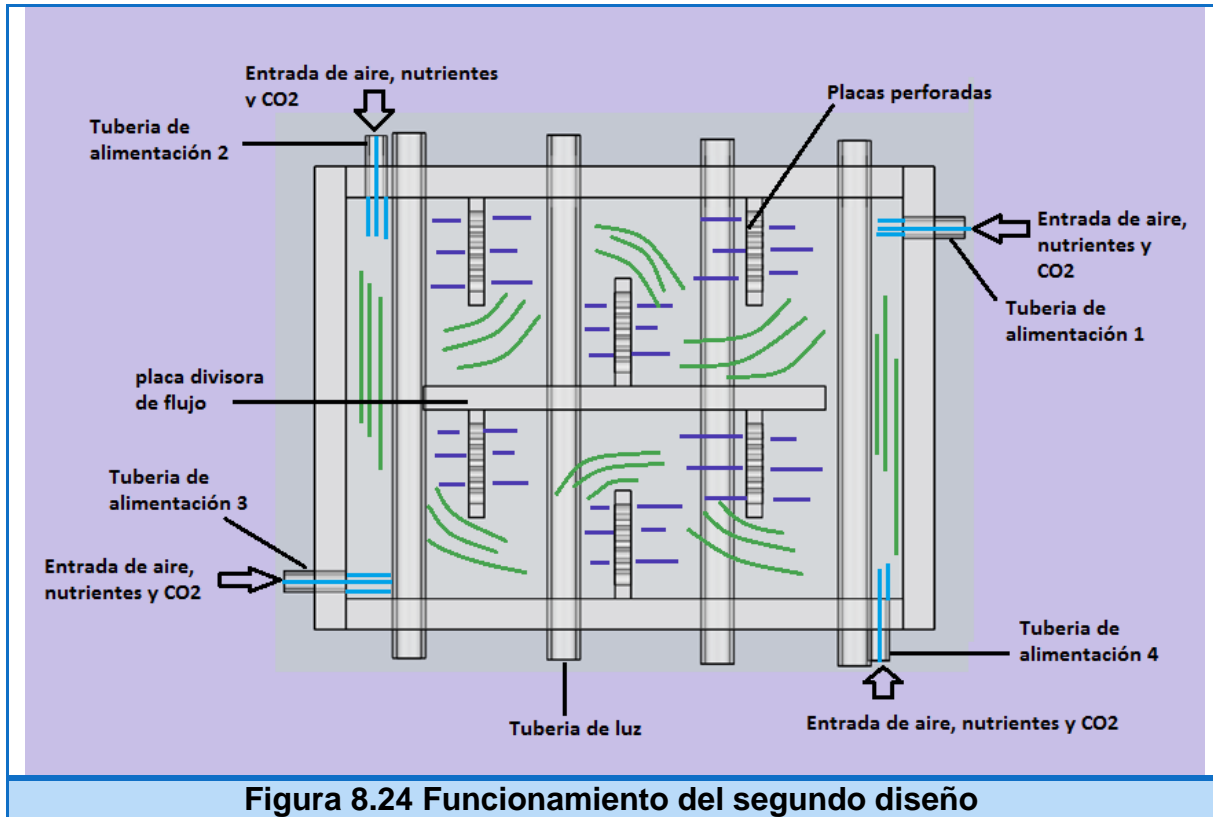


Figura 8.24 Funcionamiento del segundo diseño

8.2 ELECCIÓN DE FOTOBIORREACTOR

En los puntos anteriores se mostraron las dos propuestas preliminares de fotobiorreactor, sistema cerrado en interiores y sistema abierto en interiores.

Comparando sus características y funcionamiento se llegó a la decisión de elegir uno solo para su simulación, cabe señalar que el fin pensado del diseño elegido es su posible construcción para su uso en los laboratorios de posgrado e investigación del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

Aunque son muchos factores los que intervienen en el diseño y la elección de un fotobiorreactor, ambos diseños comparten muchas de estos factores como: material de construcción, suministro de nutrientes, pH, CO_2 , fotoinhibición por oxígeno, mezclado y trayectoria de la luz, son precisamente estos últimos dos los más importantes y los que fueron clave para la elección del fotobiorreactor

Por tanto el diseño elegido es: “sistema abierto en interiores”. a continuación estos dos factores importantes exponen y explican con mayor detalle.

8.2.1 Trayectoria de la Luz

Como se había mencionado anteriormente en este documento, la trayectoria de la luz es la distancia transversal que debe recorrer un fotón para pasar a través de un fotobiorreactor, y actualmente no es recomendable utilizar rutas luminosas de más de 10cm en ningún tipo de biorreactor.

- Ⓢ En el primer diseño no se considero, por su tamaño, incluir luces en tu interior, no obstante post construcción la luz incidiría sobre este colocándose dos placas de LEDS (como las que se muestran en la figura 8.2.1-1) por fuera del reactor de tal manera que de ambos lados (frontal y trasero) la luz incidiera hacia el reactor.

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIOREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA

- © En el segundo diseño si se considero la inclusión de luces en su interior, para lo cual se usaran tubos de acrílico transparente que incluyen 30 LEDs cada uno (esto se muestran en la figura 8.2.1-2 y 8.2.1-3). Y, de igual manera que en primer diseño, si desea se pueden montar luces LDES en placas por fuera del reactor para asegurar una máxima cobertura de luz.

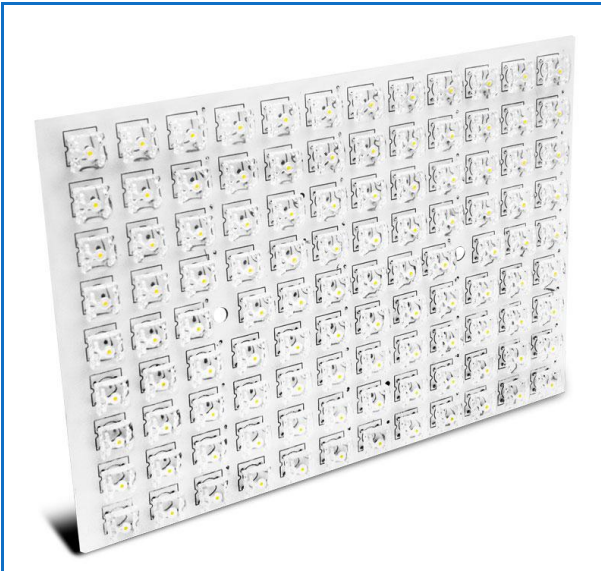


Figura 8.25 LEDs en placa



Figura 8.26 LEDs en tubos de acrílico transparente



Figura 8.27 Dibujo de LEDs en tubos de acrílico transparente

Decisión: Aunque en este aspecto ambos pueden cubrir la trayectoria de luz óptima para el desarrollo integral de las microalgas, el hecho de que sin las luces LEDs en placas el diseño 1 no pueda operar hace que el diseño 2 sea el deseable para este criterio.

8.2.2 Mezclado y circulación del medio de cultivo

Como ya se había visto anteriormente, el mezclado favorece el intercambio gaseoso, evita la sedimentación de células, la formación de gradientes de condiciones ambientales y de concentración de nutrientes, pero su función principal es permitir que todas las células puedan acceder a las zonas iluminadas en un fotobiorreactor.

Los sistemas basados en la aireación del cultivo con aire comprimido se usan comúnmente por su sencillez y porque pueden diseñarse para inducir un esfuerzo de corte pequeño que no cause daño mecánico a las células.

Aunque tanto en el primer como en el segundo diseño se considero el mezclado y circulación del medio, ambos con la inyección de aire, CO_2 y nutrientes, se dieron ciertos aspectos decisivos.

- ⊗ En el primer diseño no se considero una salida de aire, y al estar el reactor cerrado, llegara este a un punto donde estará “lleno” donde la presión interna del recipiente será igual o mayor que la presión atmosférica, no dejando entrar más aire y/o en el peor de los casos el aire y el medio podrían salir del reactor. Este es un error de diseño que está latente a suceder.
- ⊗ A pesar de que en el primer diseño se considera que el ingreso del aire al medio causa un flujo turbulento, este es menor que en el segundo diseño debido a que este último contiene más “trabas” en la ruta a seguir del medio, y las placas perforadas al permitir parte del paso del fluido lograran diferentes patrones de flujo, logrando una turbulencia deseada a lo largo de todo el sistema. Además en el primer reactor, al tener que el aire subir y bajar no garantiza que todo el medio suba y baje.

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIORREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA

Decisión: debido al posible error del primer diseño y a la ventaja de flujo del segundo, este aspecto que es el segundo más importante es decisivo para la elección del segundo diseño de fotobiorreactor.

8.3 CORRECCIONES DEL FOTOBIORREACTOR ELEGIDO (SISTEMA ABIERTO EN INTERIORES)

Para el segundo diseño se hicieron una serie de correcciones respecto al espesor de las paredes internas y externas.

Esta decisión fue tomada a partir de la disponibilidad de mercado, se consiguen más fácilmente grosores de láminas más pequeños, además los costos de las placas de acrílico se elevan al incrementar el espesor. Otro factor que influyó en esta decisión fue la oportunidad de observar algunos fotobiorreactores en persona, donde reactores de igual y mayor capacidad soportaba la presión del líquido con un espesor de pared mucho menor.

Por ello aunque la idea del diseño sigue el mismo principio, modelo y factores de diseño, los espesores y otras características físicas cambiaron. A continuación se presenta el modelo de fotobiorreactor final.

8.3.1 Diseño de Fotobiorreactor final: sistema abierto en interiores

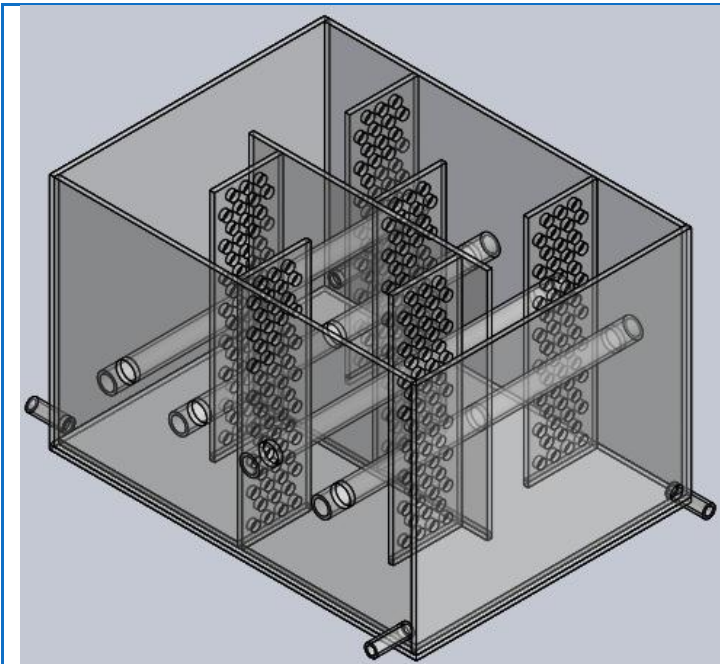


Figura 8.28 vista isométrica.

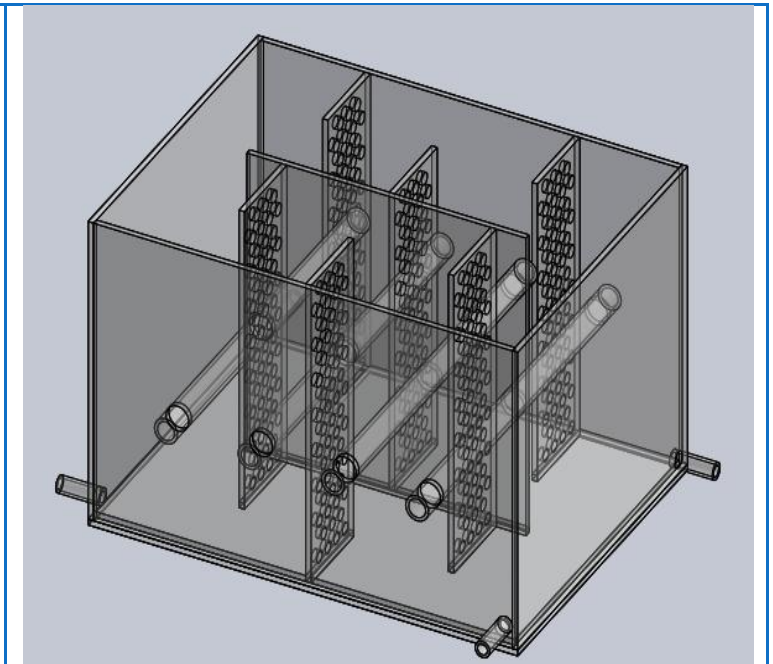


Figura 8.29 vista trimétrica

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIOREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA

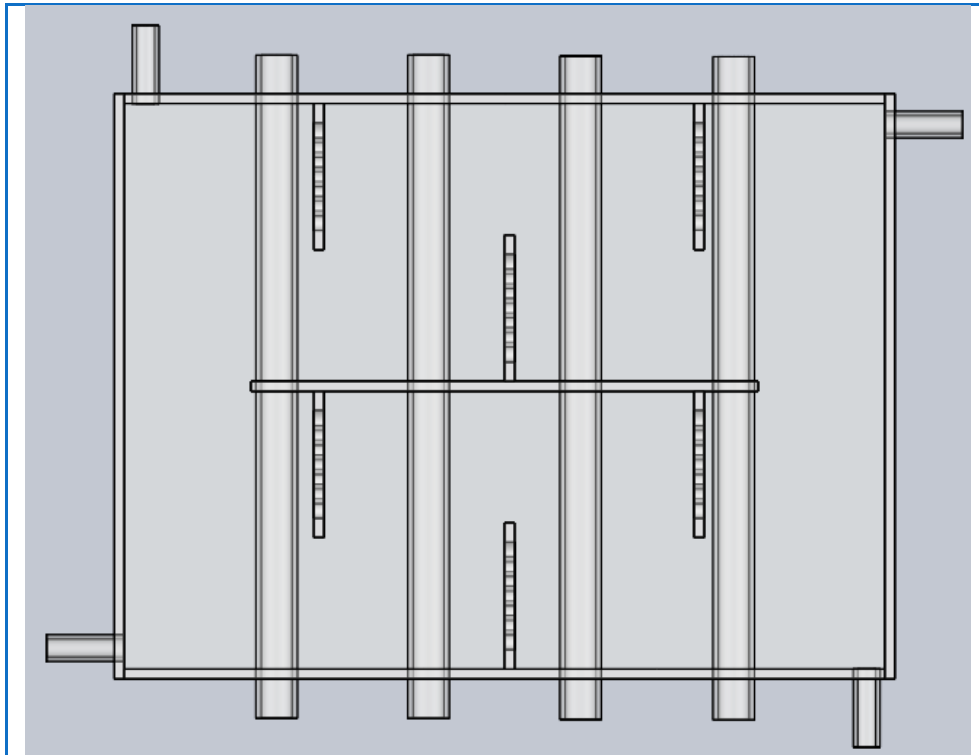


Figura 8.30 vista superior

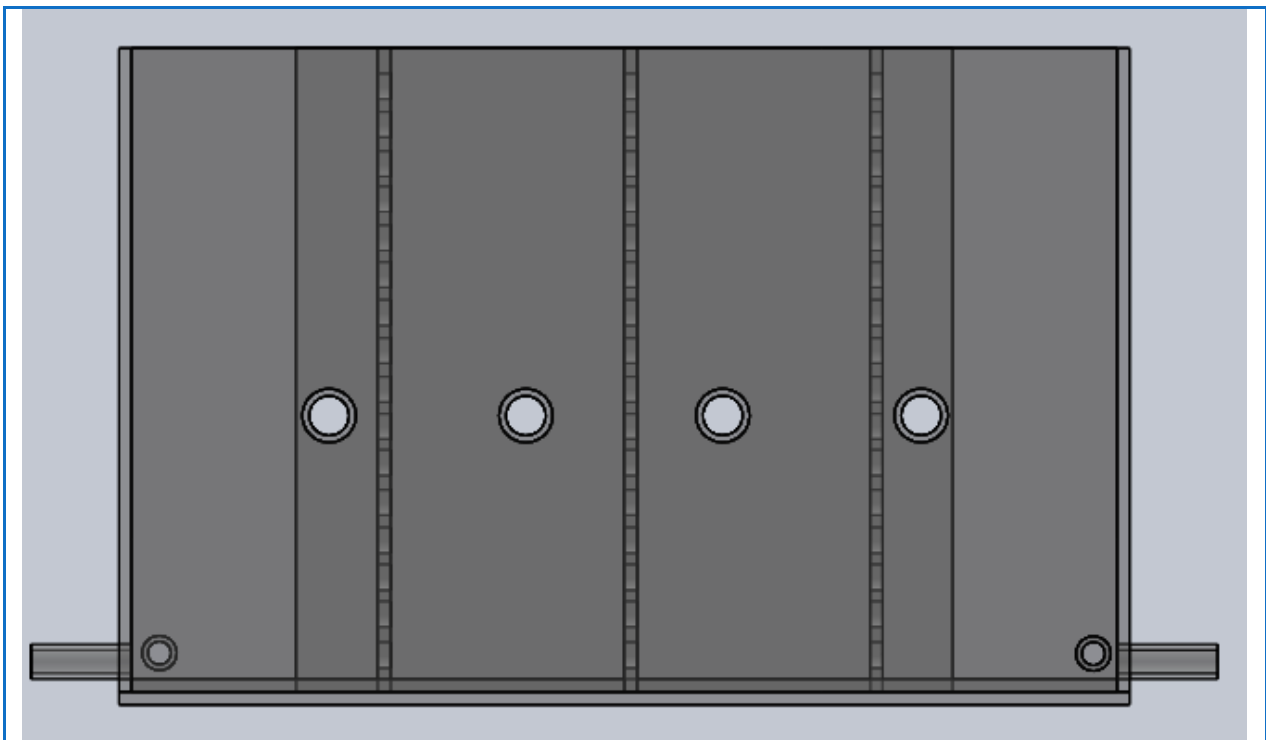


Figura 8.31 vista frontal

8.3.2 Propiedades físicas del fotobiorreactor

El centro de masa y los momentos de inercia son los resultados en el sistema de coordenadas de PBR.

- Masa = 3888.90 gramos
- Volumen = 3888.90 centímetros cúbicos
- Alto: 26 centímetros
- Largo: 40 centímetros
- Ancho: 30 centímetros
- Espesor de pared: 0.5 centímetros
- Área de superficie = 15431.12 centímetros cuadrados
- Centro de masa: (centímetros)

X = -0.91
Y = 6.53
Z = -0.12

- Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (gramos * centímetros cuadrados). Medido desde el centro de masa.

$I_x = (1.00, 0.00, 0.00)$	$P_x = 677870.89$
$I_y = (0.00, 0.01, -1.00)$	$P_y = 909544.20$
$I_z = (-0.00, 1.00, 0.01)$	$P_z = 1050549.41$

- Momentos de inercia: (gramos * centímetros cuadrados). Obtenidos en el centro de masa y alineados con el sistema de coordenadas de resultados.

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIORREACTOR”

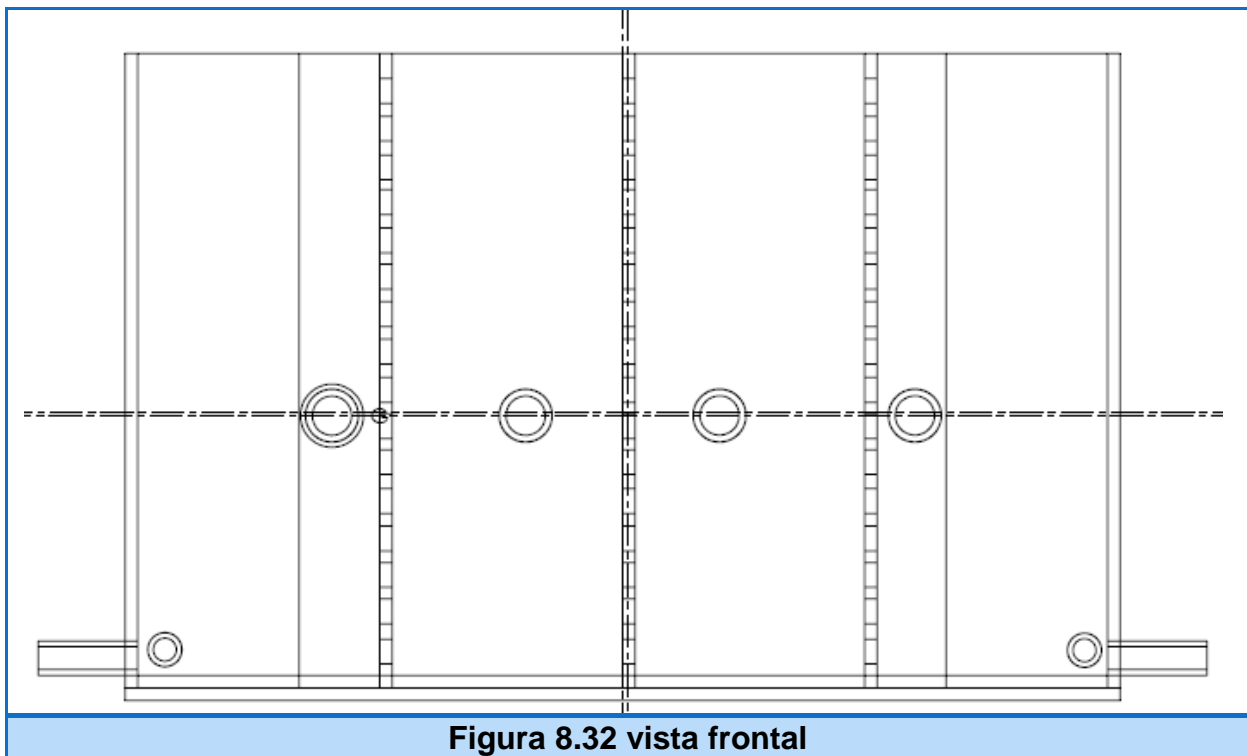
REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA

$L_{xx} = 677871.43$	$L_{xy} = 442.83$	$L_{xz} = 69.16$
$L_{yx} = 442.83$	$L_{yy} = 1050519.74$	$L_{yz} = -2026.81$
$L_{zx} = 69.16$	$L_{zy} = -2026.81$	$L_{zz} = 909573.32$

→ Momentos de inercia: (gramos * centímetros cuadrados). Medido desde el sistema de coordenadas de salida.

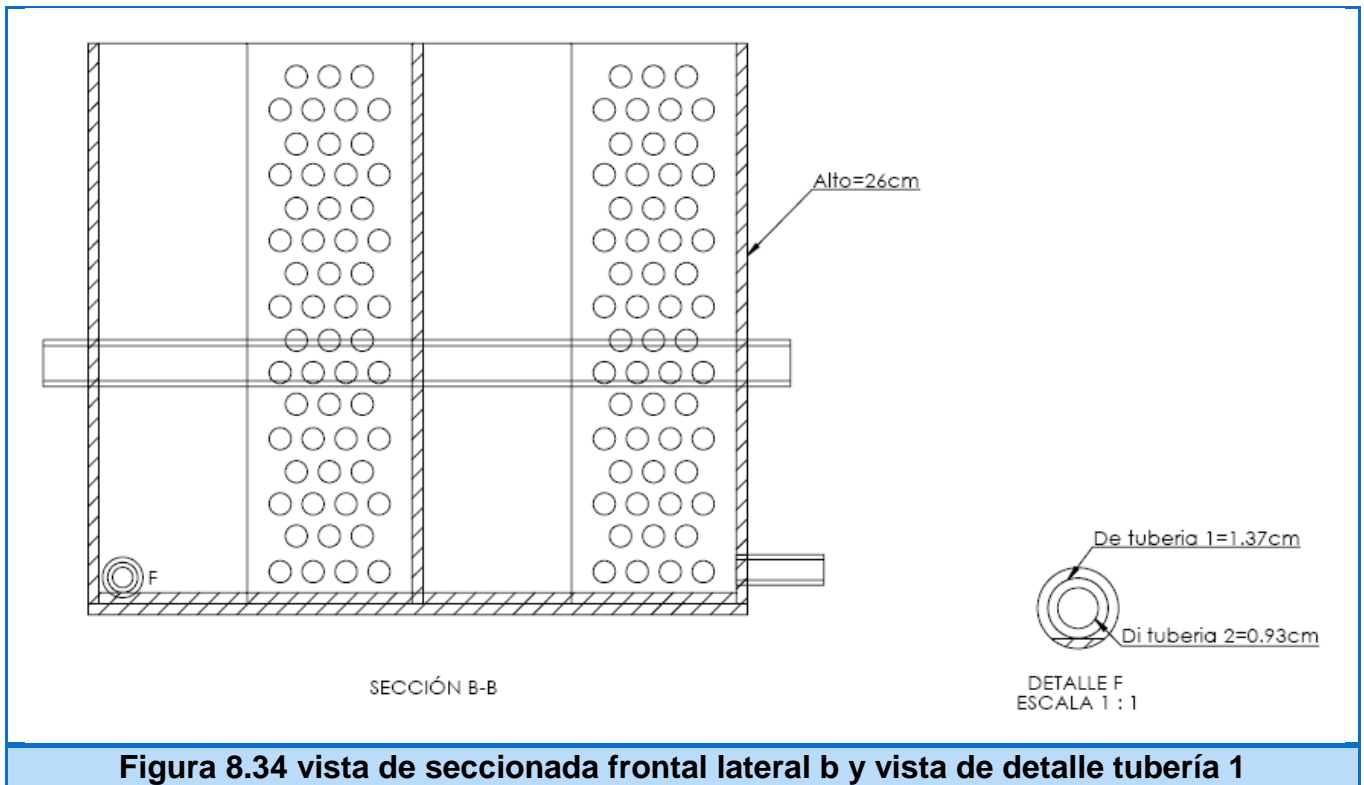
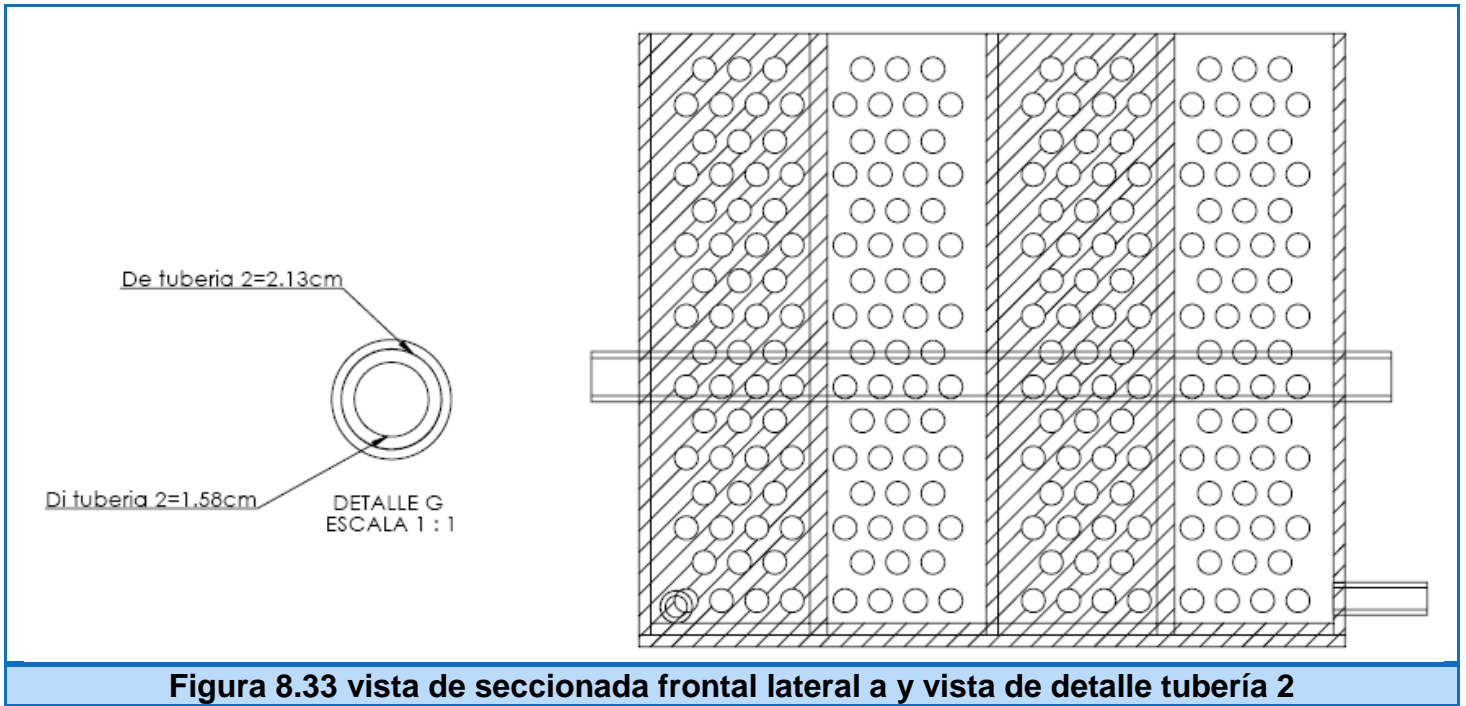
$I_{xx} = 843600.80$	$I_{xy} = -22613.22$	$I_{xz} = 497.07$
$I_{yx} = -22613.22$	$I_{yy} = 1053785.44$	$I_{yz} = -5101.61$
$I_{zx} = 497.07$	$I_{zy} = -5101.61$	$I_{zz} = 1078454.25$

8.3.3 Vistas del fotobiorreactor en plano



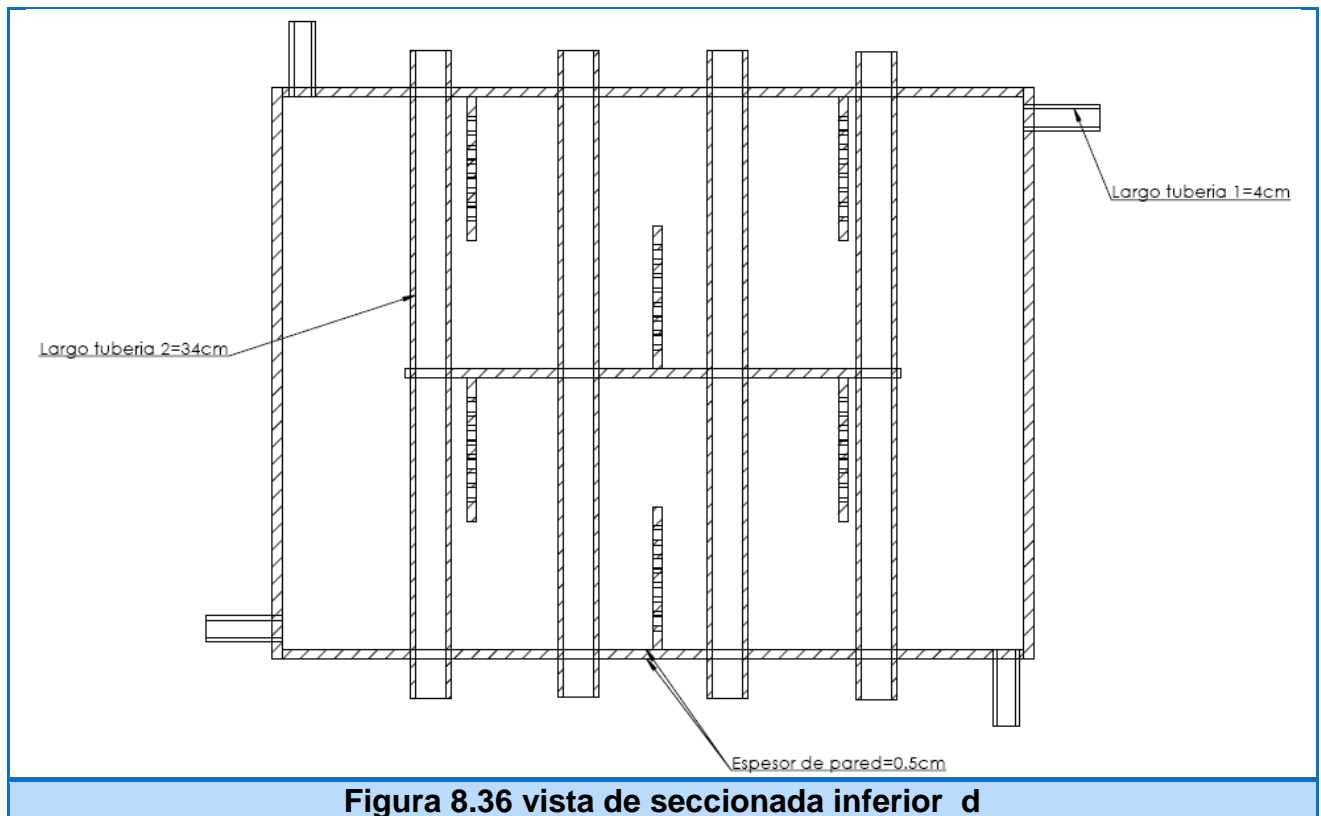
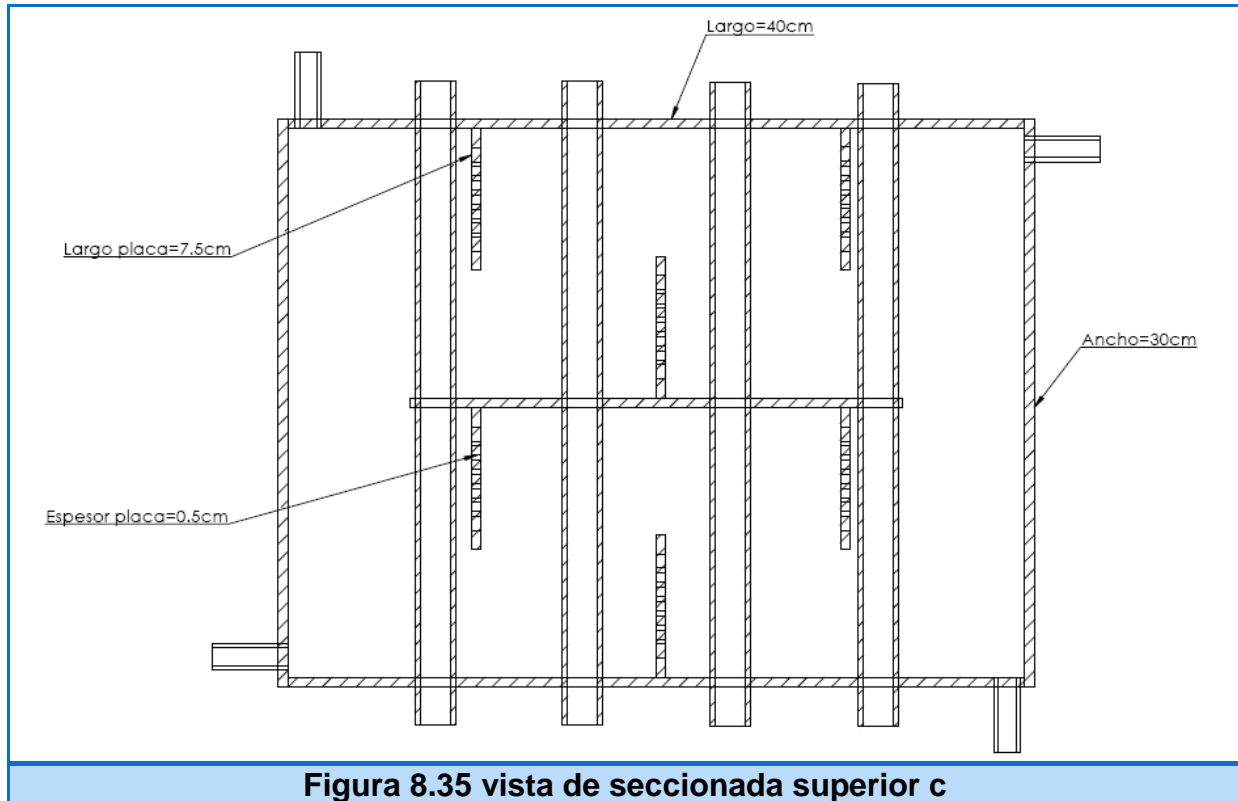
“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIORREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA



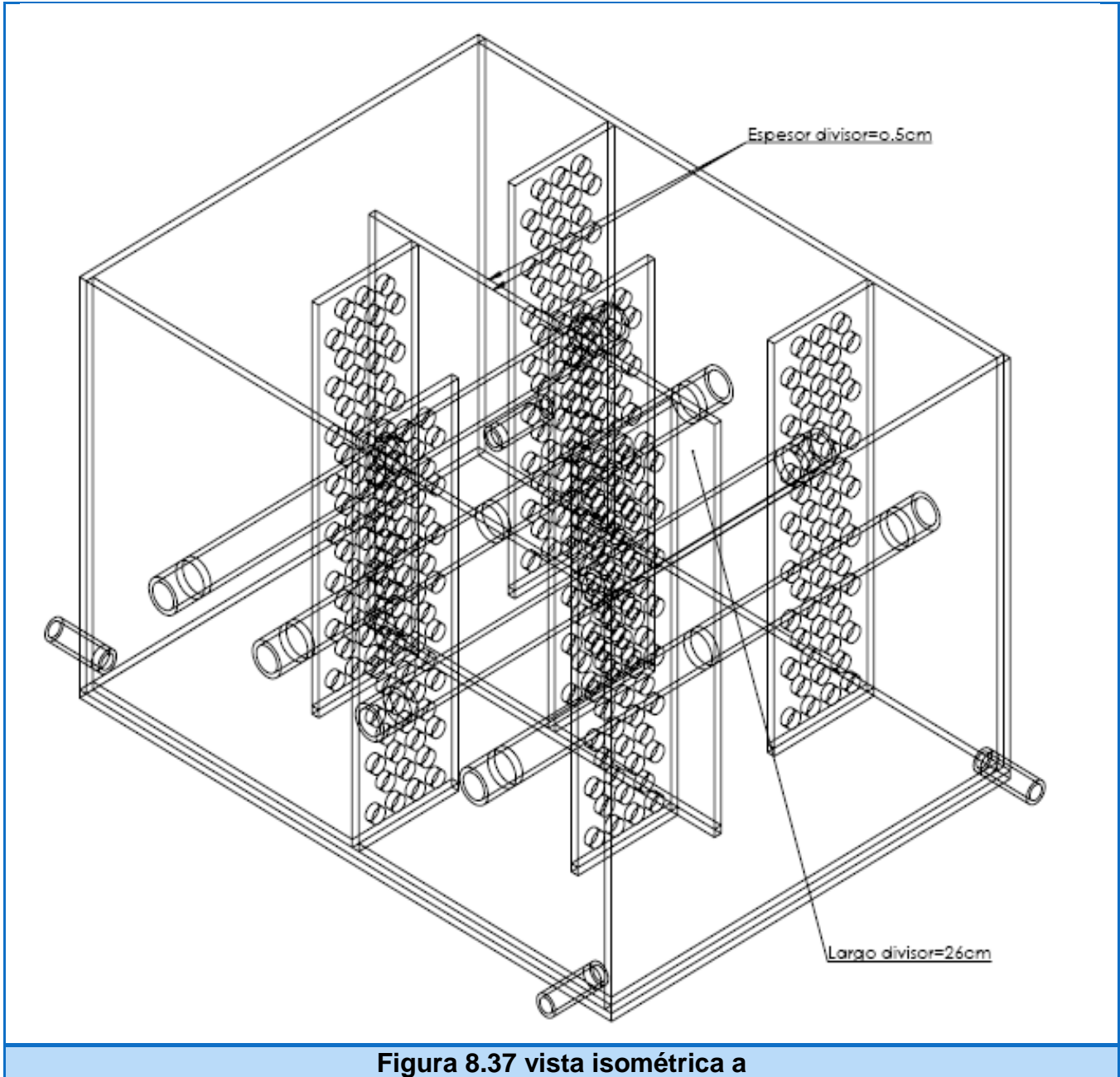
“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIORREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA



“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIORREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA



“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIOREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA

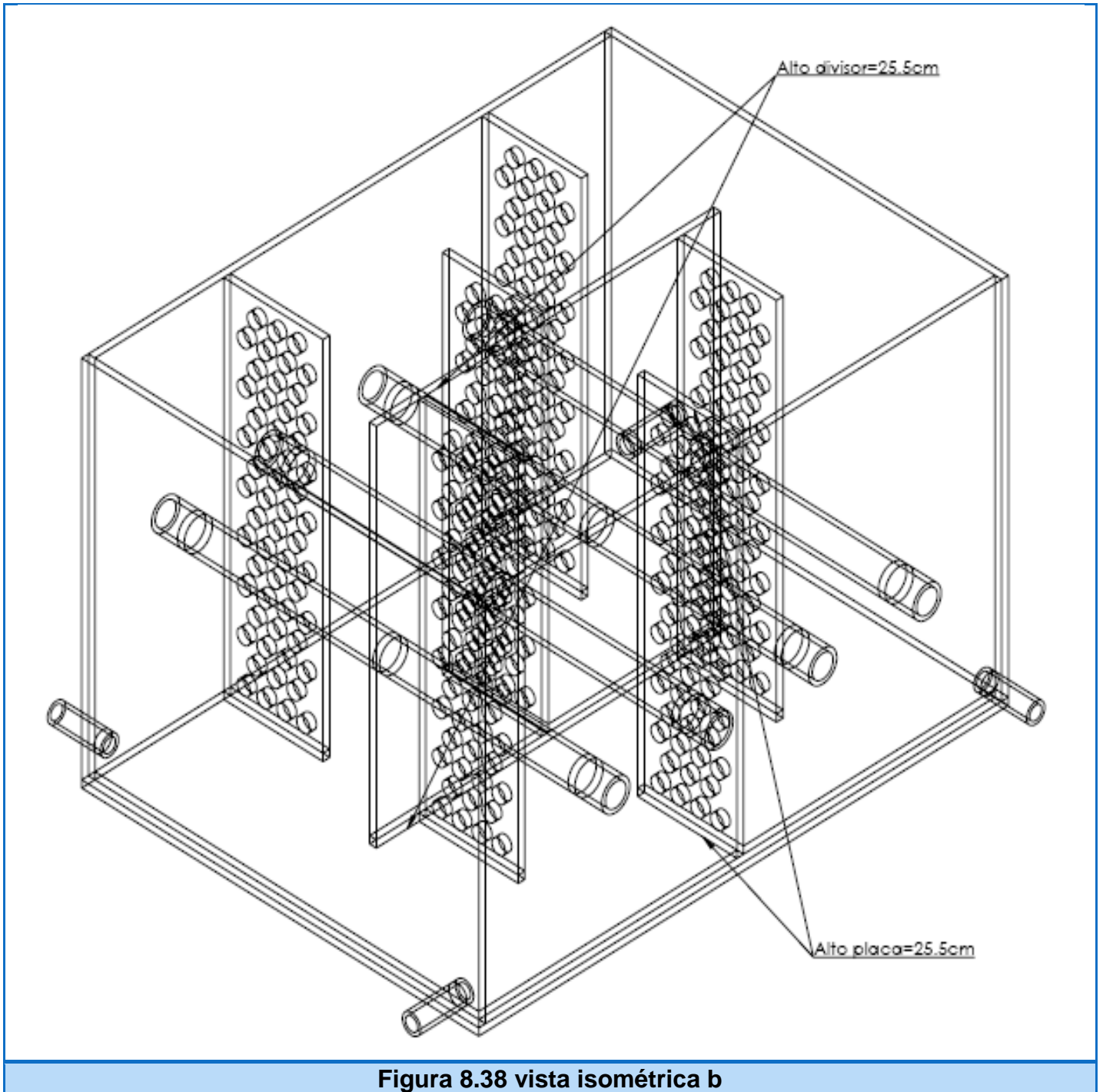


Figura 8.38 vista isométrica b

8.4 SIMULACIÓN DEL FOTOBIORREACTOR USANDO “COMSOL MULTIPHYSICS”

Una vez realizado el diseño y la construcción final del fotobiorreactor mediante la herramienta “Solid Works”, este diseño es exportado al programa “Comsol multiphysics” donde se realizan análisis hidrodinámicos sobre el reactor.

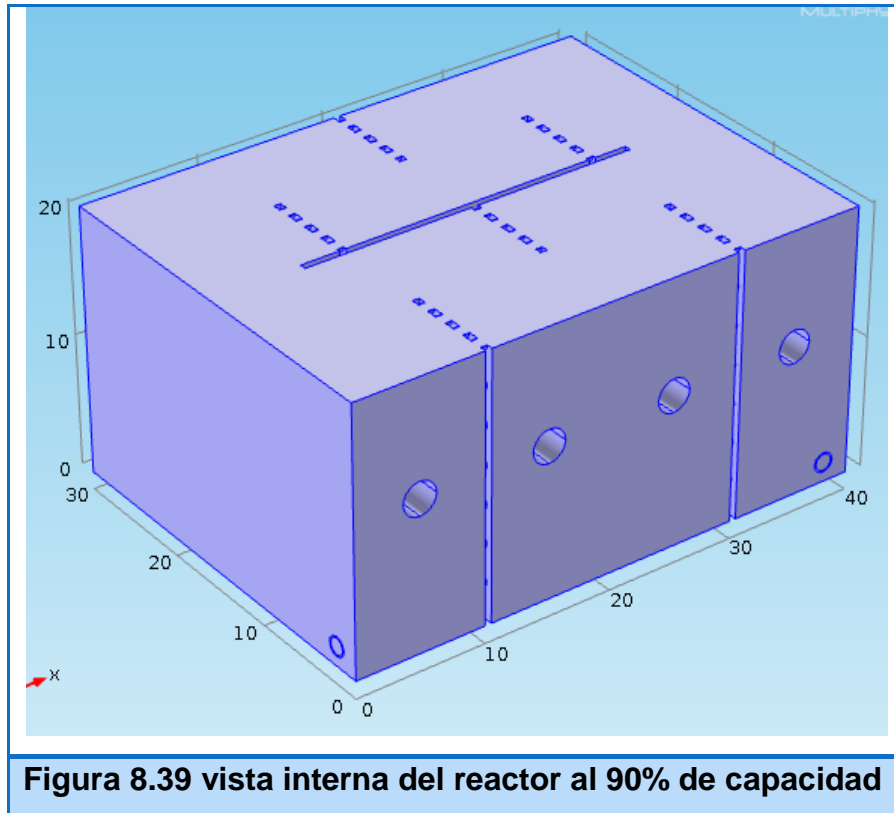
En este caso se realizó el estudio de dos fases en el reactor, gas (aire) –líquido (agua), Comsol crea un “mesh” o mallado sobre la superficie a trabajar en el reactor. Este mallado es una serie de mallas de pequeños triángulos, en cada intersección la ecuación de flujo de fluido se resuelve, al final el programa utiliza derivadas parciales finitas para resolver el sistema.

8.4.1 Geometría de trabajo

Antes de establecer las condiciones de flujo bifásico, primeramente se define la geometría del reactor con la que se trabajará. Esto es la capacidad de trabajo inicial.

Para este caso y para los fines prácticos posibles en un futuro (experimentación) se decidió trabajar con un 90% de la capacidad instalada del reactor, por lo cual se redefine su estructura hasta este nivel.

En la siguiente figura se puede observar como resulta ahora el reactor, que contiene todas sus partes internas, con solo dos diferencias: se observa a la estructura “cortada” hasta la capacidad de trabajo seleccionada y su estructura externa se desprecia para fines prácticos de la simulación.



Una vez definida la capacidad de trabajo se puede proceder a integrar las variables de flujo.

8.4.2 Propiedades de flujo

Estudio dependiente del tiempo. Usando la ecuación de flujo:

$$\phi_l \rho_l \frac{\partial \mathbf{u}_l}{\partial t} + \phi_l \rho_l (\mathbf{u}_l \cdot \nabla) \mathbf{u}_l = \nabla \cdot \left[-p \mathbf{I} + \phi_l \mu_l (\nabla \mathbf{u}_l + (\nabla \mathbf{u}_l)^T) \right] + \phi_l \rho_l \mathbf{g} + \mathbf{F}$$

$$\rho_l \nabla \cdot \mathbf{u}_l = 0, \quad \mathbf{u}_l = \mathbf{u}$$

$$\frac{\partial \phi_g \rho_g}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{N}_{\rho_g \phi_g} = -m_{gl}, \quad \phi_g \rho_g = \rho_{g \text{ eff}}$$

$$\mathbf{N}_{\rho_g \phi_g} = \phi_g \rho_g \mathbf{u}_g, \quad \mathbf{u}_g = \mathbf{u}_l + \mathbf{u}_{\text{slip}}$$

$$\frac{\partial n}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{N}_n = 0, \quad \mathbf{N}_n = n \mathbf{u}_g, \quad n = n_d$$

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIOREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA

Entradas del modelo

$T = 293.15 \text{ K}$

Materiales

Líquido: agua (material 1)

Gas: aire (material 2)

Propiedades del líquido

Density, liquid phase:

ρ_l

Dynamic viscosity, liquid phase:

μ_l

Propiedades del gas

Density, gas phase:

ρ_g

Molecular weight:

M_g kg/mol

Temperature:

T K

Bubble diameter:

d_b m

Escurrimiento del modelo

Drag coefficient model:

Surface tension coefficient:

σ N/m

8.4.2.1 Pared 1

Ecuación dependiente del tiempo

$$\begin{aligned} & \underline{u}_l = 0 \\ & -\mathbf{n} \cdot \mathbf{N}_{\rho_g \phi_g} = 0, \quad -\mathbf{n} \cdot \mathbf{N}_n = 0 \end{aligned}$$

Condición de frontera del líquido

Condición en la frontera: no escurrir

Condición de frontera del gas

No hay flujo de gas

8.4.2.2 Pared 2

Ecuación dependiente del tiempo

$$\begin{aligned} & \underline{u}_l = 0 \\ & -\mathbf{n} \cdot \mathbf{N}_{\rho_g \phi_g} = N_{\rho_g \phi_g}, \quad -\mathbf{n} \cdot \mathbf{N}_n = N_n \end{aligned}$$

Condición de frontera del líquido

Condición en la frontera: no escurrir

Condición de frontera del gas

Flujo de gas

Gas mass flux:

$N_{\rho_g \phi_g}$ kg/(m²·s)

Number density flux:

N_n 1/(m²·s)

8.4.2.3 Pared 3 (superior)

Ecuación dependiente del tiempo

$$\begin{aligned} & \underline{u}_l \cdot \mathbf{n} = 0, \quad \mathbf{K} - (\mathbf{K} \cdot \mathbf{n})\mathbf{n} = 0 \\ & \mathbf{K} = \left[\mu_l (\nabla \underline{u}_l + (\nabla \underline{u}_l)^T) \right] \mathbf{n} \end{aligned}$$

Condición de frontera del líquido

Condición en la frontera: escurrir

Condición de frontera del gas

Salida de gas

8.4.3 Mesh (mallado)

El mesh o mallado es la parte final de la simulación en Comsol, donde si al mallado tiene solución para el tipo de flujo a utilizado será mostrado de manera uniforme en todo el sistema y será de color negro. Si en dado caso el flujo y las ecuaciones usadas no cuadran o tiene(n) error(es) entonces el mallado será color azul en la(s) parte(s) donde el(los) error(es) se encuentra(n)

Para este diseño de fotobiorreactor el resultado del mallado fue el siguiente:

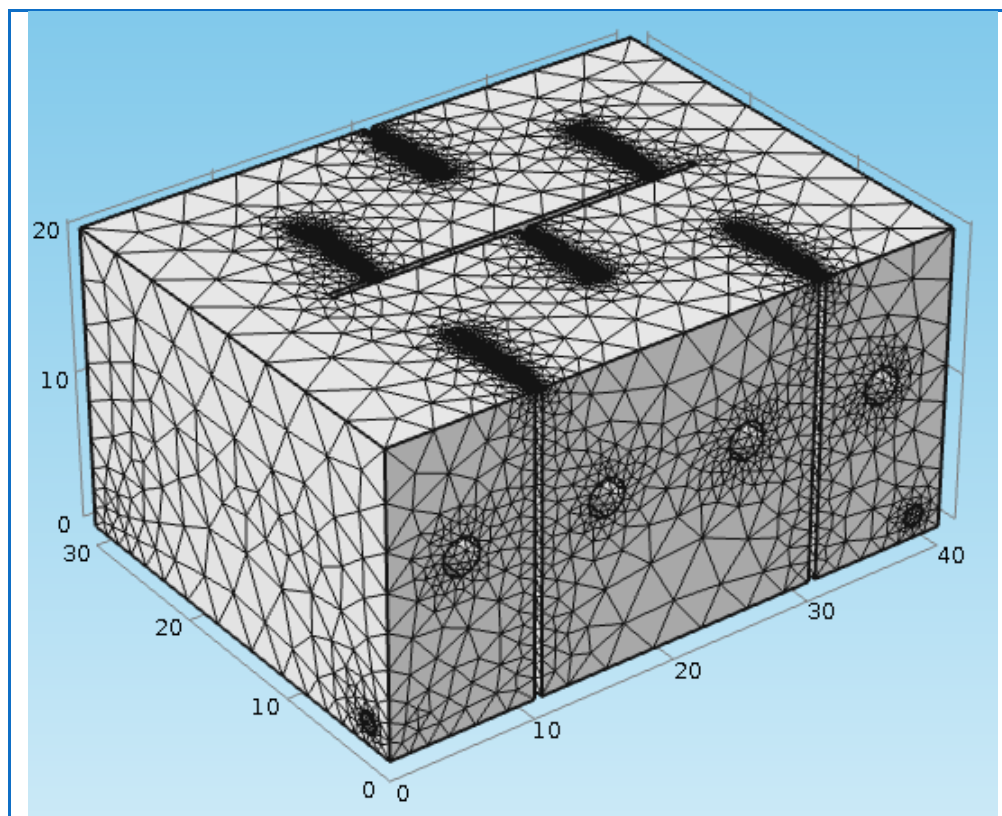


Figura 8.40 mallado del fotobiorreactor

9.- CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Hoy en día es una realidad la necesidad de mayor fuente de materia prima para muchos productos con alto valor agregado como lo son las microalgas, ya sea para la producción de biomasa, fármacos, productos de belleza o fuentes alternativas de energía, para lo cual se necesitan implementar fotobiorreactores que cumplan las necesidades básicas de las microalgas.

En este trabajo se presentó un diseño diferente a los que se pueden encontrar hoy en día tanto en el mercado como en los laboratorios de prueba, pues se han mejorado y combinado características importantes de diseño y se ha implementado el uso de la tecnología LED al sistema.

Mediante en análisis realizado en el programa Comsol, se puede ver y determinar que el diseño realizado de fotobiorreactor es viable, dado que no representa fallas o inconsistencia alguna en el reactor.

Por tanto este fotobiorreactor es altamente recomendado y aprobado para su fin futuro para el cual fue diseñado: construcción y experimentación a escala laboratorio.

La recomendación más importante es el factor “escalamiento” como se había mencionado en las limitaciones, si se requiere de un tamaño más grande se necesita volver ser construido y simulado en ambos programas, si este fuera el caso.

10.- FUENTES DE INFORMACIÓN

- Acién F. F.G., García C. F., Sánchez P. J.A., Fernández S.J., Molina G. E., 1997. A model for light distribution and average solar irradiance inside outdoor tubular photobioreactors for microalgal mass culture. *Biotechnol. Bioeng.* 55, 701–704.
- Becker, E.W. (1994) *Microalgae: biotechnology and microbiology*. Cambridge University Press. Reino Unido. 293 pp.
- Beteta G. M .A. (2009). Fotobiorreactores de microalgas para producción de biodiesel marino. www.ingenieriaquimica.net.
- Camacho F., Acién F. G. , Sánchez J. A. , García F. , Molina E. (1999) Prediction of dissolved oxygen and carbon dioxide concentration profiles in tubular photobioreactors for microalgal culture. *Biotechnol. Bioeng.* 62: 71-85.
- Contreras F. C., Peña C. J. M., Flores C. L. B., Cañizares V. R. O. (2003) Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas. *Interciencia* V.28 n.8. Caracas, Venezuela.
- Davison I.R. (1991). Environmental effects on algal photosynthesis: Temperature. *J.Phycol.* 27: 2-8.
- Deleg M. (2008) Tecnología LED. Universidad Politécnica Salesiana Cuenca, Azuay Ecuador
- Frohlich B.T., Webster I.A., Ataaí M.M., Shuler M.L., 1983. Photobioreactors: models for interaction of light intensity, reactor design and algal physiology. *Biotechnol. Bioeng. Symp.* 13, 331–350.
- Grobbelaar JU (1994) Turbulence in mass algal cultures and the role of light/dark fluctuations. *J. Appl. Phycol.* 6: 331-335.
- Grobbelaar JU (2000) Physiological and technological considerations for optimizing mass algal cultures. *J. Appl. Phycol.* 12: 201-206.
- Gudin C, Chaumont D (1991) Cell fragility – the key problem of microalgae mass production in closed photobioreactors. *Biores. Technol.* 38: 145-151.
- Hu Q., Guterman H., Richmond A. (1996a) A flat inclined modular photobioreactor for outdoor mass cultivation of photoautotrophs. *Biotechnol. Bioeng.* 51: 51-60.

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIOREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA

- Hu Q., Guterman H., Richmond A. (1996b) Physiological characteristics of *Spirulina platensis* (cyanobacteria) cultured at ultrahigh cell densities. *J. Phycol.* 32: 1066-1073.
- Hu Q, Kurano N, Kawachi M, Iwasaki I, Miyachi S (1998) Ultrahigh-cell-density culture of a marine green alga *Chlorococcum littorale* in a flat-plate photobioreactor. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 49: 655-662.
- Javanmardian M, Palsson BO (1991) High-density photoautotrophic algal cultures: design, construction, and operation of a novel photobioreactor system. *Biotechnol. Bioeng.* 38: 1182-1189.
- Lee CG, Palsson BO (1994) High density algal photobioreactors using light emitting diodes. *Biotechnol. Bioeng.* 44: 1161-1167.
- Lee Y.K., Low C.S., 1991. Effects of photobioreactors inclination on the biomass productivity of an outdoor algal culture. *Biotechnol. Bioeng.* 38, 995–1000.
- Lee Y.K., Low C.S., 1992. Productivity of outdoor algal cultures in enclosed tubular photobioreactors. *Biotechnol. Bioeng.* 40, 1119–1122.
- Lorenz R. T., Cysewski G. R. (2000) Commercial potential of *Haematococcus* microalgae as a natural source of astaxanthin. *Trends Biotechnol.* 18: 160-167.
- Lu C, Vonshak A (1999) Photoinhibition in outdoor *Spirulina platensis* cultures assessed by polyphasic chlorophyll fluorescence transients. *J. Appl. Phycol.* 11: 355-359.
- Molina E, Ación FG, García F, Chisti Y (1999) Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scaleup. *J. Biotechnol.* 70: 231-248.
- Morales E., Rodríguez M., García D., Loreto C., Marco E. (2002) Crecimiento, producción de pigmentos y exopolisacáridos de la cianobacteria *Anabaena* sp. PCC7120 en función del pH y CO₂. *Interciencia* 27: 373-378.
- Ogbonna JC, Tanaka H (1998) Cyclic autotrophic/heterotrophic cultivation of photosynthetic cells: a method of achieving continuous cell growth under light/dark cycles. *Biores. Technol.* 65: 65-72.
- Ogbonna JC, Tanaka H (2000) Light requirement and photosynthetic cell cultivation –development of processes for efficient light utilization in photobioreactors. *J. Appl. Phycol.* 12: 207-218.

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIOREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA

- Payer H.D., Chiemvichak Y., Hosakul K., Kongpanichkul (1980). Temperature as an important climate factor during mass production of microscopic algae. Pp 389-399. In: G. Shelef and C.J. Soeder
- Prosperi C. H. (2000). Cyanobacteria in human affaires. *Interciencia* 25: 303-306
- Pulz O., Scheinbenbogen K., 1998. Photobioreactors: design and performance with respect to light energy input. *Adv. Biochem. Eng. Biotechnol.* 59, 123–152.
- Quiang H., Gutterman H., Richmond, A., 1996. A flat inclined modular photobioreactor for outdoor mass cultivation of photo autotrophs. *Biotechnol. Bioeng.* 51, 51–60.
- Raven J.A, Geider R.J. (1988) temperature and algal growth. *New Phytol.* 110: 441-461.
- Rabe A.E., Benoit A., 1962. Mean light intensity. A useful concept in correlating growth rates of dense cultures of microalgae. *Biotechnol. Bioeng.* 4, 337–390.
- Richmond A., Boussiba S., Vonshak A., Kopel R. (1993) A new tubular reactor for mass production of microalgae outdoors. *J. Appl. Phycol.* 5: 327-332.
- Richmond A (1996) Efficient utilization of high irradiance for production of photoautotrophic cell mass: a survey. *J. Appl. Phycol.* 8: 381- 387.
- Richmond A. (2000). Microalgal biotechnology at the turn of the millennium: a personal view. *J. Appl. Phycol.* 12: 441-451.
- Soo S.I., Gyun L.C (2003). Photobioreactor engineering: design and performance. *Biotechnology and bioprocess engineering* 8:313-321.
- Torzillo G., Sacchi A. and Materassi R. (1991). Temperature as an important factor affecting productivity and night biomass loss in *Spirulina platensis* grown outdoors in tubular photobioreactors. *Bioseurse technol.* 38:95-100
- Tompson P. A., Guo M. X., Harrison P.J. (1992) Effects of variation temperature. i. On the biochemical composition of eight species of marine phytoplankton. *J. Phycol.* 28:481-488.
- Ugwu CU, Ogbonna JC, Tanaka H (2002) Improvement of mass transfer characteristics and productivities of inclined tubular photobioreactors by installation of internal static mixers. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 58:600-607.

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIORREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA

Vilchez C., Garbayo I., Lobato M. V., Vega J. M. (1997) Microalgae-mediated chemicals production and wastes removal. *Enzyme Microb. Technol.* 20: 562-572.

11.- ANEXOS

11.1 ANEXO 1: TECNOLOGÍA LED

La tecnología LED se está poniendo hoy en día a flote, por lo que en la actualidad se pretende sustituir las lámparas tradicionales (incandescentes u fluorescentes) por la razón de su mayor consumo de potencia, haciendo que los LEDs (diodo emisor de luz) pasen a un primer plano ya que su consumo de potencia es aproximado a un 40% menos que las lámparas tradicionales. La tecnología LED y OLED se está empleado en la gama de televisores haciéndoles más nítidas las imágenes y menos volumen en su diseño, en semáforos haciéndoles a estos que consuman menos potencia y sean más visibles y duraderos que los semáforos normales. Los LEDs actualmente disponibles ya están remplazando rápidamente a otras fuentes de iluminación como así también son hoy la tecnología preferida para luces decorativas y de diferentes aplicaciones. La potencia de los LEDs, como fuente de iluminación general (luz blanca), es actualmente una de sus principales promesas de cara al futuro.

LED se define por sus siglas como diodo emisor de luz, no es más que un pequeño chip de material semiconductor, que cuando es atravesado por una corriente eléctrica, en sentido apropiado, emite luz monocromática sin producir calor, es decir un componente electrónico semiconductor, con polaridad por lo que se usará en funciones de señalización, estética y, actualmente iluminación. Su estructura consta de un hilo muy fino, entre el cátodo y el ánodo, que podría dar apariencia de fragilidad, pero no es así; porque no tiene que ponerse incandescente (de hecho apenas se calienta) y no está al aire, sino incrustado dentro del epoxy

Figura 11.1 estructura de un LED



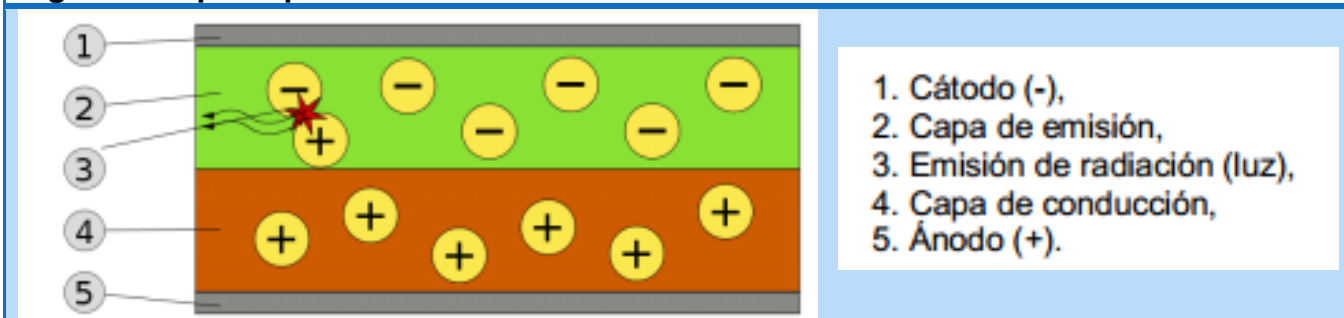
Principio de funcionamiento

El LED es un componente electrónico que pertenece a la familia de los diodos pero que tiene la propiedad de emitir luz cuando se le aplica una corriente eléctrica. Como todo Diodo se encuentra construido a base de materiales cuya combinación determinan tipo de luz, color. En el caso del Diodo LED, se encuentra construido en base a un diodo de Silicio, el cual se “Dopa” con determinados elementos existentes en la Tabla Periódica y estos le confieren características específicas, este Dopaje puede ser de dos Tipos: El Dopaje N y el Dopaje P.

Se aplica voltaje a través del LED de manera que el ánodo sea positivo respecto del cátodo. Esto causa una corriente de electrones que fluye en este sentido. Así, el cátodo da electrones a la capa de emisión y el ánodo los sustrae de la capa de conducción, seguidamente la capa de emisión comienza a cargarse negativamente (por exceso de electrones), mientras que la capa de conducción se carga con huecos (por carencia de electrones). Las fuerzas electrostáticas atraen a los electrones y a los huecos, los unos con los otros, y se recombinan (en el sentido inverso de la carga no habría recombinación y el dispositivo no funcionaría). Esto sucede más cerca de la capa de emisión, porque en los semiconductores orgánicos los huecos se mueven más que los electrones (no ocurre así en los semiconductores inorgánicos).

La recombinación es el fenómeno en el que un átomo atrapa un electrón. Dicho electrón pasa de una capa energética mayor a otra menor, liberándose una energía igual a la diferencia entre energías inicial y final, en forma de fotón. La recombinación causa una emisión de radiación a una frecuencia que está en la región visible, y se observa un punto de luz de un color determinado. La suma de muchas de estas recombinaciones, que ocurren de forma simultánea, es lo que llamaríamos imagen.

Figura 11.2 principio de funcionamiento de un LED



Ventajas

Las principales ventajas que nos presenta la tecnología LED son las siguientes:

- * Reducido tamaño a unos pocos milímetros cúbicos
- * Reducido consumo de energía generalmente en el orden de 100mw
- * Larga vida útil hasta 100.000 horas de vida útil comparada con 8000 horas de vida útil de una buena lámpara incandescente.
- * Con la tecnología LED se produce una menor disipación de calor.
- * Sin radiación U.V.

Desventajas

Las principales desventajas que podemos encontrar en el uso de la tecnología LEDs son las siguientes:

- * El diodo LEDs depende en gran parte por la temperatura ambiental.
- * Los LEDs deben ser suministrados con mas voltaje requerido y menos de la corriente necesaria

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIORREACTOR”

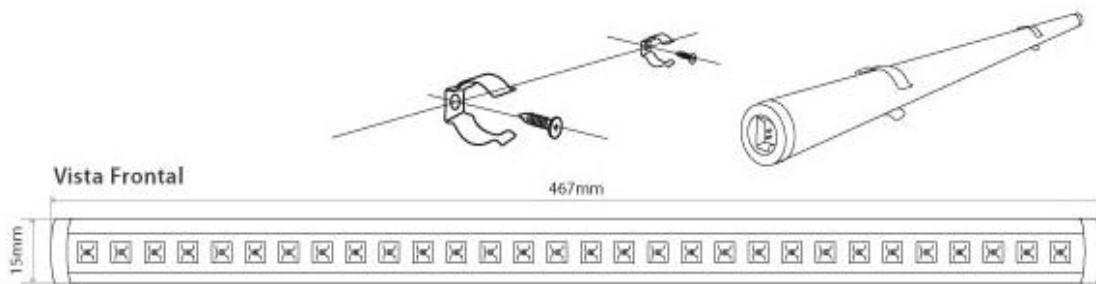
REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA

11.2 ANEXO 2: CARACTERISTICAS DE LOS LEDS A USAR EN EL FOTOBIORREACTOR

Proveedor: “FULLED” <http://www.fulled.com.ar/>

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Formato:	Lineal de 467mm
Cantidad de LEDs:	30
Tipo de LEDs:	Piraña
Tipo de Acrílico:	Transparente
Alimentación:	12VCC
Amperaje:	450mA
Consumo	5,4W

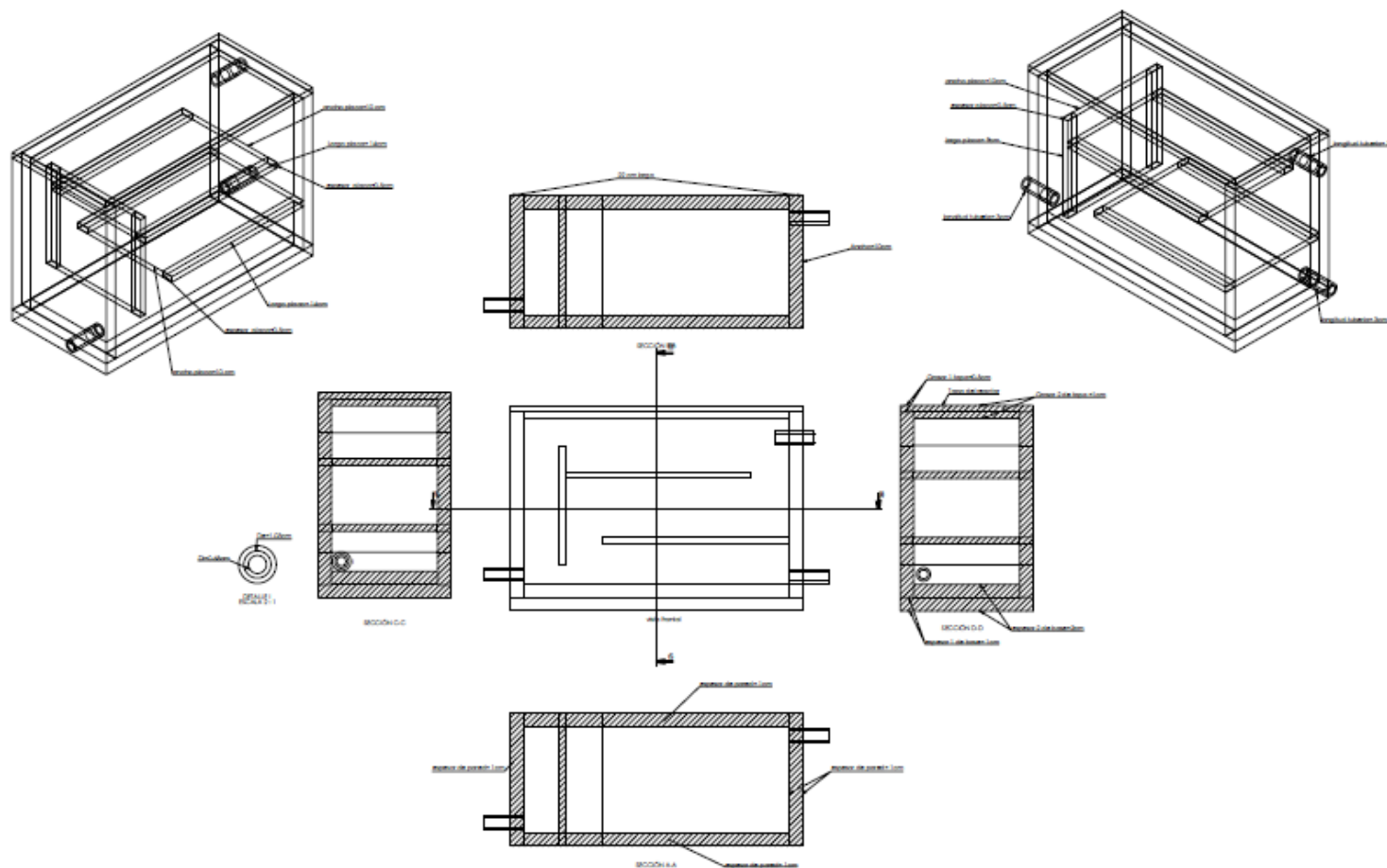


Colores de LEDs disponibles:



Color a usar: banco frio, las medidas de largo y ancho del tubo pueden ser a pedido del cliente en cuestión.

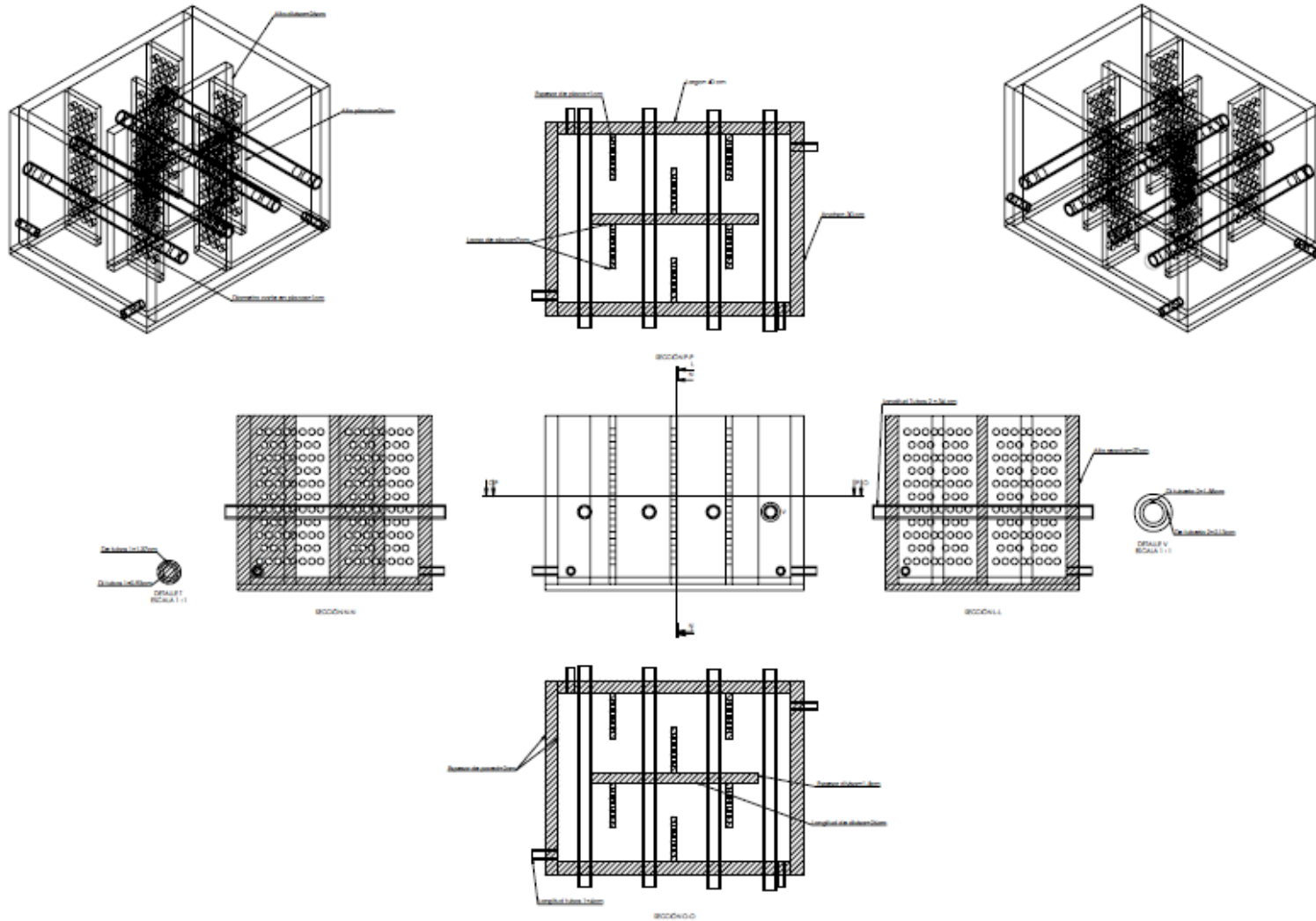
11.3 ANEXO 3: PLANOS DEL PRIMER DISEÑO DE FOTOBIORREACTOR



NO.	DESCRIPCIÓN	FECHA	ESTADO
1	SECCION A-A		
2	SECCION B-B		
3	SECCION C-C		
4	SECCION D-D		
5	DETALLE		

Vistas medidas

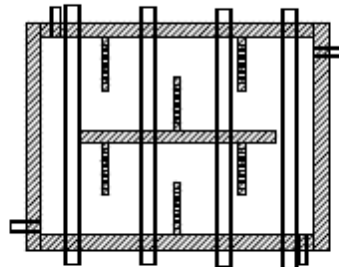
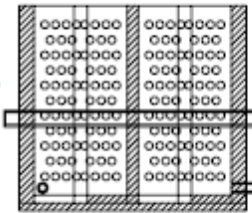
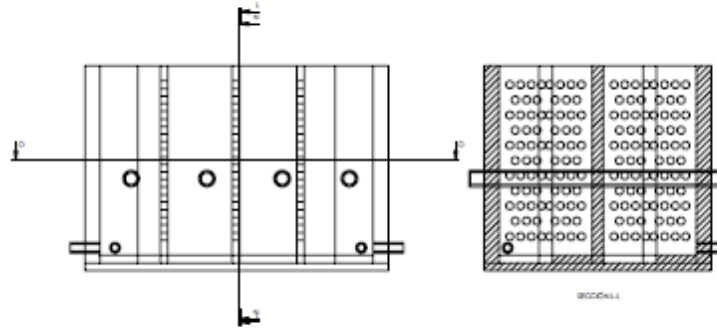
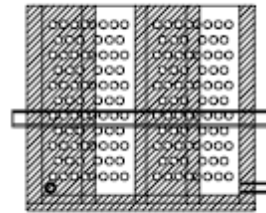
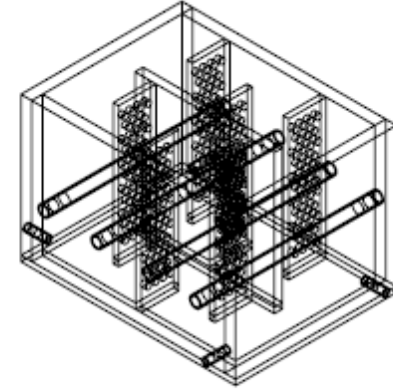
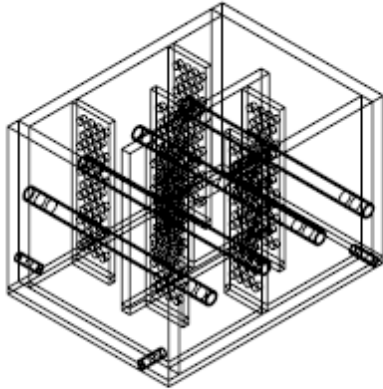
11.4 ANEXO 4: PLANOS DEL SEGUNDO DISEÑO DE FOTOBIORREACTOR



Nombre del Proyecto	
Fecha	
Autores	
Revisado por	
Calificado por	
Fecha de Evaluación	
Calificación	
Comentarios	
vistas recator	

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIORREACTOR”

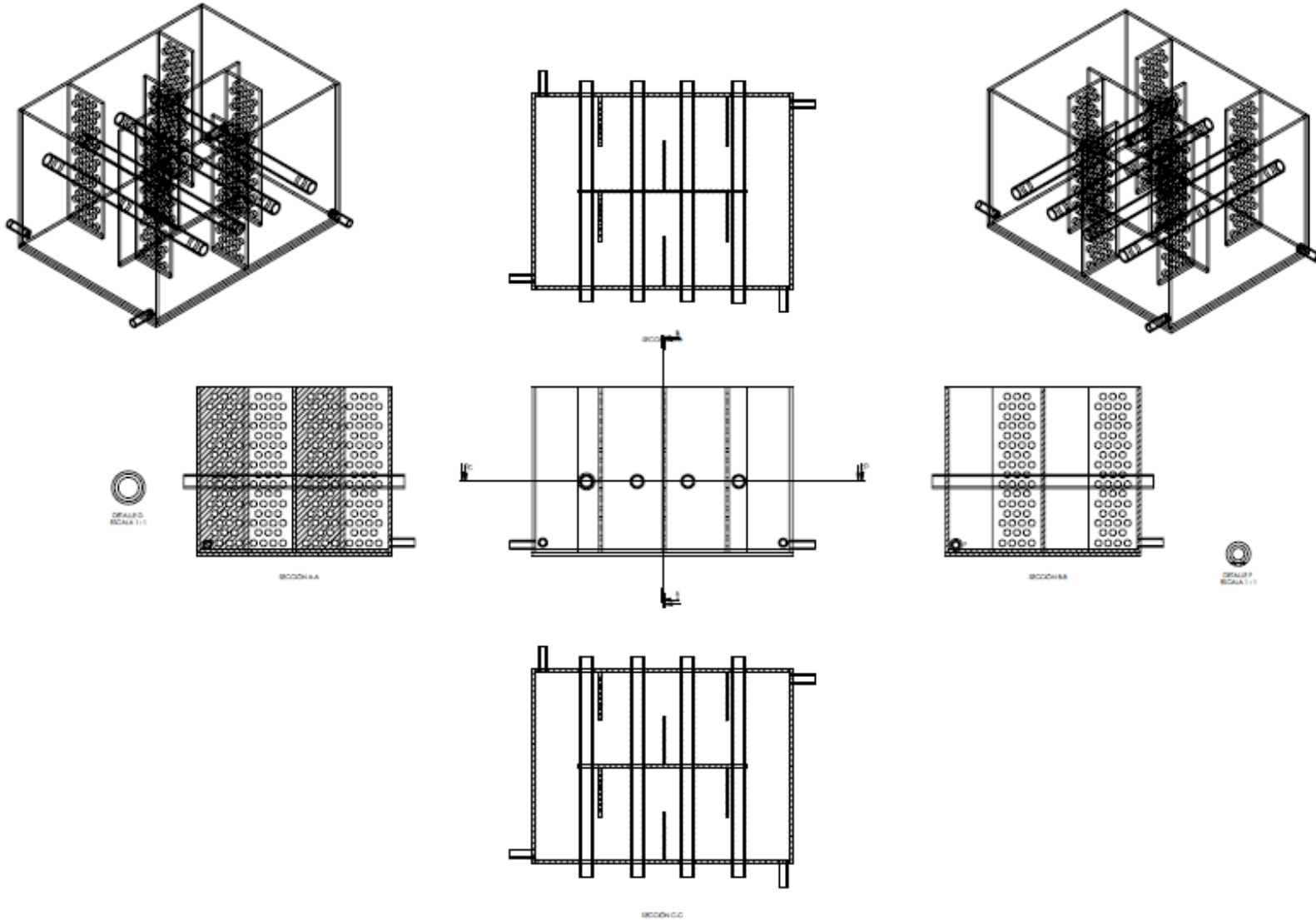
REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA



REACTOR TRANSPARENTE	
Nombre:	
Fecha:	
Autores:	
Asesor:	
Asignatura:	
Curso:	
Grado:	
Facultad:	
Escuela:	
Departamento:	
Centro:	
Carácter:	
Modalidad:	
Horas:	
Créditos:	
Observaciones:	

“DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN FOTOBIORREACTOR”

REPORTE DE PROYECTO DE RESIDENCIA



AUTORES		FECHA	
PER			