

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

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

“Diseño de un Sistema de Iluminación Móvil para un Fotobiorreactor
Cerrado de Cultivo de Microalgas”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Hugo Enrique Romero Carrillo

Víctor Ali Molina Rivas

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2021

DEDICATORIA

De: Hugo Romero

El presente proyecto va dedicado a Dios por darme las fuerzas de luchar día a día y obtener una de mis metas tan deseadas, a mis padres por darme la vida, mis hermanas por esas palabras de aliento constantes y una de las personas más importantes en mi vida que es mi abuela materna Charito por darme ese apoyo incondicional desde muy pequeño y finalmente a todas las personas que me abrieron las puertas para la realización de este proyecto.

AGRADECIMIENTO

De: Hugo Romero

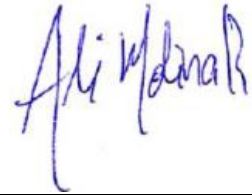
Agradezco a mis tutores y profesores por guiarme en mi formación académica a lo largo de mi carrera, a mi mami Charito por su apoyo en todos los sentidos y a haber puesto su confianza en mí. Y un agradecimiento especial una persona que me brindó su ayuda y apoyo incondicional Romina Granja. Finalmente, a Dios por ser mi guía y acompañarme a lo largo de mi vida.

DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Hugo Enrique Romero Carrillo* y *Víctor Alí Molina Rivas* y damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”



Hugo Enrique Romero
Carrillo



Víctor Alí Molina Rivas

EVALUADORES

EMERITA
ALEXANDR
A
DELGADO
PLAZA

Firmado digitalmente por
EMERITA ALEXANDRA
DELGADO PLAZA
Nombre de reconocimiento
(DN): cn=EMERITA
ALEXANDRA DELGADO PLAZA,
serialNumber=150921191312,
ou=ENTIDAD DE
CERTIFICACION DE
INFORMACION, o=SECURITY
DATA S.A. 2, c=EC
Fecha: 2021.11.17 10:46:22
-05'00'

.....
Nombre del Profesor

Ing. Emérita Delgado Plaza, PhD

JUAN
MANUEL
PERALTA
JARAMILLO

Firmado digitalmente por JUAN
MANUEL PERALTA JARAMILLO
Nombre de reconocimiento (DN):
cn=JUAN MANUEL PERALTA
JARAMILLO,
serialNumber=210921231337,
ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION
DE INFORMACION, o=SECURITY
DATA S.A. 2, c=EC
Fecha: 2021.11.17 01:18:01 -05'00'

.....
Nombre del Profesor

Ing. Juan Manuel Peralta Jaramillo, PhD.

RESUMEN

Microalgas son un conjunto variado de microorganismos donde sus características principales son: su diminuto tamaño y la capacidad de realizar fotosíntesis. La especie que se utilizó para el presente proyecto es la *Chorella vulgaris* con la finalidad de generar biomasa para la producción de biocombustibles. El presente proyecto tiene como objetivo el diseño de un sistema lumínico móvil para un fotobiorreactor tubular cerrado aplicando criterios de diseño de sistemas mecánicos. Para ello se comenzó estableciendo las dimensiones del tanque ($L=1.5\text{m}$, $D=0.5\text{m}$) para luego diseñar la estructura de soporte con un acero ASTM 36 tomando en cuenta el peso del tanque lleno con el cultivo. Luego de descartar varias alternativas para nuestro diseño, se seleccionó para el sistema lumínico el uso de lámparas LED's, para el sistema móvil un sistema de riel y un sistema de aireación de burbujas el cual nos ayuda a que los rayos de luz lleguen uniformemente a todo el cultivo. Se realizó un esquema del modelo con la ayuda de la herramienta de diseño Inventor para poder obtener planos de mismo, además de análisis de las estructuras de soporte, donde pudo corroborar junto con los datos teóricos que nuestra estructura es capaz de soportar hasta 3 veces la capacidad de peso utilizado. Finalmente, se concluyó con la viabilidad de intensidad lumínica dando un rango de operación y la capacidad de aireación dentro de los fotobiorreactores desarrollados, además de la factibilidad del proyecto el cual es muy positiva relacionando el precio del proyecto con el mercado chino dado que en nuestro país no existen aún en el mercado.

Palabras Claves: Microalgas, Fotobiorreactor, Intensidad Lumínica.

ABSTRACT

*Microalgae are a varied set of microorganisms where their main characteristics are their tiny size and the ability to photosynthesize. The species used for this project is *Chorella vulgaris* to generate biomass to produce biofuels. The objective of this project is the design of a mobile lighting system for a closed tubular photobioreactor applying mechanical system design criteria. To do this, the tank dimensions were established ($L = 1.5\text{m}$, $D = 0.5\text{m}$) and then designed the support structure with an ASTM 36 steel, considering the weight of the tank filled with the crop. After discarding several alternatives for our design, the use of LED lamps was selected for the lighting system, for the mobile system a rail system and a bubble aeration system which helps us to ensure that the light rays reach everything uniformly. cultivation. A diagram of the model was made with the help of the Inventor design tool to be able to obtain drawings of it, in addition to analysis of the support structures, where it was able to corroborate together with the theoretical data that our structure can support up to 3 times the weight capacity used. Finally, it was concluded with the viability of light intensity giving an operating range and the aeration capacity within the development photobioreactors, in addition to the feasibility of the project which is very positive relating the price of the project with the Chinese market given that in our country do not yet exist on the market.*

Keywords: *Microalgae, Photobioreactor, Agitation, Luminous intensity*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS	X
ÍNDICE DE PLANOS.....	XI
CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Descripción del problema	1
1.2 Justificación del problema.....	1
1.3 Objetivos.....	2
1.3.1 Objetivo General.....	2
1.3.2 Objetivos específicos	2
1.4 Marco Teórico.....	2
1.4.1 Importancia y aplicación de las microalgas	2
1.4.2 Parámetros para el desarrollo de microalgas.....	3
1.4.3 Iluminación en biorreactores	4
1.4.4 Biorreactores tubulares	5
1.4.5 Métodos	6
CAPÍTULO 2	7
2. METODOLOGÍA.....	7
2.1 Requerimientos y especificaciones de diseño	7
2.2 Diagrama de flujo del proceso de diseño	7

2.3	Descripción de alternativas.....	8
2.4	Criterios de selección.....	11
2.5	Comparación por pares.....	11
2.6	Matriz de decisión	12
2.7	Dimensiones del soporte del fotobiorreactor y factor de seguridad	14
2.7.1	Elección del soporte del fotobiorreactor.	14
2.7.2	Peso del fluido	15
2.7.3	Peso del fotobiorreactor	15
2.7.4	Peso de la estructura de iluminación.....	16
2.7.5	Peso total	16
2.7.6	Esfuerzo máximo permisible en diseño en un módulo de fotobiorreactor..	16
2.7.7	Factor de seguridad.....	19
2.7.8	Análisis para los 3 módulos de estructura.....	19
2.8	Sistema de conexión.....	20
2.9	Selección del riel	20
2.10	SISTEMA DE AIREACIÓN	21
2.10.1	diseño columna de burbujeo	22
2.10.2	Caida de presión entre salida del aire (compresor)- entrada del difusor ...	24
2.10.3	Difusor de aire	25
2.11	Cálculo de la intensidad lumínica	26
2.12	Sistema de entradas y salidas (tapas)	28
CAPÍTULO 3		29
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	29
3.1	Estructura metálica.....	29
3.2	Sistema de aireación.....	31
3.3	Sistema de control en tapas	32
3.4	Sistema lumínico móvil	32

3.5	Tabla de costos de materiales.....	34
CAPÍTULO 4		36
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	36
4.1	Conclusiones.....	36
4.2	Recomendaciones.....	37
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICES		

ABREVIATURAS

ESPOL Escuela Superior Politécnica del Litoral
ASTM American Society for Testing and Materials
S.A Sistema Abierto

SIMBOLOGÍA

V	Volumen
M	Masa
Kg	Kilogramos
L	Litros
σ	Esfuerzo
N	Newton
cm	Centímetros
m	Metros
mm	Milímetros
n	Factor de Seguridad
P	Potencia
I	Corriente
τ	Esfuerzo por torsión
A	Área
g	Gravedad
ρ	Densidad del fluido
U_G	Velocidad Superficial del gas
vvm	Volumen de aire por volumen líquido
v_s	Volumen Superficial
min	Minutos
s	Segundos
Q	Caudal
μ	Viscosidad del fluido
D	Diámetro de la tubería
Pm	Peso molecular
R	Constante de los gases
ϵ	Rugosidad de la tubería
T	Temperatura
Pa	Pascales
E	Iluminancia
r	Distancia entre la fuente y el objeto
C	Carbono

O	Oxígeno
H	Hidrógeno
pH	Potencial de Hidrógeno
h	Horas
π	Constante Pi
S_x	Módulo de sección elástica
H_L	Pérdidas de carga de la tubería

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Factores principales del cultivo de microalgas en S.A (Vonshak, 1988)	4
Figura 1.2 Fotosíntesis vs intensidad luminosa (Michaelis-Menten, 1913)	5
Figura 2.1 Diagrama de flujo del proceso de diseño	8
Figura 2.2 Dimensiones del tubo.....	15
Figura 2.3 Sección transversal del tubo rectangular (POPOV, 2000)	17
Figura 2.4 CAD del soporte del fotobiorreactor de un módulo.....	18
Figura 2.5 D.C.L y diagrama de fuerza cortante analizada.....	18
Figura 2.6 Diagrama de deflexión de la viga (FERDINAND BEER, 2010)	19
Figura 2.7 Diagrama de conexión del pilar de luz	20
Figura 2.8 Diagrama de conexión del pilar de luz	21
Figura 2.9 Sistema Móvil graficado en CAD	21
Figura 2.10 Sistema de Aireación Burbuja (Sánchez Saavedra & Voltolina, 1996).....	22
Figura 2.11 Iluminancia vs Distancia	28
Figura 3.1 Vista lateral del sistema del Fotobiorreactor	30
Figura 3.2 Vista Isométrica del Sistema del Fotobiorreactor	30
Figura 3.3 Máximos esfuerzos en las vigas del soporte	31
Figura 3.4 Diagrama de conexión (Díaz Aquino Raúl Bernardo, 2021)	31
Figura 3.5 Tapa inferior	32
Figura 3.6 Tapa Superior.....	32
Figura 3.7 Panel de luz con el sistema de riel	33
Figura 3.8. Panel de luz con el sistema de riel	34

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Requerimientos de Diseño	7
Tabla 2.2 Criterios de selección	11
Tabla 2.3 Comparación por pares para el sistema de iluminación	12
Tabla 2.4 Comparación por pares de Sistema Móvil.....	12
Tabla 2.5 Rango y criterio 1	13
Tabla 2.6 Matriz de decisión 1	13
Tabla 2.7 Rango y criterio 2	13
Tabla 2.8 Matriz de decisión 2	13
Tabla 3.1 Costo del proyecto	34

ÍNDICE DE PLANOS

PLANO 1	Estructura de soporte de los fotobiorreactores
PLANO 2	Estructura de soporte de las lámparas
PLANO 2	Estructura de soporte del Sistema Lumínico

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

En la actualidad es posible crear condiciones apropiadas para el desarrollo de microalgas en laboratorios; sin embargo, los sistemas de iluminación para fotobiorreactores a escala son equipos que se diseñan bajo variables específicas acorde a las características del cultivo, y son de difícil adquisición derivado a las complejidades de diseño y costo elevados, lo cual conlleva a limitaciones logísticas, económicas y posteriormente ambientales.

1.2 Justificación del problema

Los sistemas de microalgas son uno de los más importantes a nivel ambiental, puesto que son los productores primarios para el desarrollo de la cadena alimenticia de los ecosistemas marinos. Así mismo, necesitan de condiciones óptimas para proporcionar nutrientes, energía, entre otros a las especies. De acuerdo con (García Romeral, Pavía Gómez, García Sanz, Chirivella Martorell, & Serrano Aroca, 2017) las microalgas necesitan de energía lumínica del sol para realizar la fotosíntesis.

Mediante los avances tecnológicos es posible tener herramientas que brinden los mismos beneficios, que ciertos recursos naturales, como es el caso de los biorreactores, siendo capaces de crear ambientes óptimos necesarios para el crecimiento de las microalgas.

A pesar de la funcionalidad de los biorreactores cerrados, existe una diversidad de estos en distintos tamaños dependiendo de los requerimientos del usuario, por lo cual, pueden tener diferentes rangos de precio derivado del uso, siendo imprescindible un minucioso proceso de selección. El grupo de bioenergía de la Facultad de Ciencias Naturales de la Universidad de Guayaquil, actualmente se encuentra trabajando con cianobacterias y microalgas siendo estos necesarios para el cultivo y crecimiento de la biomasa utilizando diferentes intensidades lumínicas en regímenes de operación establecidos por el usuario.

A pesar de ello, no poseen todavía equipo a nivel de laboratorio que le permita regular el distanciamiento de la iluminación asociada a la Radiación Fotosintéticamente activa aprovechable (PAR-Photosynthetically Active Radiation-700-400 nm) biológico asociado al crecimiento de consorcio Microalgal.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de iluminación móvil para el cultivo de microalgas en un fotobiorreactor tubular empleando criterios de diseño de sistemas mecánicos.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Diseñar la estructura de soporte y acople del sistema de iluminación y fotobiorreactor tubular empleando criterios de análisis estructural.
- Diseñar el mecanismo de movilidad del sistema de iluminación por medio del análisis estructural y producción del consorcio Microalgal.
- Elaborar planos de construcción del sistema acoplado para la iluminación del fotobiorreactor tubular.

1.4 Marco Teórico

1.4.1 Importancia y aplicación de las microalgas

Hoy en día el mundo se encuentra en la búsqueda de métodos sustentables y limpios para la producción de energía, o en la creación de medicinas y alimentos altamente procesados, y en ocasiones se enfoca esa búsqueda en métodos complejos, cuando parte de la solución se la podría encontrar en las microalgas; sin embargo, no han sido lo suficientemente aprovechadas.

Las microalgas son organismos autótrofos unicelulares, coloniales y filamentosos que habitan diversos ambientes acuáticos en todas las latitudes y ecosistemas del planeta, y desenvuelven un papel de suma

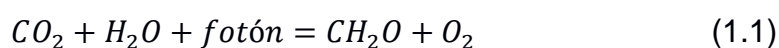
importancia en la cadena alimentaria para las especies marinas; pero también son capaces de aportar en soluciones a distintas temáticas.

Como fue mencionado anteriormente, es posible la producción de energía a partir de las microalgas aportando a la disminución de reservas petroleras y por consiguiente a la contaminación causada por la quema de combustibles fósiles. Según (Fernández Linares, Montiel Montoya, Millán Oropeza, & Badillo Corona, 2012) el biodiesel es una de las alternativas más consideradas para cubrir la demanda energética de los derivados del petróleo que han sido destinados al transporte, debido que presentan mayor eficiencia fotosintética, asimilan muy bien el CO₂ y otros nutrientes, no requieren de tierras cultivables, y adicionalmente pueden cultivarse en agua salobre.

1.4.2 Parámetros para el desarrollo de microalgas

Los seres vivos necesitamos una fuente de energía para el crecimiento y desarrollo. Los organismos fotótrofos son denominados de este modo ya que captan la energía de los fotones como su fuente de energía, en este caso la luz a radiación visible obtenida del sol, capaz de ser sensible al ojo humano a un rango de longitud de onda entre a 400 a 700 nm. Además, la radiación visible es aquella que permite la fotosíntesis de las algas y plantas(López, 2010).

Las microalgas es una de las 3 especies de microorganismos que llevan a cabo la fotosíntesis, las otras son las cianobacterias y las bacterias fotosintéticas púrpuras. Este tipo de microorganismos unicelulares son capaces de producir biomasa orgánica, rica en: proteínas, lípidos, minerales y vitaminas; llegando al mercado cosmético. Las microalgas utilizan la luz para metabolizar el dióxido de carbono (CO₂) a metanal (CH₂O) y expulsando oxígeno molecular (O₂) en una fuente de agua, quedando la siguiente reacción según (Benavente-Valdés, Montañez, Aguilar, Méndez-Zavala, & Valdivia, 2012) :



Donde, se puede observar que el CO_2 combinada con la energía de luz solar, generan los azúcares necesarios en el proceso de fotosíntesis. Ahora, la reacción general, según los autores mencionados anteriormente, es:



A continuación, se presentan los principales factores que se consideran para el cultivo de microalgas (figura 1.1).

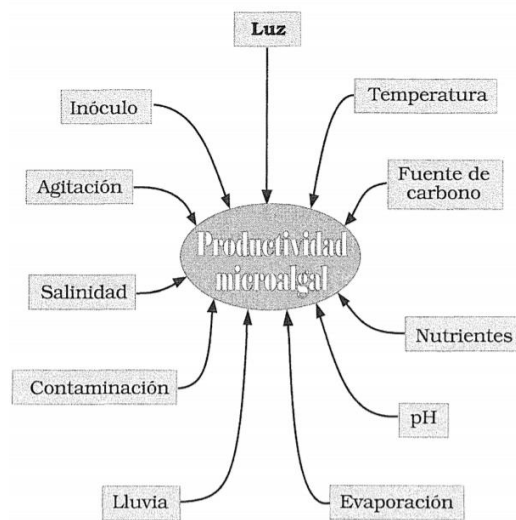


Figura 1.1 Factores principales del cultivo de microalgas en S.A (Vonshak, 1988)

1.4.3 Iluminación en Biorreactores

Factores importantes para el crecimiento de microalgas dentro de biorreactores considerando luz artificial son el rango de espectro, intensidad y el fotoperíodo. A lo que se refiere a rango de espectro, es la longitud de onda específica que más beneficia a la fotosíntesis, cabe agregar que estudios indican según (Sánchez Saavedra & Voltolina, 1996) y (Nuran, 2007) que la luz blanca y combinación azul-blanca producen efectividad en el desarrollo de las plantas en comparación a cualquier otra onda de luz, ya que esta longitud de onda es la mayor absorbida por el pigmento de la clorofila.

Una excesiva cantidad de luz puede ser perjudicial para el crecimiento o por otro lado una baja intensidad no logrará generar suficiente energía, todo esto involucra la intensidad de luz. Por último, las microalgas necesitan un periodo de tiempo en recibir luz, a este proceso se lo conoce como fotoperíodo. Este regula la división celular cuando se presenta el periodo de luz y se frena cuando este periodo de oscuridad (figura 1.2).

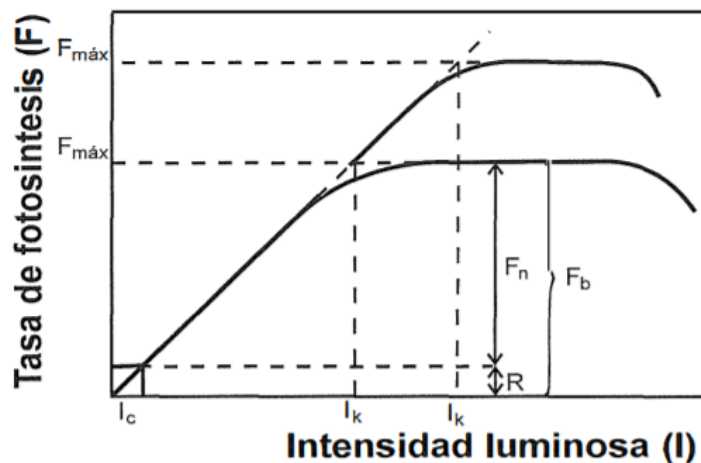


Figura 1.2 Fotosíntesis vs intensidad luminosa (Michaelis-Menten, 1913)

Tiempo atrás se utilizaba lo que eran las lámparas incandescentes, y eran un gran aporte para el cultivo en biorreactores ya que proponían una cantidad suficiente de luz para el desarrollo de las microalgas, pero su precio era elevado además de la cantidad de potencia que consumía. Con el tiempo se presentaron diodos de emisión de luz (LED), que aparcaron en muchos mercados y en biología también. Otras de las características de los LED son larga vida útil, su poca emisividad de calor; aunque para el crecimiento de microalgas el calor controlado es beneficioso en el proceso, su capacidad de emitir en una composición espectral controlada y su variabilidad en intensidad de la luz (Yeh & Chung, 2009)

1.4.4 Biorreactores Tubulares

Biorreactores Tubulares consiste en colector solar, formado por un conjunto de tubos rectos transparentes que permite la mayor captación de luz solar para el cultivo microalgal, por ello son de diámetro pequeño ($\leq 1\text{ m}$), debido

a que la luz no alcanza a penetrar adecuadamente a cultivo muy densos. Tienen una elevada actividad fotosintética por la alta exposición solar, alta productividad de biomasa. Algunos obstáculos son la poca transferencia de masa, altos niveles de pH y oxígeno en la mezcla, se requiere mantenimiento por los niveles de dióxido de carbono disueltos a lo largo de los tubos, además y requieren de grandes terrenos para la implementación.

1.4.5 Métodos

Con el objeto de analizar las variables que determinan la producción de biomasa y en particular evaluar la eficiencia del sistema de iluminación, se diseñará en el programa de diseño CAD (computer-aided design por sus siglas en ingles), se diseñará la estructura de acople del biorreactor con sistema de iluminación. Otro tema por analizar es la luz, tanto el tiempo y la intensidad emitida sobre los biorreactores y por ende el resultado de nuestra investigación. Es importante construir un sistema de análisis de efectividad de la luz por lo tanto el método que emplearemos es analíticamente.

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

2.1 Requerimientos y especificaciones de diseño

Como requerimientos y especificaciones de diseño de tomo en cuenta los siguientes aspectos: tipo de microalga, número de módulos del fotobiorreactor, material de la estructura de soporte y el sistema de agitación del cultivo.

Tabla 2.1 Requerimientos de Diseño

Tipo de microalga	Chlorella Vulgaris
Numero de Módulos del fotobiorreactor	3
Material de la Estructura de soporte	Acero
Sistema de agitación	Distribuidor en cruz
Entradas y salidas en el fotobiorreactor	

2.2 Diagrama de flujo del proceso de diseño

A continuación, se presenta un diagrama del flujo donde indica el proceso de diseño a seguir durante el proyecto (figura 2.1).

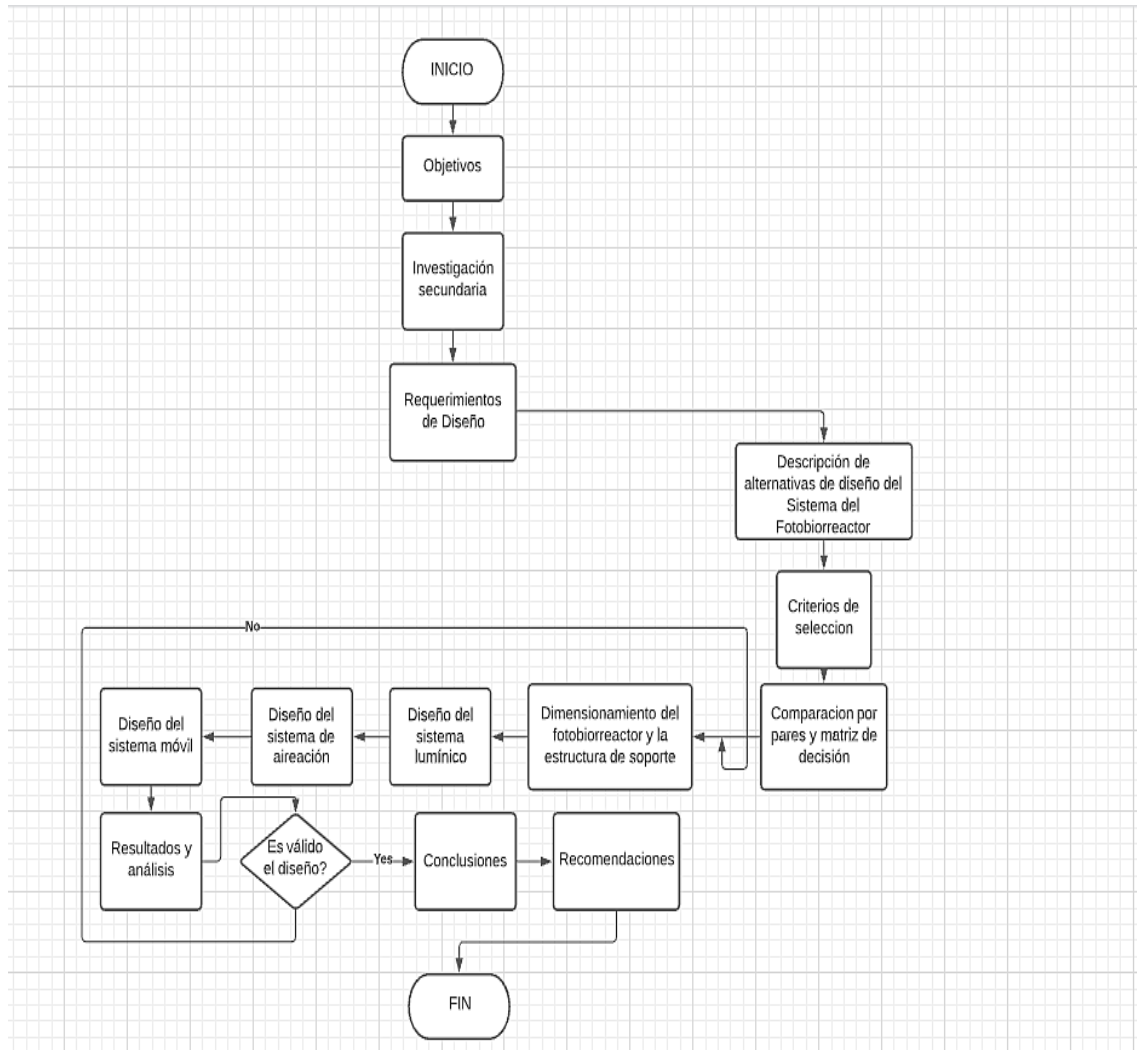


Figura 2.1 Diagrama de flujo del proceso de diseño

2.3 Descripción de alternativas

Se detalla a continuación las diferentes alternativas para el sistema de iluminación y para el sistema móvil.

2.3.1 Sistema de Iluminación

En el mercado existen 3 opciones más comunes al momento de elegir un dispositivo de iluminación; como pueden ser lámparas incandescentes, tiras leds y lámparas leds. Para implementar el dispositivo más óptimo en nuestro estudio, nos basamos en información proporcionada por cada dispositivo.

2.3.1.1 Bombillas incandescentes

Caracterizada con contener dentro de la bombilla un filamento de tungsteno que es alimentado por un conductor eléctrico que lo prende al rojo blanco. Las incandescentes ofrecen una baja vida útil, alrededor de 100 horas, consumen una potencia entre 25-200 vatios, pero por su contraparte; tiene una baja eficiencia, ya que generan 7.5-11 lúmenes por vatio. Esta última unidad, es la medida de cantidad total de luz visible de una fuente de luz. (Torre, 2014)

2.3.1.2 Tiras Leds

Las tiras leds están compuestas por dispositivos de iluminación preensamblado en una tira adhesiva, la iluminación consta de leds, que componen un encapsulamiento en una resina semirígida sobre un circuito impreso flexible. Una tira leds/metro de 30 (Serie 3528) consume 2,4 vatios con un flujo lumínico de 90-150 lm/metro; por otra parte, un leds/metro de 60 (Serie 5050) consume 14.4 vatios produciendo un flujo lumínico de entre 600 a 900 lm/metro. Otra de las características que nos puede brindar las tiras leds son las variantes de color, que las tiras se podrían adaptar al blanco cálido, rojo, azul y amarillo. Por último, tiras leds poseen una fácil adaptación sobre cualquier superficie y una gran vida útil estimada de 50000 horas. (Torre, 2014)

2.3.1.3 Bombillas Leds

El led consiste en un diodo emisor de luz, consiste en un material semiconductor que emite luz al ser excitado por una corriente. Es considerado la fuente de luz ideal ya que la relación consumo, durabilidad y potencia son muy altas, por ejemplo una bombilla marca Phillip de 13 vatios posee un emisión de luz de 1055 lúmenes con una vida útil específica de 20000 horas. Otras de las ventajas de las luces leds, es la regulabilidad de su intensidad lumínica y sus colores, lo que brinda un mayor catálogo al consumidor. Por otra parte, el costo de las bombillas leds son más altas que las tiras y las bombillas incandescentes. (Torre, 2014)

2.3.2 Sistema de movilidad

2.3.2.1 Movimiento de columna de Luz

Para generar mejores condiciones al sistema de microalga se diseña un sistema en el cual las columnas de luz, este término hace referencia a una estructura vertical ensamblado con una fuente de luz, se puedan desplazar linealmente (figura 2.6), de tal forma que se pueda acercar o alejar la luz. Para elegir el sistema mas apto elegimos 3 diferentes sistemas que se pueden acoplar al sistema de fotobioreactor.

2.3.2.2 Movimiento Riel

El diseño del sistema móvil de riel está compuesto por dos partes. Primero, una corredera, que consiste en una guía de metal, más común de aluminio, de sección rectangular hueca, esta brinda el largo del recorrido; y como segundo punto un carro de cuatro ruedas que se inserta en el interior de la sección rectangular y genera el movimiento lineal. Este sistema de riel tiene muchos beneficios ya que brinda una excelente presión en el movimiento, puesto que el propio usuario puede elegir el recorrido, y, por último, es muy económico, de fácil instalación y mantenimiento.

2.3.2.3 Movimiento Hidráulico

El movimiento hidráulico consiste en aumentar la presión de un fluido, usualmente aceite, para generar un diferencial de presión y de esta forma generar una transmisión de energía lo suficiente para lograr un movimiento lineal. En el mercado se lo conoce comumente como cilindro hidráulico, estan diferenciados por su capacidad de fuerza máxima permisible. Este tipo de movimiento está mas enfocado para el movimiento de grandes pesos, pierde mucha precisión al momento de especificar una distancia al mecanismo.

2.3.2.4 Movimiento por ruedas

El movimiento mediante ruedas consiste en instalar a las columnas de luz ruedas en la estructura, en la parte inferior; generando 4 estructuras

isleñas de luz sobre el fotobiorreactor. Las ventajas del diseño son que brinda una mayor precisión sobre el ángulo de incidencia de luz, no brinda limitaciones sobre el alejamiento o acercamiento sobre cualquiera de las caras del fotobiorreactor; además que el costo del producto y mantenimiento es económico. Por otra parte, para instalar un pilar de luz con rueda es necesario un estructura que soporte los movimiento causador por el viento, irregularidades del suelo o la propia maniobralidad del usuario.

2.4 Criterios de selección

A continuación se describe los criterios para el diseño del sistema lumínico y móvil del fotobiorreactor (tabla 2.2).

Tabla 2.2 Criterios de selección

Criterios de Selección	Detalles
Instalación	Facilidad de instalación de los componentes
Eficiencia Lumínica	Relacion entre la potencia y el flujo de energía eléctrica consumida
Costo	Debe ser el menos costoso a comparación de las otras alternativas
Vida útil	Que se pueda usar el sistema en el mayor periodo de tiempo posible
Operatividad	Versátil a la hora del funcionamiento y
Precisión	Exactitud del desplazamiento del sistema lumínico
Estabilidad	Mayor capacidad de soporte

2.5 Comparación por pares

Con la finalidad de determinar el grado de importancia de los criterios descritos anteriormente (tabla 2.2), se dispuso a ponderar con una escala de valores entre cero, uno y dos para establecer cuál de los criterios tienen mayor o menor incidencia en el proyecto (tabla 2.3 y 2.4).

Sistema de Iluminación

Tabla 2.3 Comparación por pares para el sistema de iluminación

Criterios de selección	Instalación	Eficiencia Lumínica	Costo	Vida útil	Operatividad	Calificación	Peso
Instalación	-----	0	2	0	1	3	0.14
Eficiencia Lumínica	0	-----	2	2	1	5	0.22
Costo	2	1	-----	2	2	7	0.32
Vida útil	1	1	2	-----	0	4	0.18
Operatividad	1	0	2	0	-----	3	0.14
Total						22	1

Sistema Móvil

Tabla 2.4 Comparación por pares de Sistema Móvil

Criterios de selección	Costo y mantenimiento	Precisión	Estabilidad	Instalación	Calificación	Peso
Costo y mantenimiento	-----	2	2	2	6	0.32
Precisión	1	-----	2	2	5	0.26
Estabilidad	1	2	-----	1	4	0.21
Instalación	1	2	1	-----	4	0.21
Total					19	1

2.6 Matriz de Decisión

Como se puede apreciar en las tablas 2.6 y 2.8 se establecieron ponderaciones con diferentes calificaciones para obtener la mejor alternativa y apropiada para el diseño del sistema lumínico y móvil del fotobiorreactor.

2.6.1 Matriz de decisión del sistema lumínico

Tabla 2.5 Rango y criterio 1

Rango	1 – 3
Criterio	1: Menos importante 2: Medianamente importante 3: Más importante

Tabla 2.6 Matriz de decisión 1

Criterios y Ponderaciones		Instalación 14%	Eficiencia Lumínica 22%	Costo 32%	Vida Útil 18%	Operatividad 14%	Total 100%
Lámparas Incandescentes	Ponderación	1	1	3	2	1	1.82
	Resultado	0.14	0.22	0.96	0.36	0.14	
Tiras Leds	Ponderación	1	3	2	2	3	2.22
	Resultado	0.14	0.66	0.64	0.36	0.42	
Lámparas Leds	Ponderación	2	3	3	2	3	2.68
	Resultado	0.28	0.66	0.96	0.36	0.42	

2.6.2 Matriz de decisión del sistema Móvil

Tabla 2.7 Rango y criterio 2

Rango	1 – 3
Criterio	1: Menos importante 2: Medianamente importante 3: Más importante

Tabla 2.8 Matriz de decisión 2

Criterios y Ponderaciones		Costo y mantenimiento 32%	Precisión 26%	Estabilidad 21%	Instalación 21%	Total 100%
Movimiento Riel	Ponderación	2	3	3	2	2.47
	Resultado	0.64	0.78	0.63	0.42	
Movimiento Hidráulico	Ponderación	3	1	2	2	2.03
	Resultado	0.96	0.26	0.42	0.42	
Movimiento por ruedas	Ponderación	1	1	1	3	1.42
	Resultado	0.32	0.26	0.21	0.63	

Mediante las matrices de decisión se determinó que las mejores alternativas fueron las del sistema lumínico con lámparas leds y el sistema móvil con riel ya que obtuvieron las calificaciones más altas, es decir son las óptimas para el desarrollo de nuestro proyecto.

2.7 Dimensiones del soporte del fotobiorreactor y factor de seguridad

2.7.1 Elección del soporte del fotobiorreactor.

El material con que se trabajará la estructura será el **ASTM A36**; conocido en la industria en la fabricación de edificios o puentes, un acero al carbono muy requerido en el mercado por lo que se puede encontrar en el medio una gama de medidas, además es económico y de excelentes propiedades mecánicas. Cabe recalcar que el acero no estará en permanente contacto con la sustancia acuosa, por lo tanto, no es necesario que tenga propiedades anticorrosivas.

2.7.2 Peso del fluido

Para considerar el peso que soportará el fotobiorreactor, primero consideramos el peso del fluido. Por lo tanto:

El volumen del líquido que contendrá el fotobiorreactor (ecuación 2.1):

$$V_{\text{líquido}} = 60 \text{ L} \quad (2.1)$$

Consideramos la densidad del líquido del fotobiorreactor parecida al agua, debido a que la densidad de la microalga *Chlorella vulgaris* (2×10^6 células mL^{-1}) es insignificante en comparación con el agua, por ende, no se tomará en cuenta (ecuación 2.2):

$$M_l = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,060 \text{ m}^3 = 60 \text{ kg} \quad (2.2)$$

2.7.3 Peso del fotobiorreactor

Para calcular el peso propio del fotobiorreactor, consideramos vidrio de borosilicato conocido también como Pyrex, componente común en la fabricación de fotobiorreactores. El cual su densidad es de 2.23 g/cm^3 . Conociendo las dimensiones del fotobiorreactor cilíndrico con espesor cerrado:

$$V_{fb} = \pi * h * (R^2 - r^2) \quad (2.3)$$

$$V_{fb} = \pi * 1.5 * ((0.250)^2 - (0.240)^2)$$

$$V_{fb} = 0.023090 \text{ m}^3$$

$$m_{fb} = \rho_{fb} * V_{fb} = 2230 * 0.023090 = 51.4907 \text{ kg} \approx 51.5 \text{ kg} \quad (2.4)$$

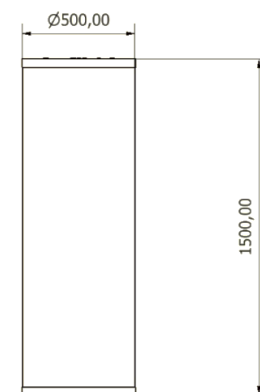


Figura 2.2 Dimensiones del tubo

2.7.4 Peso de la estructura de iluminación

El sistema de iluminación consistirá en 6 lámparas leds adjuntado cada uno a su propia regleta, apoyados todos sobre una misma base, que conformará un panel de plástico rectangular, que será el encargado de desplazarse. Además, este panel de luz estará apoyado sobre una estructura metálica, que brindará el movimiento y estará adjunta a la estructura metálica de soporte del fotobiorreactor. Según el catálogo de lámparas Led (anexos), el peso de aproximadamente una lampara Led de 1,5 metro es de 0.36 kg, su correspondiente regleta de 0.5 kg. Le agregamos el soporte plástico rectangular que soportará los Leds. Se tiene un peso total:

$$m_e = 6 * (0.36 + 0.6) + 2 * (7) = 19.76kg \approx 20 kg \quad (2.5)$$

La estructura metálica del sistema de iluminación estará diseñada para soportar aproximadamente 20 kg

2.7.5 Peso total

Considerando un margen aproximadamente de 10 kg más debido a los accesorios que llevara el fotobiorreactor, como puede llegar a ser las tapas, alambrado, mangueras, tuberías, difusor, medidores de temperatura y pH, podemos considerar un peso total de:

$$m_t = m_{fb} + m_a + m_l + m_e = 51.5 + 10 + 20 + 60 = 136.5 kg \quad (2.6)$$

El peso debido a las microalgas es sumamente pequeño por lo que no se considerará.

2.7.6 Esfuerzo máximo permisible en diseño en un módulo de fotobiorreactor

Considerando un tubo de sección rectangular:

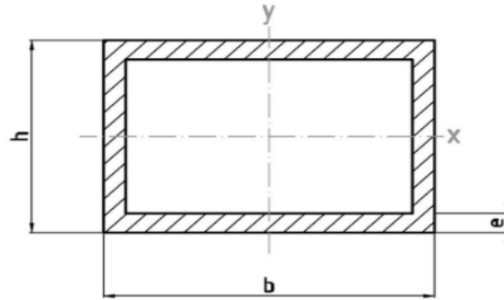


Figura 2.3 Sección transversal del tubo rectangular (POPOV, 2000)

$$h = 25 \text{ mm}$$

$$b = 25 \text{ mm}$$

$$e = 2 \text{ mm}$$

$$S_x = 1.18 \text{ cm}^3$$

El máximo esfuerzo permisible será el esfuerzo de tensión ubicado en el centro de la barra generado por el peso del fotobiorreactor, la mezcla y los accesorios, tomando en cuenta 2 soportes fijos en los extremos, considerando el peso del fotobiorreactor como una fuerza puntual:

$$\sigma_{max} = \frac{(m_f + m_a + m_e) * g * d}{S_x} \quad (2.7)$$

$$\sigma_{max} = \frac{(51.5 + 10 + 60) \text{ kg} * 9.8 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 0.25 \text{ m}}{1.037 * 10^{-6} \text{ m}^3}$$

$$\sigma_{max} = 237368.97 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Debido a que la distribución de peso del fotobiorreactor será distribuida en 4 barras **Figura 2.3**, considerando el peso del fotobiorreactor como una fuerza puntual, repartimos el esfuerzo anterior para las 4 barras:

$$\sigma_{max} = \frac{237368974.75 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}{4} = 59.34 \text{ MPa}$$

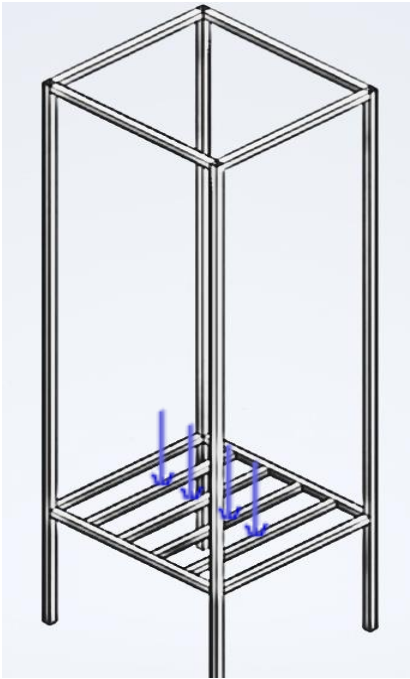


Figura 2.4 CAD del soporte del fotobiorreactor de un módulo

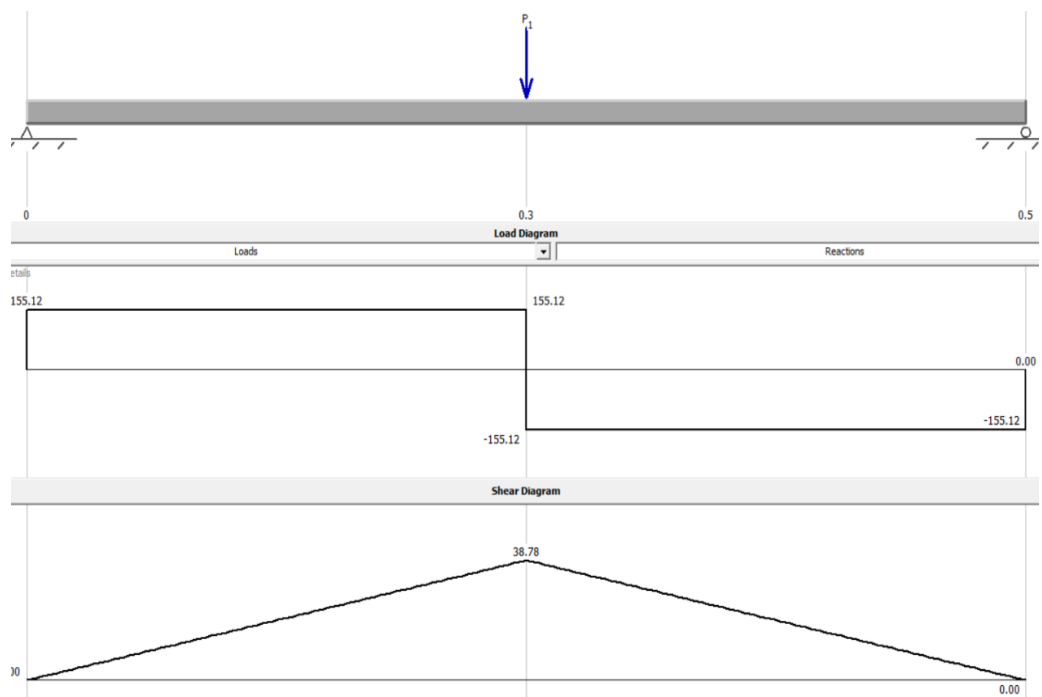


Figura 2.5 D.C.L y diagrama de fuerza cortante analizada

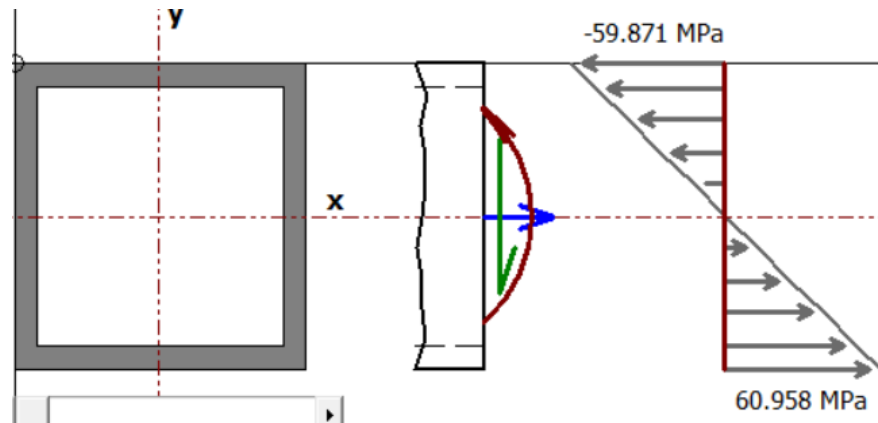


Figura 2.6 Diagrama de deflexión de la viga (FERDINAND BEER, 2010)

En la figura 2.4 se describe el diagrama de fuerzas que actúan sobre una viga, así como las fuerzas cortantes existentes en las mismas. En la figura 2.5 se muestra cómo se comporta la viga cuando se deforma sobre su eje neutro denotando que una parte está en compresión mientras la otra en tensión, debido a fuerzas transversales que actúan sobre la barra.

2.7.7 Factor de seguridad

El material escogido tiene un $\sigma_{adm} = 250 \text{ MPa}$ (anexos). Por lo tanto, el factor de seguridad (ecuación 2.8):

$$n = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_{max}} = \frac{250}{59.34} = 4.21 \quad (2.8)$$

Por lo tanto, nuestro diseño tendrá las dimensiones inicialmente planteadas, y el material escogido ya que brinda total seguridad.

2.7.8 Análisis para los 3 módulos de estructura

Cabe agregar que se utilizará el mismo análisis previo para los 2 módulos restantes, ya que los 3 módulos presentarán el mismo diseño. Los resultados de esfuerzos y factor de seguridad son idénticos entregados en módulo analizado anteriormente; por lo tanto, se brinda la misma seguridad en nuestro factor de seguridad de diseño.

2.8 Sistema de Conexión

En el diseño del fotobiorreactor es necesario instalar un sistema de iluminación en el cual sea regulable, para esto se implementará un sistema de 3 tubos leds conectados en paralelo en un mismo panel de luz.

A continuación, se muestra la conexión que tendrá cada pilar de luz (ilustración 4):

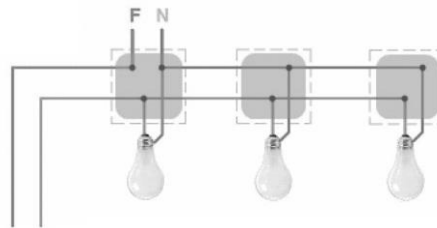


Figura 2.7 Diagrama de conexión del pilar de luz

Las lámparas para utilizar en el sistema de iluminación consistirán en 6 tubos Leds de 1500 mm operan con 120 voltios y 9 vatios:

$$P = VI \quad (2.9)$$
$$I = \frac{P}{V} = \frac{9}{120} = 0,075 A$$

Para 6 Leds:

$$A_t = 0,075 * 6 = 0,45 A$$

Para el diseño del circuito eléctrico, se usará cableado de calibre 12, usado convencionalmente de las instalaciones domésticas. El cual tiene un voltaje y amperaje de servicio de hasta 600 V y 30 A. Además, cada uno de los respectivos focos tendrán su bornera.

2.9 Selección del Riel

El diseño del sistema móvil consistirá en riel, este está compuesto por dos partes. Primero, una corredera, que consiste en una guía de aluminio de sección rectangular hueca, esta brinda el largo del recorrido; y como segundo punto un carro de cuatro ruedas que se inserta en el interior de la sección rectangular y genera el movimiento lineal. Además, este último está adaptado

a una base en la cual se adjuntará el pilar de luz. Lo podemos observar en la Figura obtenida en catálogo la tienda Boyacá.



Figura 2.8 Diagrama de conexión del pilar de luz *Sistema Lumínico* [Almacenes boyacá]

Una vez adaptado el sistema de iluminación con el de corredera:

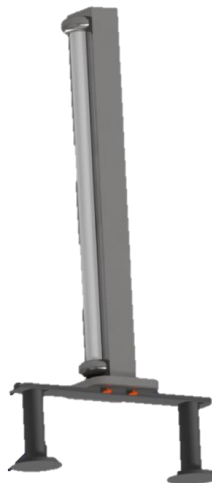


Figura 2.9 Sistema Móvil graficado en CAD

2.10 Sistema de Aireación

Mencionamos antes la importancia de la aireación en el sistema del fotobioreactor, ya que el movimiento generado por el flujo de aire logra la oxigenación de las microalgas, además genera una mejor distribución de la luz y los nutrientes.

La columna de burbujeo consiste en un flujo ascendente de una corriente de burbujas contenientes de aire, este método se caracteriza en débiles fuerzas de cizallamiento sobre la mezcla muy apto para organismos con tejidos celular muy débiles. Una correcta configuración de flujo de aire logra una buena transferencia de masa, una excelente circulación y despojando de gases

residuales. Al contrario de la agitación por hélices, que involucra ejes y motores eléctricos, un tema mas complejo en el tema de diseñar sobre el fotobioreactor, en este caso una bomba de aire seria necesaria, mucho mas economico y facil mantenimiento. (Angel, 2013)

El sistema de aireación elegido para el fotobioreactor será de tipo columna de burbuja. Este sistema consiste en instalar en la parte inferior una manguera que expulsan CO₂ por medio de una bomba de aire, con el fin de generar burbujas a lo largo de toda la verticalidad del sistema. Es importante un sistema de aireación porque distribuir el cultivo alrededor del biorreactor, con las mismas condiciones de luz, nutrientes y temperatura.

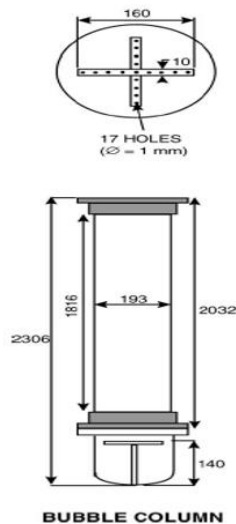


Figura 2.10 Sistema de Aireación Burbuja (Sánchez Saavedra & Voltolina, 1996)

2.10.1 Diseño Columna de burbujeo

Para la elección de la potencia que se debe utilizar en el sistema:

$$\frac{P_G}{V_L} = g\rho_l U_G \quad (2.10)$$

Donde $\frac{P_G}{V_L}$ es la potencia de necesaria para la aeración por unidad de volumen, g es la gravedad, ρ_l es la densidad de la mezcla del líquido, U_G es la velocidad superficial del gas en el tubo cilíndrico. (Chisti, 1989; Chisti and Moo-Young, 1987, 1989).

Estudios anteriores resaltan que se ha tenido éxito en el crecimiento de microalgas en un rango de velocidad superficial del gas (U_G) 0.0007-0.025 m s⁻¹. Donde se marca un límite de 0.034 m s⁻¹ como perjudicial para el crecimiento celular del cultivo *Chlorella* sp. (J.C. Robles Heredia¹, 2016) Además según otro estudio (Díaz Aquino Raúl Bernardo, 2021), indica que volumen de aire por volumen líquido (vvm) muestra un óptimo crecimiento para este mismo cultivo en un rango de 0.5-2.5 vvm, si seleccionamos:

$$vvm = \frac{Q_{aire}}{V_f} = \frac{v_s * A}{V_f} \quad (2.11)$$

Donde Q_{aire} , representa el flujo de aire que estamos buscando, V_f el volumen del fotobiorreactor en operación, A el área de la sección transversal del fotobiorreactor y v_s la velocidad superficial del aire:

$$v_s = \frac{vvm * V_f}{A} \quad (2.12)$$

$$v_s = \frac{vvm * V_f}{A} - \frac{vvm * V_f}{A} \quad (2.13)$$

$$v_s = \frac{0.5 * 0.06 \text{ m}^3}{\frac{\pi * (0.5 \text{ m})^2}{4}} - \frac{2.5 * 0.06 \text{ m}^3}{\frac{\pi * (0.5 \text{ m})^2}{4}}$$

$$v_s = 0.1538 \frac{\text{m}}{\text{min}} - 0.7639 \frac{\text{m}}{\text{min}} = (0.00256 - 0.01273) \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Por lo tanto, ambos estudios concuerdan el rango de velocidad del aire.

Para calcular el rango óptimo de caudal, se procede con el mismo análisis:

$$Q_{aire} = vvm * V_f \quad (2.14)$$

$$Q_{aire} = (0.5 * 0.06 \text{ m}^3 - 2.5 * 0.06 \text{ m}^3)$$

$$Q_{aire} = (0.03 \frac{\text{m}^3}{\text{min}} - 0.15 \frac{\text{m}^3}{\text{min}})$$

$$Q_{aire} = (30 \frac{\text{l}}{\text{min}} - 150 \frac{\text{l}}{\text{min}})$$

Por ende, la selección de bomba de aire tendrá este rango de operación en caudal.

2.10.2 Caída de presión entre salida del aire (compresor)- entrada del difusor

Para determinar el la diferencia de presión entre el compresor y el difusor usaremos la ecuación de Bernoulli. Hay que tomar en cuenta que el recorrido del aire es muy corto, y la altura a transportarse también. Consideramos también la velocidad de entrada es la misma hasta el punto de llegada al difusor ya que no existe ninguna variación de los diámetros de las tuberías, por lo tanto la ecuación de Bernoulli queda de la siguiente manera:

$$P_1 = P_1 + h_L \quad (2.15)$$

$$\Delta P = h_L$$

Donde h_L viene caracterizada por las pérdidas y se expresa por la siguiente expresión:

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g} + f_T \frac{L_e}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (2.16)$$

Para determinar la velocidad del fluido consideramos un caudal del 80l/min, además, considerando un área de tubería de 2 pulgadas:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{0.00133333 \frac{m^3}{s}}{\pi \left(\frac{0.00064516}{4} \right) m^2} = 2.631 \frac{m}{s} \quad (2.17)$$

Para determinar los coeficientes f y f_T , debemos conocer el Número de Reynolds respectivo:

$$N_R = \frac{vD\rho}{\mu} \quad (2.18)$$

D : diámetro de la tubería (m)

ρ : densidad del fluido (kg/m^3)

v : velocidad del fluido (m/s)

μ : viscosidad del fluido ($\frac{kg}{ms}$)

La densidad del aire se lo puede determinar considerando el aire como un gas real a una temperatura de 28 grados centígrados. Como condición del análisis se establece lo siguiente: Presión(172369 Pa), temperatura T(303.15 K), peso molecular del aire PM(28.8 g/mol) y constate de los gases (R=8.314 pa m³/k mol) Apéndice B:

$$\rho = \frac{P}{Z * R * T} * PM \quad (2.19)$$

$$\rho = \frac{172369 \text{ Pa}}{(1) * 8.314 \text{ Pa} \frac{\text{Pa} * \text{m}^3}{\text{k} * \text{mol}} * 303.15 \text{ K}} * 28.8 \frac{\text{g}}{\text{mol}}$$

$$\rho = 1.9745 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Una vez calculada la densidad del aire y la viscosidad dinámica usando la Ecuación 2.18 descrita anteriormente ($\mu = 1.86 \times 10^{-5} \frac{\text{N}}{\text{s} * \text{m}^2}$):

$$N_R = \frac{(2.631 \frac{\text{m}}{\text{s}})(0.00254 \text{ m})(1.9745 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3})}{1.86 \times 10^{-5} \frac{\text{N}}{\text{s} * \text{m}^2}} = 709.41$$

La rugosidad de la manguera de tubo de plástico de pvc $\varepsilon = 0.0015 \text{ mm}$:

$$\frac{\varepsilon}{D} = \frac{1.5 \times 10^{-6} \text{ m}}{0.00254} = 0.0007648 \quad (2.20)$$

Haciendo uso del Diagrama de Moody, el factor de fricción y mediante el diagrama en la línea turbulencia :

$$f = 0.4479$$

$$f_T = 0.0161$$

Por último, Le/D depende del tipo de accesorios que se va a utilizar durante la conexión, conociendo que se utilizará una válvula check ($Le/D=100$) y un codo de 90° ($Le/D=41$). Se tiene la diferencia de presión, la cual representa la pérdida de presión entre la entrada de la bomba del aire y el difusor:

$$\Delta P = (0.4479) * \frac{1.0 \text{ m}}{(0.00254 \text{ m})} * \frac{(2.631 \text{ m/s})^2}{2 * (9.81 \text{ m/s}^2)} + (0.0161) * (100 + 41)$$

$$* \frac{(2.631 \text{ m/s})^2}{2 * (9.81 \text{ m/s}^2)}$$

$$\Delta P = 0.6571 \text{ kPa}$$

2.10.3 Difusor de aire

El difusor de aire permite la distribución de mezclado del centro hacia la paredes de cristal del fotobiorreactor, creando un flujo cíclico. Un difusor de

aire consiste en una única entrada y diferentes salidas en manera de orificios pequeños que interactuaran con el sistema a mezclar. Para determinar un dimensionamiento de los orificios determinaremos un valor del caudal 80 l/min, de entrada de la bomba y la velocidad de ascenso U_g de 0.005 m/s. Por lo tanto:

$$Q_{aire} = n * A_{orificios} * v_{salida} \quad (2.21)$$

$$d_{orificios} = \sqrt{\frac{4 * Q_{aire}}{\pi * n * v_{salida}}} \quad (2.22)$$

Donde:

$d_{orificios}$: diámetro de los orificios (m)

Q_{aire} : Caudal de entrada otorgado por bomba (m³/s)

n : número de orificios

v_{salida} : velocidad superficial del gas

Reemplazando los valores planteados, y para un número determinado de 40 orificios se calcula el diámetro del orificio:

$$d_{orificios} = \sqrt{\frac{4 * 0.0013 \frac{m^3}{s}}{\pi * 40 * 0.005 \frac{m}{s}}} = 0.00956 \text{ m} \approx 0.10 \text{ mm}$$

2.11 Cálculo de la Intensidad Lumínica

Conociendo la luminaria a utilizar (Leds), es importante mencionar la intensidad lumínica que requerirá el sistema. Según (Burgessa G, 2007) la cantidad mínima de exposición en luxes para que la chlorella vulgaris se encuentre en una condición óptima de crecimiento debe ser alrededor de 7400. Cabe agregar que este valor de exposición puede alternarse según las características y el medio en un fotobiorreactor, ya que la microalga puede aun con valores alrededor de 2000 o 3000 luxes puede llegar a reproducirse pero la cantidad de biomasa será menor.

Se contará con 6 luces leds, distribuidos 3 en la parte frontal y 3 en la parte posterior del sistema de fotobiorreactor. Donde la distribución de las lámparas serán equidistantes entre si y cada una alineada perpendicularmente con la

mitad de cara frontal fotobiorreactores, de tal forma que cada lámpara apunte directamente a uno de estos sistemas. Por lo tanto, la Iluminancia, por medio de la Ley Inversa de los cuadrados se expresa por (ecuación 2.23):

$$E = \frac{I}{r^2} \quad (2.23)$$

Donde:

E: Iluminancia (Lux)

I: Intensidad Lumínica (cd)

r: distancia entre la fuente y el objeto (m)

Cabe agregar que la iluminancia se expresa sobre un punto perpendicular sobre la superficie y a una cierta distancia de la fuente. Además, que la iluminancia sobre el fotobiorreactor situado en medio será ligeramente mayor a los que se encuentran en los extremos ya que la intensidad lumínica es inversamente proporcional a la distancia, siendo los extremos mas distantes a las lámparas opuestas desde la fuente, por lo tanto se reducirá la cantidad de iluminancia en ellos. La iluminancia total sobre el fotobiorreactor intermedio considerando las 3 fuentes de luz:

En la ecuación 2.24 se expresa la intensidad de la luz con respecto a la distancia de las lámparas al fotobiorreactor.

$$E_m = \frac{I_1}{r^2} + 2 \frac{(I_2 \cos^3(\alpha_2))}{r^2} \quad (lux) \quad (2.24)$$

La iluminancia sobre los extremos:

$$E_m = \frac{I_1}{r^2} + \frac{(I_2 \cos^3(\alpha_2))}{r^2} + \frac{(I_3 \cos^3(\alpha_3))}{r^2} \quad (lux) \quad (2.25)$$

La intensidad lumínica expresada en candelas, sobre el ángulo de incidencia es dato proporcionado por el fabricante.

Reemplazando la ecuación para ciertas distancias entre la fuente y los fotobiorreactor, se obtiene las diferentes iluminancia:

Tabla 2.9 Luxes medidos a diferentes distancias para los FBR

Distancia entre la fuente y el fotobiorreactor (m)	Fotobiorreactor Medio (lux)	Fotobiorreactor Extremos (lux)
0.10	69749.99	63053.15
0.25	11389.45	11289.17
0.45	3464.50	3113.73
0.55	2687.08	2084.4

Con dichos valores, se grafica la curva de Iluminancia en función al desplazamiento de los rieles en metros (figura 2.10):

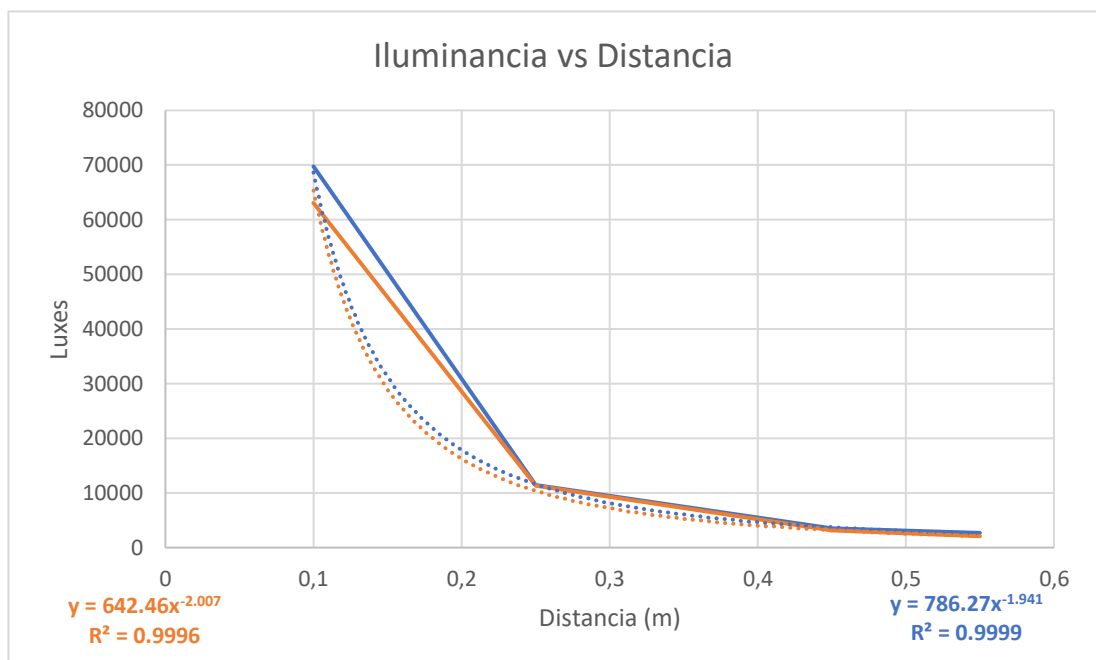


Figura 2.11 Iluminancia vs Distancia

2.12 Sistema de Entradas y Salidas (Tapas)

En un fotobiorreactor se debe brindar el ambiente óptimo para el crecimiento de la microalga, para aquello es importante llevar un control rutinario de pH, temperatura del medio, entrada de aire y salida de dióxido de carbono, evacuación de biomasa y entrada de nutrientes. Van a ser necesarios 6 orificios, distribuidos en entre la tapa superior e inferior. A lo que respecta a las dimensiones de cada uno, las cavidades para las dimensiones tanto de pH como temperatura serán más pequeñas, en comparación a las cavidades de entrada y salidas de flujos másicos.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Estructura Metálica

Como primer resultado tenemos la estructura de soporte del fotobiorreactor, la cual ocupa un espacio total de 1,875 metros de largo, 0,575 metros de ancho y 1,895 metros de altura compuesto entre los 3 módulos. La sección transversal trabajada corresponde a tubo de sección cuadra de 25 milímetros y 2 milímetros de espesor. Toda la fabricación de la estructura generó una longitud de tubos cuadrados de aproximadamente 44 metros de acero ASTM A36, con un peso total de 6314 kilogramos donde se puede apreciar mejor en la Figura 3.1 y Figura 3.2. Para una vista mas detallada los planos de la estructura se encuentran en el Apéndice A.

Cada módulo de la estructura de acero tiene un esfuerzo máximo a la flexión de 52.83, 52.79, 58.95 y 58.96 Mpa en los puntos mostrados en la *Figura 3.3*; los puntos de mayor esfuerzos se encuentran en las dos barras del centro, mientras que la de los extremos los un menor esfuerzo. El diseño se basa en el punto mas crítico, barra del centro (58.96 Mpa), brindando un factor de seguridad de la estructura con un valor de 4.24. Por lo tanto, la estructura podría soporta un peso máximo de tres fotobiorreactores más, un total aproximado de 365 kilogramos. Todos estos datos de los esfuerzos calculados fueron implementados con herramienta de diseño Inventor.

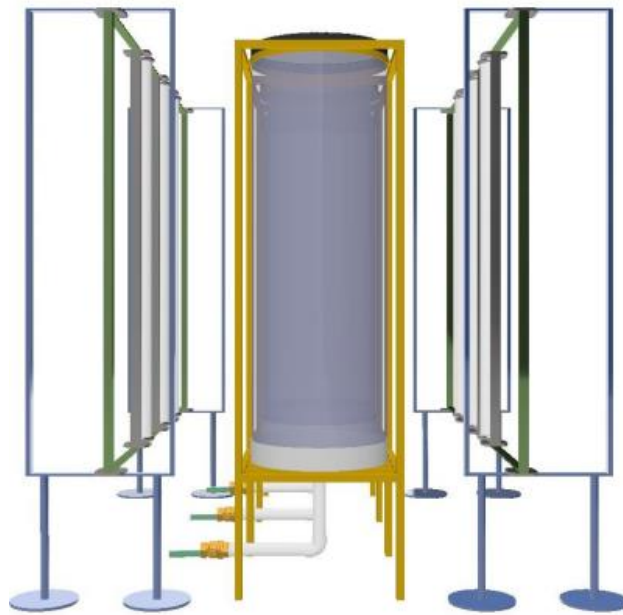


Figura 3.1 Vista lateral del sistema del Fotobiorreactor

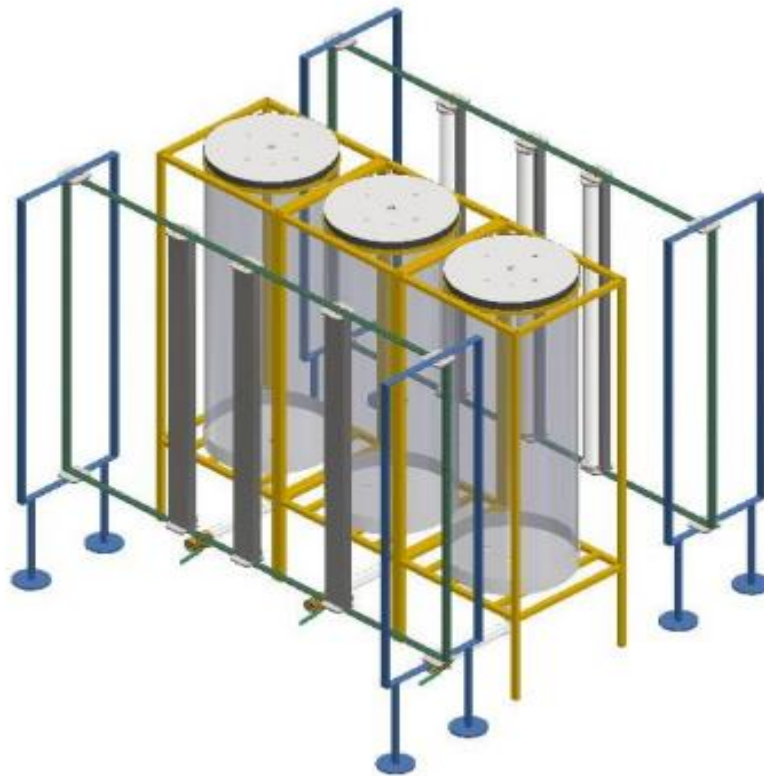


Figura 3.2 Vista Isométrica del Sistema del Fotobiorreactor



Figura 3.3 Máximos esfuerzos en las vigas del soporte

3.2 Sistema de Aireación

El sistema de aireación principalmente estará compuesto por 3 compresores de aire con caudal máximo de operación de 120L/min por cada uno. Los compresor se repartirán cada uno con un fotobiorreactor de tal manera poder cubrir el rango de operación de 30-150 L/min propuesto. Además, cada uno de los compresores contendrá un difusor en configuración tipo cruz con 20 orificios de 10 mm de diámetro. Cabe agregar que cada sistema adicionalmente tendrá un filtro de algodón, una válvula check, un codo de 90º y una tubería de aproximadamente 1 metro. La Figura 3.4 muestra el diagrama de conexión de cada elemento en sistema de aireación:

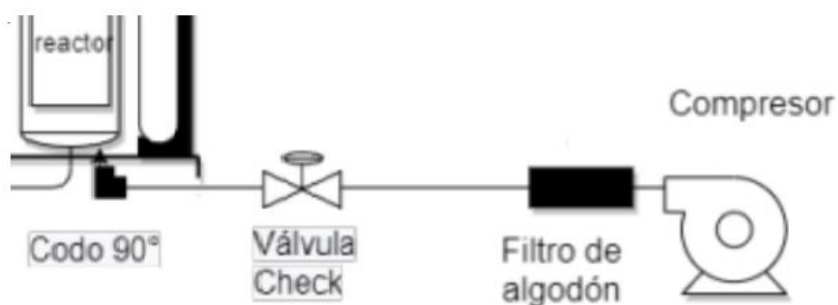


Figura 3.4 Diagrama de conexión (Díaz Aquino Raúl Bernardo, 2021)

3.3 Sistema de control en tapas

El fotobiorreactor contendrá dos tapas serán elaboradas con el polímero ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), material muy comercial en las impresiones en 3D. La tapa superior tendrá 4 orificios, en los cuales 2 de ellos representaran los medidores tanto de pH como de temperatura, mientras que los dos orificios restantes involucra mangueras encargadas en la salida de dióxido de carbono y entrada de nutrientes tal y como se muestra en la Figura 3.5, la cual muestra la disposición de los cuatro los orificios cuyos diámetros son de dos pulgadas y de una pulgada. Por otra parte, en la Figura 3.6 se muestra la tapa inferior con dos orificios, diámetro de dos pulgadas, los cuales están diseñadas para la conexión de dos tuberías por cada una. Un orificio representa la entrada de aire que proviene de la bomba y la restante una cavidad para la tubería de biomasa presentada a lo largo del crecimiento.

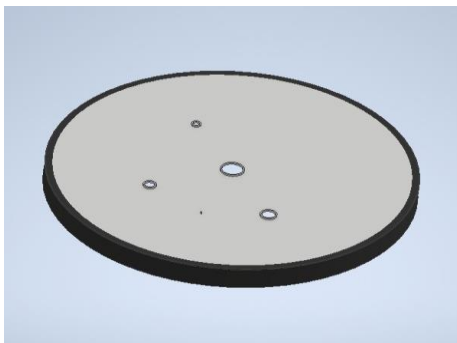


Figura 3.6 Tapa Superior

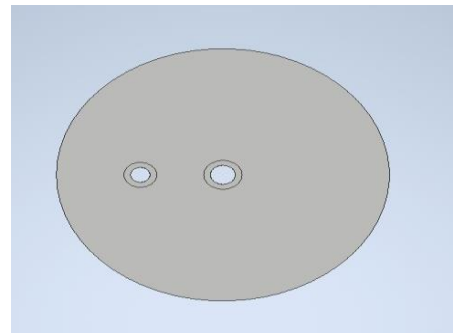


Figura 3.5 Tapa inferior

3.4 Sistema Lumínico Móvil

El sistema de luz contiene 6 lámparas Leds una longitud de 1500 milímetros, repartidos 3 en la parte frontal y 3 en la posterior, cada una de las lámparas tiene una apertura de haz de luz de 140 grados. La distribución del trío lámparas Leds se encuentran en un marco de plástico, mismo material de la tapas, capaz de soportar sus cargas, a esta combinación de lámparas con estructura lo denominamos panel de luz. El sistema de riel permite un rango de operación en movilidad lineal del panel de luz entre 0,5-5,5 metros hacia el sistema de fotobiorreactor. También, se brinda la posibilidad de movilidad de las lámparas Leds a lo largo del eje del panel de luz. A continuación, en la Figura 3.7, se

detalla el panel de luz con su estructura, las lámparas leds y el sistema móvil de riel:



Figura 3.7 Panel de luz con el sistema de riel

La combinación de las 3 lámparas Leds más óptima de intensidad lumínica para los 3 fotobiorreactores es equidistante entre cada uno y repartidas frontalmente a la superficie de cada fotobiorreactor, de tal forma lograr perpendicularidad de cada lámpara con sistema. Cabe recordar que dichos fotobiorreactores de los extremos tienen una menor iluminación que la que se encuentra en medio, debido a que la intensidad lumínica entre más lejos se encuentra del punto a enfocar es menor. Por lo tanto en la Figura 3.8 muestra 2 curvas de iluminancia tanto para el fotobiorreactor de medio(naranja) y fotobiorreactores de los extremos(azul), que muestra una ligera desfase entre ambas. La gráfica muestra la iluminancia en cada posible punto de corrido por los paneles de luz.

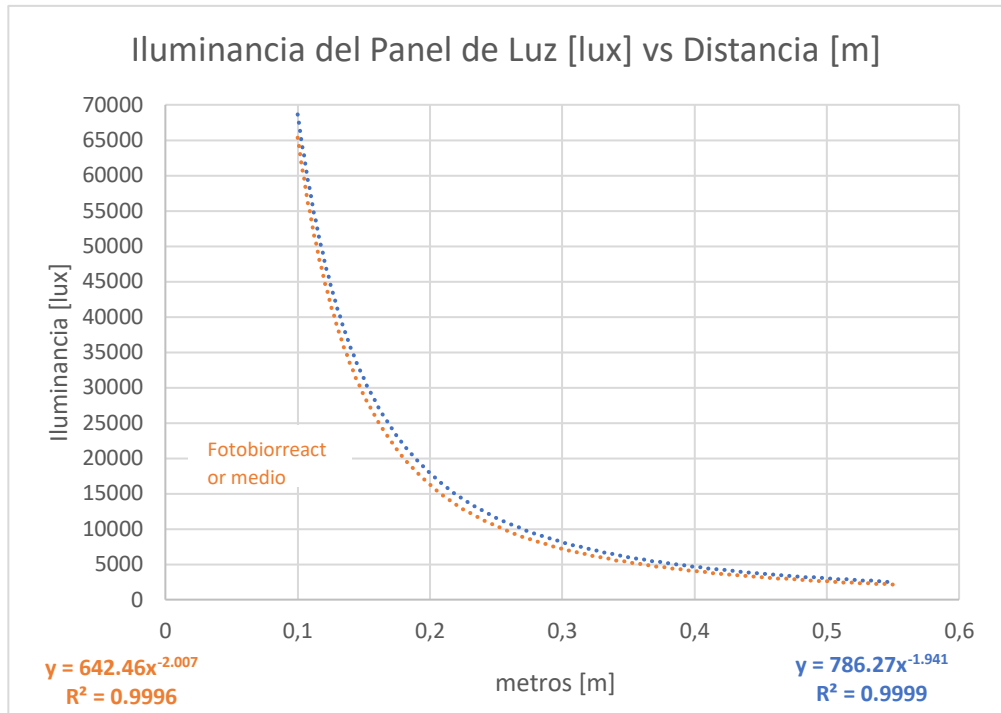


Figura 3.8. Panel de luz con el sistema de riel

3.5 Tabla de costos de materiales

En este segmento se detalla los precios de cada elemento para la elaboración del fotobiorreactor, tomando los precios a nivel nacional. Cada precio de cada elemento esta mostrado en el apéndice B. En la tabla 3.1 se detalla la lista de componentes con su precio:

Tabla 3.1 Costo del proyecto

	Cantidad(U)	Precio (\$)	Total(\$)
Compresor de aire	3	396	1188
Filtro Algodón	1	2	2
Válvula Check	3	5	15
Codo 90°	3	0.75	2.25
Lamparas LEDs	6	93.17	559.02
Cableado calibre 12	25 metros	0.35/metro	8.25
Sistema corredera (Riel)	4	31.1	124.4
Viga Acero ASTM A36	49.28 kg	2.04/kg	100.5
Filamento de ABS	25.5 kg	17.5/kg	446.25
Total			\$2445.67

El sistema fotobiorreactor móvil desarrollado tiene fines investigativos por lo cual existen 3 módulos juntos, pero independientes, con la finalidad de variar las condiciones de entrada y salida del tanque como por ejemplo el control lumínico, estudiar el cultivo de las microalgas variando los luxes que reciben con la ayuda del sistema de aireación por burbujeo que permite que las microalgas se mantengan en constante movimiento dentro del tanque y los rayos de luz sean recibidos uniformemente. Donde dado al tamaño de los tanques tiene alcance semi-industrial para su uso y la larga se lo podría adaptar para uso industrial con pequeñas modificaciones y obtener suficiente producto final cultivado que en este caso es la biomasa con múltiples usos aplicativos como en la producción de energías renovables.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Se puede concluir que el tipo de microalga no influye en el diseño del sistema, es decir que solo cambian los parámetros de utilización del equipo mas no en sus dimensiones, tipo de soporte, materiales. dado que su densidad y cantidad es mucho menor a la cantidad y densidad del agua en la que se desarrollan.
- El sistema móvil del fotobiorreactor permite las lámparas moverse lateralmente, así como acercarse y alejarse de los tanques 40 cm para diferentes estudios dado que esto influye mucho en el crecimiento de la microalga, es importante mencionar que el sistema de iluminación se encuentra separado de la estructura que soporta los tanques unos 20 cm dado que los luxes que emiten las lámparas a una distancia muy corta, daña el cultivo.
- Se tomó un sistema de riel para el desplazamiento del sistema lumínico dado que el movimiento de las luces se las realiza una vez al día, y al diseñarlas con un sistema más complejo el costo del proyecto aumenta gradualmente debido a los precios de los materiales, instalación, energía, etc.
- Dado los resultados de los esfuerzos permitidos sobre los puntos más críticos de la estructura metálica se concluye la seguridad y la confiabilidad de construcción a partir de la norma de ecuatoriana de construcción estructuras de acero (NEC), basada en la norma ANSI, la cual indica un factor de seguridad mínimo de 1,67 para la carga en flexión.
- Es viable la elaboración del sistema semi-industrial de fotobiorreactor para la producción de biomasa ya que en nuestro mercado no se encuentra en comercio disponible alguno; tomando en referencia una industria internacional de manufactura acuícola, Dalian Huixin, el precio de un sistema análogo ronda los 3500 dólares, pero el costo de envío se eleva aproximadamente a 4000 dólares sin tomar en cuenta los impuestos respectivos comparado con nuestro proyecto que ronda los 2500 dólares.

- Obteniendo un rango de operación entre 2000 – 70000 luxes se concluye un rango viable tomando como referencia a otros estudios como (Bobadilla, 2019) logrando su punto óptimo de crecimiento de biomasa de 5100 luxes; también (Burgessa G, 2007) indica una capacidad lumínica de 7500 luxes para un desarrollo de dicha *Chlorella vulgaris*.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda realizar un estudio de las líneas de corrientes del flujo agua con diferentes configuraciones de difusores de tal manera de adquirir un mejor sistema de aireación.
- Se recomienda determinar mediante experimentación el punto de fotoinhibición del sistema, para poder restringir un máximo recorrido
- Se recomienda implementar un sistema de señalización en el recorrido de riel de los paneles de luz, de tal manera precisar la distancia entre el sistema de la luz y los fotobiorreactores.

BIBLIOGRAFÍA

- Abalde, J., Cid, A., Fidalgo, J., Torres, E., & Herrero, C. (s.f.). *Microalgas: cultivo y aplicaciones*. La Coruña: Universidade da Coruña. Obtenido de Universidad de Coruña:
https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/25013/Abalde_Julio_1995_Microalgas_cultivo_aplicaciones.pdf
- Angel, M. F. (2013). *Diseño, montaje y caracterización de fotobioreactores airlift para el cultivo de la microalga chlorella sorokinia*. Colombia.
- Benavente-Valdés, J. R., Montañez, J., Aguilar, C., Méndez-Zavala, A., & Valdivia, B. (2012). Tecnología de Cultivo de Microalgas en Fotobiorreactores. *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*, 1-12.
- Bobadilla, J. L. (2019). *Influencia de la intensidad de luz y ph en la remocion de materia organica, de efluentes de remojo de cutiembre, utilizando microalga chrorella vulgaris, a nivel de laboratorio*. Perú.
- Burgessa G, J. G.-V. (2007). *Materials, operational energy inputs, and energy ratio for photobiological hydrogen production*. *Internacional Journal of Hydrogen Energy*. Internacional of Hydrogen Energy.
- Casierra Posada, F. (2007). Fotoinhibición: Respuesta fisiológica de los vegetales al estrés por exceso de luz. *Revista Colombiana de ciencias hortícolas*.
- Colorado Gómez, M., Moreno Tirado, D., & Pérez Posada, J. (30 de Junio de 2013). Desarrollo, producción y beneficio ambiental de la producción de microalgas. La Guajira, Colombia. *Ambiente y Desarrollo*, 113-126.
- Díaz Aquino Raúl Bernardo, V. A. (2021). *Propuesta de diseño de biofiltro para la captación de Co2 atmosférico utilizando la mircroalga Chlorella vulagris*. El Salvador.
- FERDINAND BEER, R. J. (2010). *MECANICA DE MATERIALES*. MC GRAW HILL.
- Fernández Linares, L. C., Montiel Montoya, J., Millán Oropeza, A., & Badillo Corona, J. A. (Diciembre de 2012). *Producción de biocombustible a partir de microalgas*. Obtenido de Universidad Autónoma Indígena de México:
<http://uaim.edu.mx/webraximhai/Ej-25barticulosPDF/10%20FERNANDEZ-LINARES.pdf>

- García Romeral, J., Pavía Gómez, M., García Sanz, T., Chirivella Martorell, J., & Serrano Aroca, A. (2017). Principios de Biotecnología y Bioingeniería en el cultivo de microalgas: importancia, problemas tecnológicos, tipos y sistemas de cultivos, crecimiento, factores limitantes, selección, aislamiento, escalado y caracterización bioquímica. *Revista Iberoamericana Interdisciplinar de Métodos, Modelización y Simulación*.
- Garro, D. O. (2019). *Biotecnología- Principales tipos de biorreactores*. España.
- J.C. Robles Heredia¹, J. S. (2016). *Evaluación de crecimiento celular, remoción de nitrógeno y producción de lípidos por chlorella vulgaris a diferentes condiciones de aireación de dos tipos de fotobiorreactores anulares*. Mexico.
- López, F. A. (2010). *Diseño y Montaje de un Fotobiorreactor a Escala Laboratorio par ala Producción de Microalgas, Tesis Profesional, Facultad de Ingeniería Físicoquímicas, Universidad Industrial de Santander*. Bucaramanga, Colombia.
- Nuran, B. (2007). *The response surface methodology. Thesis master of science in applied mathematics & computer science*. Indiana University.
- POPOV, E. P. (2000). *MECANICA DE SOLIDOS*. PEARSON EDUCACION .
- Rendón Castrillón, L., Ramírez Carmona, M., & Vélez Salazar, Y. (2015). *Microalgas para la industria alimentaria*. Medellín: Universidad Pontificia Bolivariana.
- Rey de las Moras, M. C. (2008). Factores que influyen en el desarrollo: Fotoperiodo. *Revista Agropecuaria*.
- Sánchez Saavedra, M., & Voltolina, D. (1996). The effect of the different photon fluence rates of blue green light on the biomass quality of coastal diatom in pilot scale semicontinuous cultures. *Scientia Marina*.
- Torre, J. L. (2014). *Iluminación con Leds*. Zaragoza.
- Vonshak, A. &. (1988). *Photoinhibition as a limiting factor in outdoor cultivation of*. *Algal Biotechnology*.
- Yeh, N., & Chung, J. (2009). High-brightness LEDs—Energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.

APÉNDICES

APÉNDICE A

a. Compresor de aire



PRODUCTO: Compresor de Aire SPERAN 100 LT \$396.00 inc. iva.

ESPECIFICACIONES:

- Poder 1.5KW-2HP
- Tanque 100 LT-26.4 GAL
- Cilindro 51*2 MM/PIEZA
- Velocidad 1030 RPM
- Presión 8BAR-115 PSI
- Desplazamiento 120L/min - 4.2 CFM
- Dimensiones 1120*440*800 MM

b. Filtro Algodón



Nuevo | 26 vendidos

Perlon Algodon Filtrante Filtro Makipu Acuario Y Peces 50x50

U\$S 2

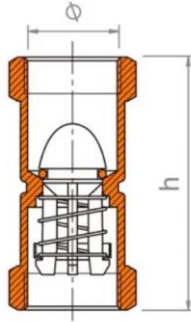
Pago a acordar con el vendedor
Acepta depósito bancario, efectivo, tarjeta de crédito.
[Más información](#)

Entrega a acordar con el vendedor
Quito, Pichincha (Quito)
[Ver costos de envío](#)

¡Última disponible!

[Comprar ahora](#)

c. Válvula Check



SH Standard Hidráulica

Nuevo | 7 vendidos

Válvula Retención - Check Y De Pie 3/4, 1 1/4, 1 1/2 Y 2 Pulgadas

U\$S 5

Pago a acordar con el vendedor [Más información](#)

Entrega a acordar con el vendedor Quito, Pichincha (Quito) [Ver costos de envío](#)

Cantidad: **1 unidad** (33 disponibles)

[Comprar ahora](#)

d. Codo 90°



CODO 90 PVC DESAGUE 50MM E/C TIGRE-VARIOS

\$0.73 Incluye IVA

SKU: 1423022

CODO 90 PVC DESAGUE 50MM E/C TIGRE-VARIOS

Hay existencias

- 1 + [Añadir Al Carrito](#)

COMPARTIR [f](#) [t](#) [p](#)

CATEGORÍA HIDROSANITARIA

e. Lámparas Master LEDtube PERF 1500mm C

MASTER LEDtube

Nueva generación de tubos de bajo consumo

El tubo MASTER LED de Philips integra una fuente luminosa LED en un fluorescente tradicional. Su exclusivo diseño plantea una apariencia visual perfectamente uniforme que no se distingue del tubo convencional. Este producto es la solución idónea para la renovación de lámparas en las aplicaciones de iluminación general.

Características de producto

- Sólo un 50% de consumo de energía en comparación con los tubos fluorescentes
- Excepcional vida útil de hasta 50.000 horas
- Intercambiable con las actuales lámparas T8 en instalaciones con balasto EM
- Sin mercurio
- Cebador de protección (EMP050) y tres fusibles de seguridad en el tubo

Ventajas

- Costes operativos reducidos
- Menos costes de mantenimiento
- Máxima seguridad de instalación y aplicación

GA300 / PERFORMANCE Altos requerimientos lumínicos

MASTER LEDtube GA300 / GA300 rotatorio

3000 K 4000 K 4500 K

EMP050 Cebador de protección

Temperatura de Color No regulable 50.000 h Apertura de haz G13 Rosatorio (ROT)

GA110 VALUE

MASTER LEDtube GA110 rotatorio / GA 110

4000 K 4500 K

EMP050 Cebador de protección


Temperatura de Color No regulable 40.000 h Apertura de haz G13 Rosatorio (ROT)

Descripción de producto	Potencia de sistema Potencia Lámpara Equivalente	Base / Casquillo	Apertura de haz	Filamento luminoso	INC	Temperatura de color	EOC	PVP
NOVEDAD MASTER LEDtube PERF 600mm ROT	10.5W = 18	G13 Rotatorio	140	950	85	3000	68143400	36.19
MASTER LEDtube PERF 600mm ROT	10.5W = 18	G13 Rotatorio	140	1050	85	4000	66229700	36.19
NOVEDAD MASTER LEDtube PERF 1200mm ROT	21W = 36	G13 Rotatorio	140	1900	85	3000	68149600	51.99
MASTER LEDtube PERF 1200mm ROT	21W = 36	G13 Rotatorio	140	2100	85	4000	66231000	51.99
NOVEDAD MASTER LEDtube PERF 1500mm ROT	31W = 58	G13 Rotatorio	140	2800	85	3000	69085500	79.99
MASTER LEDtube PERF 600mm C	10.5W = 18	G13	140	1050	85	4000	23864500	34.49
MASTER LEDtube PERF 600mm C	10.5W = 18	G13	140	1050	85	6500	23864900	34.49
MASTER LEDtube PERF 1200mm C	21W = 36	G13	140	2100	85	4000	23852200	50.29
MASTER LEDtube PERF 1200mm C	21W = 36	G13	140	2100	85	6500	23854600	50.29
MASTER LEDtube PERF 1500mm C	31W = 58	G13	140	3100	85	4000	69369700	78.99
MASTER LEDtube PERF 1500mm C	31W = 58	G13	140	3100	85	6500	69061100	78.99

f. Cableado calibre 14



Nuevo | 739 vendidos

Cables Eléctricos #8, #10, #12, #14 En Sólido Y Flexible 

U\$S 33⁵⁰

Pago a acordar con el vendedor
[Más información](#)

Entrega a acordar con el vendedor
Quito, Pichincha (Quito)
[Ver costos de envío](#)

Cantidad: 1 unidad  (31 disponibles)

[Comprar ahora](#)

g. Riel con corredera



PRECIO WEB



Correderas en Set para 1 Puerta Corrediza

Código: 52409

Precio: ~~\$44,43~~ **\$31,10**

Precio incluye IVA



Realiza la compra en [boyaca.com](https://www.boyaca.com) mediante:



Incluye 2 unidades de corredera y 1 guía sin riel. El sistema adopta una alta velocidad mecánica del rulimán. La goma del exterior de la polea, importa el material de TPU. Permite un peso de 120 kilogramos/ set

h. Tubería acero estructural A36



CALIDAD: ASTM A36

OTRAS CALIDADES: PREVIA CONSULTA

LARGO NORMAL: 6.00m

OTROS LARGOS: PREVIA CONSULTA

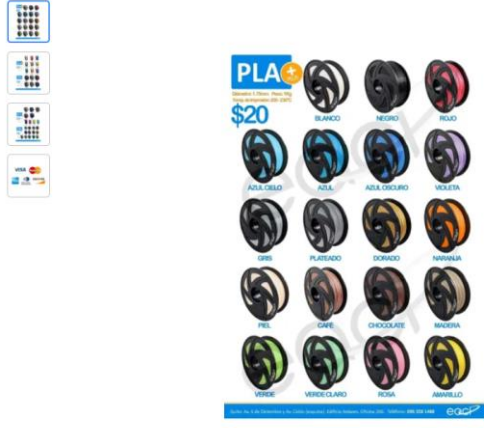
ACABADOS: PREVIA CONSULTA

USOS: MUEBLES, ESTRUCTURAS



TIPO	DIMENSIONES		PESO
EXTERIOR	a	e	kg/6m.
	mm	mm	
3/4"	20	1.20	4.32
1"	25	1.20	5.46
1"	25	1.50	6.72
1 1/4"	30	1.20	6.54
1 1/4"	30	1.50	8.10
1 1/2"	40	1.20	8.82
1 1/2"	40	1.50	10.92
1 1/2"	40	2.00	14.76
2"	50	1.50	13.74
2"	50	2.00	18.80

i. Acrilonitrilo butadieno estireno



Nuevo | 392 vendidos

Filamento Pla+ Plus Abs Tpu Impresora 3d 1.75mm 1kg Sunlu

U\$S 19⁹⁹

Pago a acordar con el vendedor
Acepta depósito bancario, efectivo, tarjeta de crédito.
[Más información](#)

Entrega a acordar con el vendedor
Quito, Pichincha (Quito)
[Ver costos de envío](#)

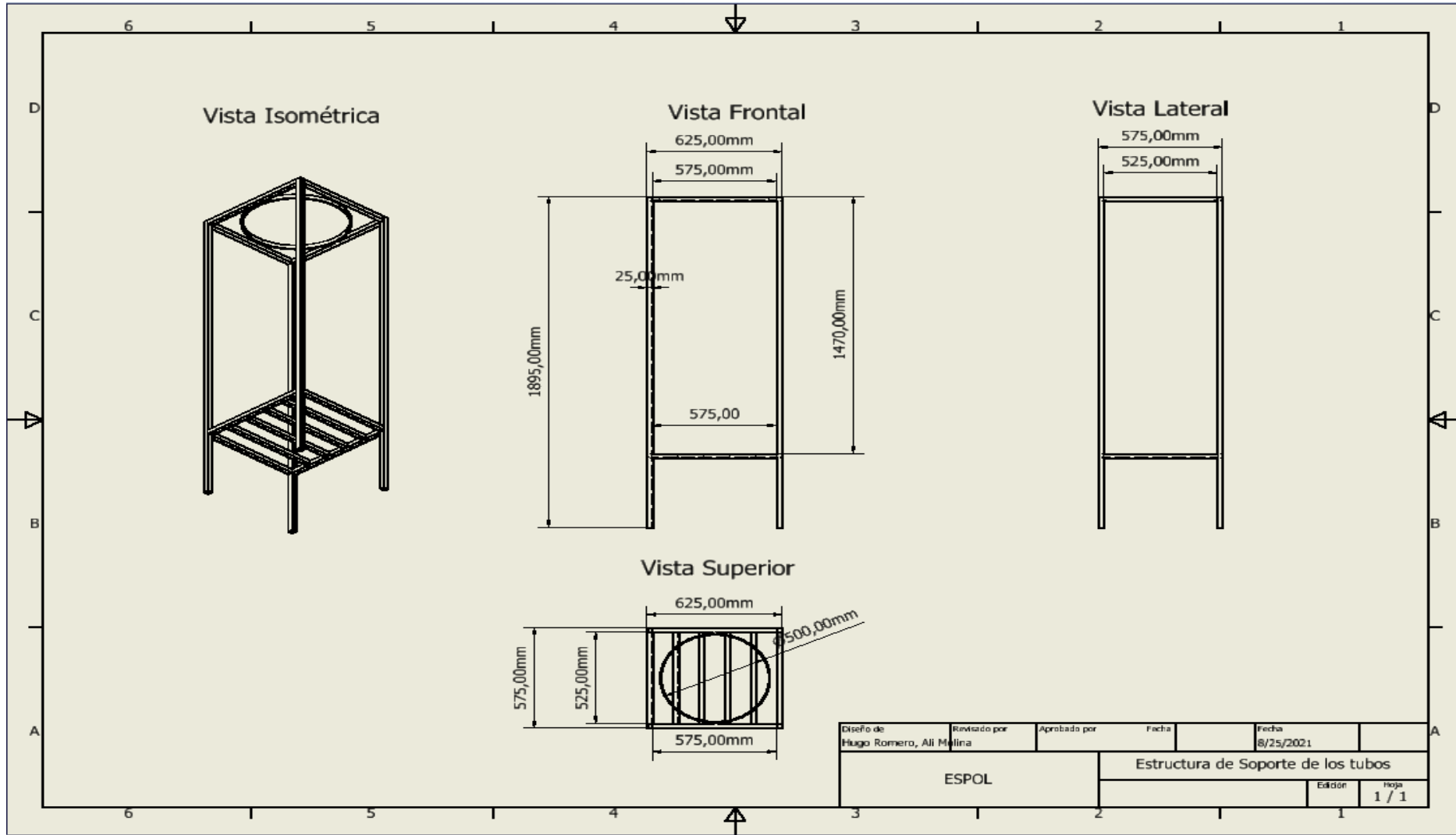
Color: **Varios**

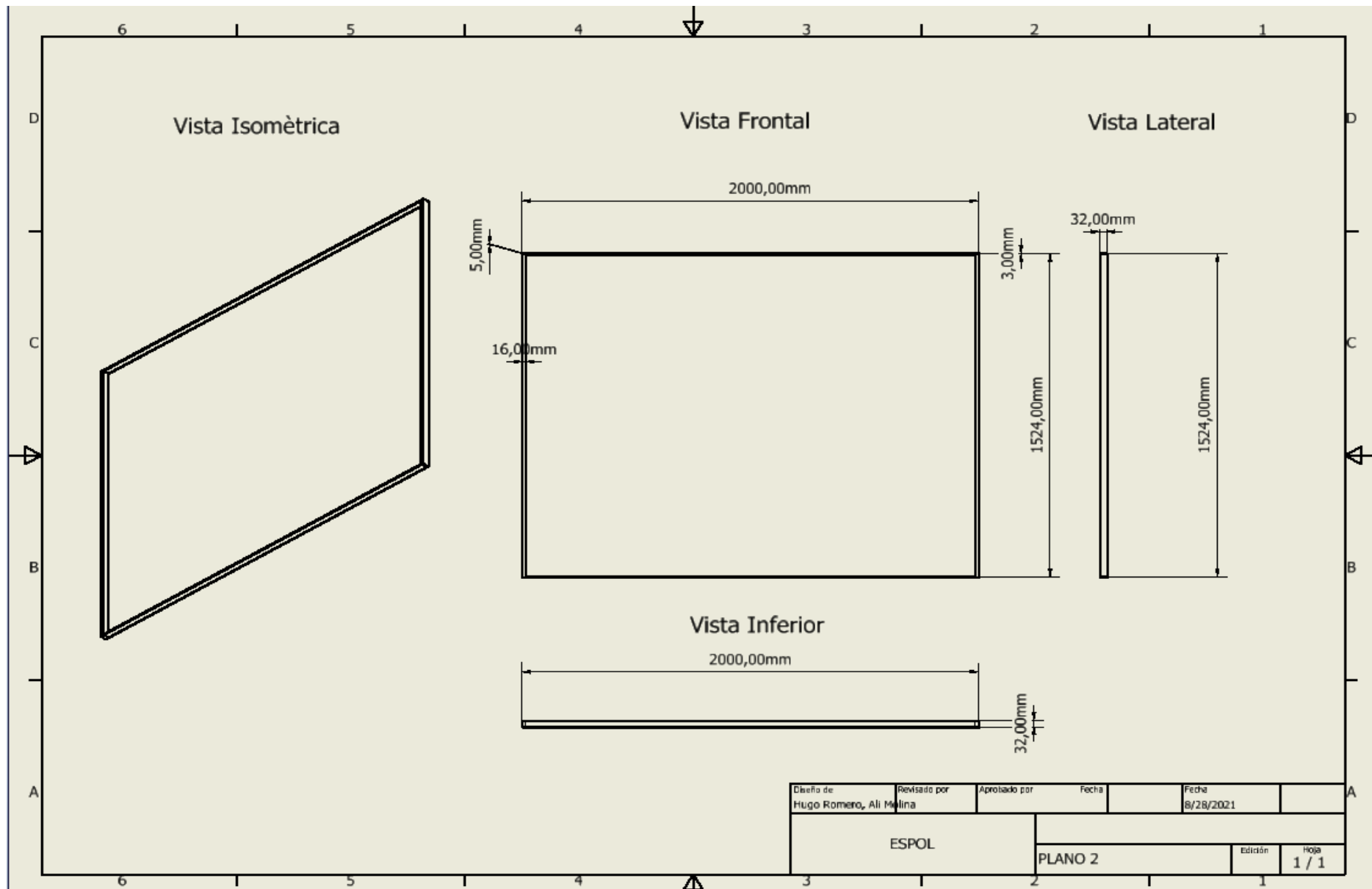
Cantidad: **1 unidad** (9787 disponibles)

Comprar ahora

APÉNDICE B

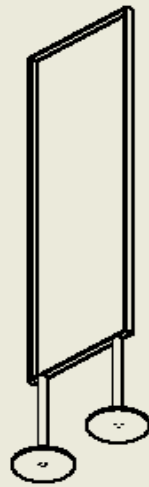
Planos



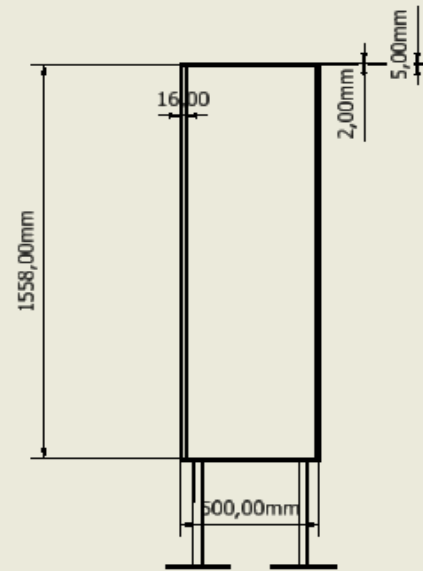


Diseño de Hugo Romero, Ali Molina	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 8/28/2021	
ESPOL			PLANO 2		Edición Hoja 1 / 1

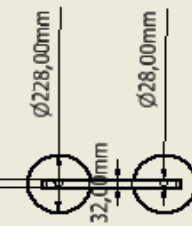
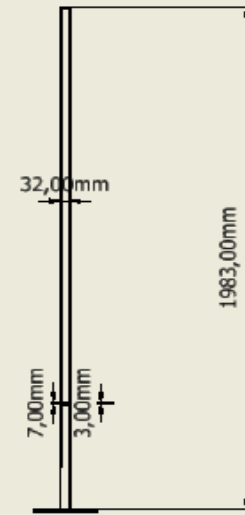
Vista Isométrica



Vista Frontal



Vista Lateral



Vista Inferior

Diseño de Hugo Romero, Ali Molina	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 8/28/2021
ESPOL		PLANO 3		Edición 1 / 1