

**Optimización del diseño de un fotobiorreactor para la captura de CO₂ mediante microalgas
en unidades residenciales para la ciudad de Bucaramanga.**

Carlos Mario Plata Quecho

Director

William Pinto Hernández

Doctor en ciencia de ingeniería mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2025

Tabla de Contenido

Introducción	10
1 Objetivos	12
1.1 Objetivo General:	12
1.2 Objetivos Específicos:	12
2 Marco Teórico	13
2.1 Microalgas	13
2.1.1 Luz	13
2.1.2 Temperatura	14
2.1.3 pH	14
2.1.4 Velocidad de crecimiento	14
2.1.5 Dióxido de carbono (CO ₂)	15
2.1.6 Agitación	15
2.1.7 Oxígeno disuelto	16
2.1.8 Tipo de espécimen	17
2.2 Fotobiorreactores	18
2.2.1 Sistema abierto	18
2.2.2 Sistema cerrado	19
2.3 Ecuaciones de cargas térmicas	21
2.3.1 Cálculo de carga térmica para unidad residencial	21
2.3.1.1 Cálculo del calor sensible	22
2.3.1.2 Cálculo del calor latente	30

2.3.2	Cálculo de carga térmica para el fotobiorreactor	31
2.4	Algoritmos genéticos	35
3	Diseño Conceptual	39
3.1	Alternativas para microalgas.....	39
3.1.1	Scenedesmus obliquus	39
3.1.2	Chlorella vulgaris.....	40
3.1.3	Spirulina.....	42
3.2	Matriz QFD para microalgas	43
3.3	Alternativas para fotobiorreactores.....	46
3.3.1	Fotobiorreactor tubular	46
3.3.2	Fotobiorreactor de placa	49
3.3.3	Fotobiorreactor de columna de burbuja	52
3.4	Matriz QFD para fotobiorreactores.....	55
4	Algoritmo de optimización	58
4.1	Función objetivo	59
4.1.1	Producción de biomasa y CO ₂	60
4.1.2	Calculo energético	61
4.1.3	Función fitness	63
4.2	Código de optimización	64
5	Análisis de cargas térmicas.....	68
5.1	Resultado de carga térmica de la unidad residencial	69
5.2	Resultado de carga térmica para el fotobiorreactor	73
6	Análisis económico.....	76

7	Diseño en detalle.....	78
8	Conclusiones	81
9	Recomendaciones	83
	Referencias Bibliográficas	85

Lista de Tablas

Figura 1 <i>Efecto de la agitación mecánica sobre el crecimiento.</i>	16
Figura 1 <i>Efecto de la agitación mecánica sobre el crecimiento.</i>	16
Figura 2 <i>Gráfica del crecimiento de biomasa con respecto al tiempo en microalgas.</i>	17
Figura 3 <i>Esquema de un sistema abierto.</i>	18
Figura 4 Esquema del flujo de calor en una casa.....	22
Figura 5 <i>Diagrama de flujo para algoritmos genéticos.</i>	36
Figura 6 Esquema de un fotobiorreactor tubular.	47
Figura 7 Esquema de un fotobiorreactor de placas.....	50
Figura 8 Esquema de un fotobiorreactor de columna de burbuja.....	53
Figura 9 Esquema de diseño conceptual para un fotobiorreactor tubular.....	58
Figura 10 Valor del Fitness vs Generación.....	67
Figura 11 Evolución del valor óptimo.	68
Figura 12 Modelado 3D del sistema del colector solar.....	79
Figura 13 Modelado 3D del fotobiorreactor tubular completo.....	80
Figura 14 Simulación para el cambio de temperatura en un tubo.....	81

Lista de Figuras

Tabla 1 <i>Factor de sombra para obstáculos de fachada: Retranqueo.</i>	23
Tabla 1 <i>Factor de sombra para obstáculos de fachada: Retranqueo.</i>	23
Tabla 2 <i>Temperatura exterior de cálculo.</i>	25
Tabla 3 <i>Ratas mínimas de ventilación en zonas de respiración.</i>	27
Tabla 4 <i>Calor latente y sensible desprendido por persona.</i>	29
Tabla 5 <i>Requerimientos técnicos y operacionales para la Scenedesmus.</i>	40
Tabla 6 <i>Requerimientos técnicos y operacionales para la Chlorella.</i>	41
Tabla 7 <i>Requerimientos técnicos y operacionales para la Spirulina.</i>	42
Tabla 8 <i>Matriz QFD para microalgas.</i>	44
Tabla 9 <i>Ponderación para el QFD de microalgas.</i>	45
Tabla 10 <i>Parámetros para un fotobiorreactor tubular.</i>	49
Tabla 11 <i>Parámetros para un fotobiorreactor de placas.</i>	51
Tabla 12 <i>Parámetros para un fotobiorreactor de columna de burbujas.</i>	54
Tabla 13 <i>Matriz QFD para fotobiorreactores.</i>	56
Tabla 14 <i>Ponderación para el QFD de fotobiorreactores.</i>	57
Tabla 15 <i>Valores de la consola del algoritmo de optimización.</i>	65
Tabla 16 <i>Costos de los componentes del fotobiorreactor.</i>	77

Lista de anexos

Anexo A Código para la función objetivo del fotobiorreactor.	90
Anexo B Código para la función de optimización del fotobiorreactor.	93
Anexo C Costos de los componentes del fotobiorreactor.	96
Anexo D Tarifa de costos energéticos de ESSA.	100
Anexo E Planos del fotobiorreactor.	101

Resumen

Título: Optimización del diseño de un fotobiorreactor para la captura de CO₂ mediante microalgas en unidades residenciales para la ciudad de Bucaramanga.*

Autor: Carlos Mario Plata Quecho. **

Palabras clave: Diseño, microalgas, fotobiorreactor tubular, algoritmo genético, carga térmica, optimización, captura de CO₂.

Descripción: Este proyecto se enfoca en el diseño, optimización y viabilidad de un fotobiorreactor tubular con el objetivo de disminuir la carga térmica en viviendas de 75 m² de la ciudad de Bucaramanga, mientras se fomenta la captura de dióxido de carbono (CO₂) y la generación de biomasa de microalgas basándose en criterios de eficiencia energética, sostenibilidad y uso de la radiación solar, se creó un sistema fundamentado en la microalga *Chlorella Vulgaris*, reconocida por su elevado ritmo de crecimiento y habilidad para acumular CO₂. Se desarrolló un modelo matemático en MATLAB mediante un algoritmo genético, el cual optimizó variables de diseño. Así mismo, buscando que la mejor solución ofrezca también el mínimo consumo energético, mayor producción de biomasa, mayor captura de CO₂. Adicionalmente, se consideraron restricciones técnicas y comerciales para asegurar la viabilidad del diseño. Se realizó un análisis térmico para estimar la reducción de carga térmica pasiva en fachadas mediante sombreado y absorción energética por parte del fotobiorreactor. Los resultados muestran un ahorro energético potencial al reducir el uso de sistemas de climatización, así como una producción eficiente de biomasa y una significativa captura de CO₂. Además, se realizó un análisis económico que muestra un ahorro anual significativo en consumo energético de climatización y un retorno de inversión favorable a través del cálculo de la TIR. El fotobiorreactor demuestra ser una solución eficiente, replicable y ambientalmente viable para la mitigación del cambio climático en entornos urbanos.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: William Punto Hernández. PhD. Ingeniería mecánica,

Abstract

Title: Optimization of the design of a photobioreactor for CO₂ capture using microalgae in residential units for the city of Bucaramanga.*

Author: Carlos Mario Plata Quecho.**

Key Words: Design, microalgae, tubular photobioreactor, genetic algorithm, thermal load, optimization, CO₂ capture.

Description: This project focuses on the design, optimization, and feasibility of a tubular photobioreactor with the aim of reducing the thermal load in 75 m² homes in the city of Bucaramanga, while promoting the capture of carbon dioxide (CO₂) and the generation of microalgae biomass. Based on criteria of energy efficiency, sustainability, and the use of solar radiation, a system was created based on the microalga *Chlorella Vulgaris*, recognized for its high growth rate and ability to accumulate CO₂. A mathematical model was developed in MATLAB using a genetic algorithm, which optimized design variables. Likewise, seeking that the best solution also offers minimal energy consumption, greater biomass production, and higher CO₂ capture. Additionally, technical and commercial constraints were considered to ensure the viability of the design. A thermal analysis was conducted to estimate the reduction of passive thermal load on facades through shading and energy absorption by the photobioreactor. The results show potential energy savings by reducing the use of air conditioning systems, as well as efficient biomass production and significant CO₂ capture. Additionally, an economic analysis was conducted, showing a significant annual savings in air conditioning energy consumption and a favorable return on investment through the calculation of the IRR. The photobioreactor proves to be an efficient, replicable, and environmentally viable solution for mitigating climate change in urban environments.

* Thesis.

** Faculty of Physical and Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: William Punto Hernández. PhD. Mechanical Engineering.

Introducción

Desde la Revolución Industrial, la concentración de dióxido de carbono (CO₂) en el aire ha experimentado un notable incremento. Este gas, visto como uno de los principales causantes del efecto invernadero y del calentamiento global, se libera principalmente a través de la combustión de combustibles fósiles, la tala de árboles y varias actividades industriales. Para 2023, el promedio mundial de la concentración de superficie de CO₂ alcanzó 420 partes por millón (ppm) según la organización meteorológica mundial (OMM, 2024). Su acumulación está fuertemente relacionada con el incremento de la temperatura mundial, el derretimiento de los glaciares, las alteraciones drásticas en los patrones climáticos y la degradación de ecosistemas esenciales.

En la actualidad se están haciendo esfuerzos por la descarbonización o en su defecto, estrategias que contribuyan a la reducción de CO₂. Frente a esta situación, se buscan alternativas amigables con el medio ambiente que busquen reducir o capturar emisiones de CO₂, lo cual se ha convertido en una prioridad. Por lo tanto, para disminuir las emisiones, es crucial implementar tecnologías de captura y almacenamiento de carbono que permitan remover el CO₂. (Maroneze et al., 2021). Así mismo, estos aumentos en el CO₂, hacen que las temperaturas tanto ambientales como en recintos ocupados se viera en un aumento significativo, generando que se usen sistemas de refrigeración para mantener todo con buena climatización.

Por otra parte, en Bucaramanga, las altas temperaturas han generado un aumento en los costos energéticos debido al uso excesivo de sistemas de refrigeración, en particular por el aire acondicionado, tanto en empresas como en viviendas. Una de los principales factores de este incremento en los costos, es el uso de aire acondicionado (AA). Esta radiación llega a estructuras y edificaciones generando el aumento de la carga térmica y con ellos aumento de las temperaturas

al interior de unidades residenciales. Esto conlleva un mayor consumo de energía empleada en equipos de AA para mantener las condiciones de confort térmico, elevando así los costos operativos. (Leiva, 2023)

Para proponer una salida a esta situación, que integre reducir la carga térmica en unidades residenciales y a su vez, elaborar una estrategia para captura de CO₂, se propone el diseño de un fotobiorreactor optimizado para el cultivo de microalgas. Este sistema aprovechará la capacidad natural de las microalgas para realizar la fotosíntesis, convirtiendo el CO₂ en biomasa y oxígeno. El diseño del fotobiorreactor se orientará a encontrar la solución más efectiva y sostenible económicamente, adaptada a los requerimientos específicos de una unidad residencial de 75 m². Esto implica considerar factores como el diseño de un sistema cerrado para la captura de CO₂, el consumo energético del sistema, el espécimen de microalga utilizado, la disponibilidad de luz solar, y el espacio disponible para la instalación y cosecha. Para así, reducir la radiación a unidades residenciales y con ello mitigar los costos por consumo en aires acondicionados (Vergara, 2019).

Este proyecto puede alcanzar una sostenibilidad amigable debido a que no solo se realiza la captura de CO₂ y la disminución de las cargas térmicas en viviendas, sino que también produce biomasa y oxígeno por medio de la implementación de un techo verde, lo que implica que dicha biomasa puede ser utilizada para la fabricación de ciertos subproductos, como lo son: biocombustibles, alimentos, suplementos, productos farmacéuticos, etc.(Científica & Tecnológica, 2018).

1 Objetivos

1.1 Objetivo General:

Optimizar el diseño de un fotobiorreactor con microalgas para la captura de CO₂ en unidades residenciales de la ciudad de Bucaramanga, considerando criterios técnicos y operacionales aplicables a viviendas de aproximadamente 75 m², y desarrollar un análisis financiero integral que permita evaluar la viabilidad de su implementación.

1.2 Objetivos Específicos:

- Diseñar un fotobiorreactor para la captura de CO₂ que integre sistemas de radiación, transporte, almacenamiento y cosecha de las microalgas por una unidad residencial de 75 m².
- Optimizar los parámetros de diseño (diámetro, longitud, número de tubos, área, energía consumida, producción de biomasa, captura de CO₂) que se ajusten a los requerimientos del fotobiorreactor usando la estrategia de algoritmos genéticos en Matlab.
- Realizar un análisis financiero del diseño del fotobiorreactor para evaluar la viabilidad técnica para una unidad residencial de 75 m².

2 Marco Teórico

2.1 Microalgas

Las microalgas son seres unicelulares fotosintéticos que habitan de manera natural en entornos acuáticos, ya sean marinos o de agua dulce. Su estructura sencilla les facilita su crecimiento acelerado en presencia de luz, dióxido de carbono (CO₂), agua y nutrientes minerales. También tienen una elevada eficacia fotosintética, es decir aprovecha la luz solar para producir compuestos orgánicos. (Brennan & Owende, 2010). Esto les permite poder producir biomasa captando el CO₂ y absorbiendo la luz solar. Además de la radiación solar y las fuentes carbónicas, requiere nutrientes para el desarrollo de la oxidación, siendo fundamentales el carbono, fósforo y nitrógeno para su crecimiento y proceso (Abalde et al.,1995)

Así mismo, para la generación de ellas, se necesita primero la elección de una especie apta para el uso del fotobiorreactor, junto con varios parámetros fundamentales para la utilización de la misma. Se tienen como parámetros: la luz, la temperatura, el pH, la velocidad de crecimiento, el CO₂, la agitación., oxígeno disuelto y el espécimen de microalgas.

2.1.1 Luz

La luz, es muy importante dado que es uno de los pilares fundamentales para la producción, sin ella no se realiza el proceso de fotosíntesis, ya que es el proceso mediante el cual estos organismos convierten el dióxido de carbono (CO₂) y el agua en compuestos orgánicos y oxígeno, por eso mismo se debe de cuidar la intensidad luminosa, la longitud de onda y el fotoperiodo (Núñez Valdés, 2021). La longitud de onda debe estar en el rango de 400 a 700 nm, siendo muy beneficiado en rangos de luces azules y rojas para su crecimiento. Así mismo, la intensidad solar está ligada con la velocidad de crecimiento de las microalgas, porque para a bajas intensidades se

tendrá una baja generación de microalgas y viceversa. Para no tener saturación por la radiación, no debe superar los $300 \frac{\mu E}{m^2 s}$. (Guzmán, 2021).

2.1.2 Temperatura

La temperatura es uno de los parámetros más determinantes en el metabolismo y el ritmo de desarrollo de las microalgas. Influye de manera directa en los procesos bioquímicos que participan en la fotosíntesis, la respiración, la división celular y la generación de biomasa, haciendo que se aumente la tasa de crecimiento cuando se encuentra en un rango de temperatura óptimo. Así mismo, un rango adecuado debe estar entre 20° y 35° C, si se aumenta la respiración, hará que se reduzca la fotorrespiración, bajando la productividad. (Ras et al., 2013)

2.1.3 pH

Las microalgas mantienen gran importancia con el pH en el medio del cultivo, dado que determina la solubilidad del CO₂ y de los minerales. También puede tener toxicidad o un efecto inhibitorio de las microalgas, si no se controla. De esta manera, se tiene entre un valor recomendado de (7;9) dependiendo del espécimen, pero este se controla después de la inyección de CO₂ para tener un control del cultivo. (Hernández-Pérez & Labbé, 2014a).

2.1.4 Velocidad de crecimiento

La velocidad específica de crecimiento (μ) es un parámetro importante en las microalgas, dado que señala la velocidad de multiplicación de la biomasa de estas mismas por unidad de tiempo. Es fundamental su conocimiento para diseñar, gestionar y perfeccionar sistemas productivos como los fotobiorreactores, particularmente cuando se persigue maximizar la captura de CO₂ y la producción de biomasa en áreas restringidas, como las viviendas. La ecuación utilizada para el proceso de la velocidad de crecimiento es la siguiente:

$$\mu = \frac{1}{X} * \frac{dX}{dt} \quad (1)$$

En donde:

μ = Velocidad específica de crecimiento.

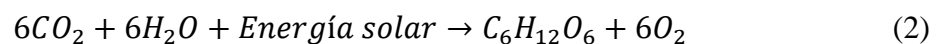
X = Concentración inicial de biomasa.

$\frac{dX}{dt}$ = Tasa de cambio de biomasa en el tiempo.

Con la eq (1), se permite poder hallar la velocidad de crecimiento para cualquier microalga, esto nos permite poder saber con qué rapidez se irá proliferando en el fotobiorreactor para tener conocimiento de la cantidad de producción de biomasa. (Prieto Márquez et al., 2020)

2.1.5 Dióxido de carbono (CO₂)

Las microalgas emplean el dióxido de carbono (CO₂) como el principal sustrato inorgánico para realizar el proceso de fotosíntesis, mediante el cual transforman la energía luminosa en biomasa. Durante la fotosíntesis, las microalgas absorben CO₂ y lo convierten en biomasa a través de la siguiente reacción global simplificada:



Con la eq (2), es un análisis estequiométrico en donde no solo contribuye a la reducción de gases de efecto invernadero, sino que también genera oxígeno como subproducto y produce compuestos útiles como lípidos, proteínas y carbohidratos. La eficiencia del cultivo está directamente relacionada con la disponibilidad de CO₂ disuelto en el medio acuoso. (Prieto Márquez et al., 2020)

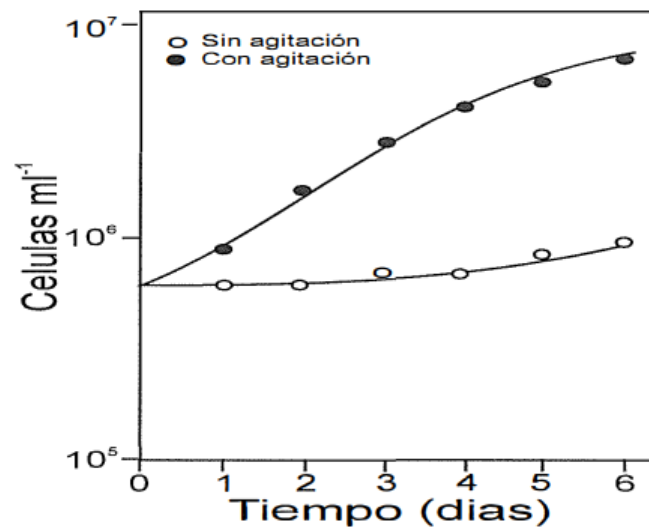
2.1.6 Agitación

La agitación en un cultivo de microalgas es un parámetro necesario e incide de manera directa en la producción de biomasa. Dado que garantiza la uniformidad del medio, mejora la transferencia de masa (CO₂ y nutrientes) y favorece una exposición homogénea a la luz. En los

fotobiorreactores, la agitación también previene la sedimentación celular, el estancamiento y puede aportar al control de la temperatura y pH del sistema. Su aplicación también influye directamente en la eficacia global del sistema.(Abalde et al.,1995). En la figura 1, se muestra el comportamiento en la que se compara el crecimiento de la microalga cuando se le implementa un agitador y cuando no se le implementa, en donde se tiene una variación de las células con respecto al tiempo.

Figura 1

Efecto de la agitación mecánica sobre el crecimiento.



Nota. Comparación del crecimiento celular con y sin agitador. Tomado de *Microalgas: Cultivos y aplicaciones* (pag 41), por A cid, Fidalgo, E Torres, C Herrero J Abalde, s.f, Universidad de la Coruña

2.1.7 Oxígeno disuelto

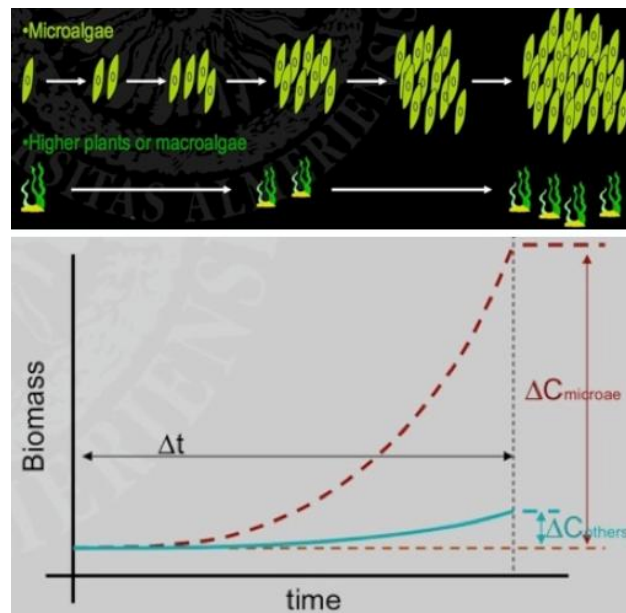
El oxígeno disuelto es un parámetro crucial en los sistemas de cultivo de microalgas, ya que es un subproducto directo de la fotosíntesis y puede influir significativamente en la fisiología celular, el equilibrio químico del medio y el rendimiento general del sistema. Las elevadas concentraciones de oxígeno en las algas son perjudiciales, ya que causan la foto inhibición, un fenómeno que impide que las microalgas efectúen la fotosíntesis debido a la saturación del entorno.

2.1.8 Tipo de espécimen

Los tipos de especímenes más utilizados para el uso de fotobiorreactores son: *Chlorella*, *Spirulina*, *Dunaliella*, *Scenedesmus*, *Phaeodactylum*, *Porphyridium*, *Botryococcus braunii*, *Chlamydomonas*. En la figura 2, se muestra el comportamiento entre las microalgas y los otros tipos de plantaciones para la generación de biomasa con respecto al tiempo. En la Figura 2, se muestra una gráfica en la que se compara el crecimiento de la microalga cuando se le implementa un agitador y cuando no se le implementa, en donde se tiene una variación de las células con respecto al tiempo.

Figura 2

Gráfica del crecimiento de biomasa con respecto al tiempo en microalgas.



Nota. Gráfica de crecimiento exponencial. Tomado de *Procesos microbianos industriales*, por J.

A. Fernández, s.f., Universidad de Almería,

<https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/index.html>.

2.2 Fotobiorreactores

Los fotobiorreactores son sistemas creados para el cultivo de organismos fotosintéticos, como las microalgas, bajo condiciones reguladas, empleando la luz como principal fuente de energía. En las últimas décadas, su uso ha ganado un interés creciente debido a su habilidad para capturar dióxido de carbono (CO₂), generar biomasa de gran valor añadido y aportar a procesos de biorremediación y sostenibilidad energética (Liu & Hong, 2021). Para ello es esencial garantizar un buen diseño y mantenibilidad para el desarrollo de estos mismos. Así mismo, existen dos tipos de sistemas para fotobiorreactores:

2.2.1 Sistema abierto

Un sistema abierto se basa en el proceso de microalgas con apertura hacia la atmósfera, esto hace que la radiación que recibe es directa. No obstante, esto es un proceso muy susceptible a contaminaciones y plagas dando que está al aire libre en piscinas de tamaños grandes para hacer que la producción sea viable condiciones naturales. A su vez, tienen que ser los sistemas de tamaños muy grandes para que su uso tenga viabilidad en su utilización. En la Figura 3, se muestra el esquema de un sistema abierto, teniendo que se tienen paletas para generar el movimiento de la mezcla y así evitar el estancamiento, también se ilustra la puesta en marcha de este mismo.

Figura 3

Esquema de un sistema abierto.



Nota. Esquema y puesta en marcha de un sistema abierto. Tomado de *Procesos microbianos industriales*, por J. A. Fernández, s.f., Universidad de Almería, <https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/index.html>.

2.2.2 Sistema cerrado

Los sistemas cerrados son aquellos que se usan para limitar el contacto de las microalgas con el ambiente de forma directa, reduciendo la contaminación. Así mismo, para llevar un control de los parámetros vistos en la sección 2.1, de manera precisa. Esto reduce los espacios en donde se pueden implementar estas máquinas, haciendo que sea más eficiente el proceso. Dentro de los tipos de fotobiorreactores que han experimentado un mayor progreso en años recientes y que se perciben con considerables beneficios para la producción de biomasa con el uso de microalgas, son los fotobiorreactores tubulares, de placas y de columna de burbujas (Pulz, 2001).

- **Fotobiorreactor Tubular:**

El fotobiorreactor tubular se compone de una red horizontal o vertical de tubos transparentes, a través de los cuales se propaga el cultivo de microalgas. Esta disposición proporciona una elevada relación entre superficie y volumen, lo que promueve una penetración de la luz más efectiva, elemento crucial para el desarrollo de las microalgas. El diseño dispone de dos partes: El lazo, es donde lleva la captación de la energía solar, en donde es la unión para hacer compacto el sistema. La siguiente parte es el desgasificador, es la parte donde se lleva el intercambio de material, especialmente la salida de oxígeno (Diana Mayol, 2020).

- **Fotobiorreactor de placas:**

Los fotobiorreactores de placas planas cumplen con requisitos significativos para la producción de biomasa a partir de microalgas y cianobacterias, tales como un mayor uso de la radiación solar, una mayor superficie expuesta a la luz, y además pueden ser guiados con facilidad

según la hora del día y su localización geográfica. También se simplifica la desgasificación del sistema, dado que los gases generados durante los procesos fisiológicos son liberados por la parte superior de los paneles (Tredici et al., 1991). Para la producción de estos aparatos de cultivo, se emplean placas planas verticales traslúcidas, que posibilitan la luz a ambos lados, y usualmente poseen un sistema de agitación por aireación que a su vez elimina los excesos de oxígeno en el proceso de cultivo.

- **Fotobiorreactor columna de burbujas:**

Los fotobiorreactores de columna de burbujas se distinguen por su tamaño reducido dado que ocupan solo de altura, su costo bajo y su sencillez de uso. Además, son altamente prometedores para el cultivo a gran escala de microalgas. Los fotobiorreactores de columna de aire que utilizan un sistema de bombeo de aire comprimido tienen la capacidad de lograr una concentración final de biomasa y una tasa de crecimiento determinada, muy parecidas a las obtenidas con los fotobiorreactores tubulares.

Estos sistemas poseen múltiples beneficios, entre los que se incluyen la elevada transferencia de masa, una excelente agitación con esfuerzos de corte reducidos, lo que resulta en una excelente mezcla y aireación, un consumo energético reducido, una limpieza y esterilización sencillas, un control apropiado de la temperatura del medio de cultivo y una disminución de la foto-inhibición y foto-oxidación. Estos también contienen un cilindro interior riser que permite canalizar el flujo de aire y por lo tanto de la mezcla gas-líquido, generándose flujo ascendente (Rubio Fernández et al., 2013).

2.3 Ecuaciones de cargas térmicas

Las cargas térmicas representan la cantidad de energía que una edificación requiere añadir o remover para mantener condiciones de confort térmico. En el análisis térmico, es importante saber la transferencia de calor que tendrá el sistema cuando se encuentre en operación. Así mismo, también se calcula la radiación emitida en forma de calor por la unidad residencial que se vaya a evaluar. Para finalmente evaluar el porcentaje de calor que se reduce en todo el sistema con la implementación del fotobiorreactor. Para ello se hallará primero la radiación emitida por una unidad residencial, luego la radiación que genera el fotobiorreactor.

2.3.1 Cálculo de carga térmica para unidad residencial

En una unidad residencial cuando se habla de carga térmica refiere al cambio de temperatura interior del aire o su contenido de humedad. El calor neto que se hallará se dividirá en dos partes: carga térmica sensible (variación de la temperatura del aire) y carga térmica latente (variación de la humedad del ambiente). Entonces las eq para el cálculo del neto será la siguiente:

$$Q_{neto,casa} = Q_{sensible} + Q_{latente} \quad (3)$$

Con la eq (3), tomada de: (Rodríguez, s/f), en donde también fueron tomadas las ecuaciones para la realización de la carga térmica para una unidad residencial, se procede a hallar el calor sensible y latente en el recinto. En la Figura 4, se muestra los diferentes flujos de calor para la entrada y salida de las cargas tanto sensibles como latentes en una vivienda. Teniendo la radiación directa, las pérdidas de calor por techos, paredes, ventanas, suelos, infiltraciones de aire, carga por persona y por electrodomésticos en el hogar.

Figura 4

Esquema del flujo de calor en una casa.



Nota. Esquema para las entradas y salidas de calor. Tomado de Bermejo Presa (2016), *Aplicación de aislamientos en la edificación y las instalaciones. Casos prácticos* (DTIE 12.02). Asociación Técnica Española de Climatización y Refrigeración (Bermejo, 2016).

2.3.1.1 Cálculo del calor sensible

Para el cálculo de la carga sensible se hallará con la siguiente ecuación:

$$Q_S = Q_{sr} + Q_{str} + Q_{st} + Q_{si} + Q_{sai} \quad (4)$$

En donde:

Q_S = Calor sensible total.

Q_{sr} = Carga sensible de radiación solar a través de cristales.

Q_{str} = Carga por radiación a través de paredes y techos externos.

Q_{st} = Carga por radiación a través de paredes y techos internos.

Q_{si} = Carga transmitida por infiltraciones y ventilaciones de aire exterior

Q_{sai} = Carga transmitida por aportaciones internas.

En la eq (4), se expresa todos los tipos de carga sensible que se tiene para una unidad residencial, cada uno de ellas expresado en la unidad de (kW).

- **Carga sensible de radiación solar a través de cristales:**

$$Q_{SR} = f * A * W \quad (5)$$

En donde:

f = factor de visión o sombra para los ventanales.

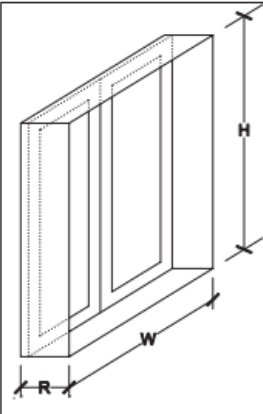
A = Área expuesta a la radiación [m^2].

W = Carga de la irradiancia solar que entra en los ventanales [$\frac{W}{m^2}$].

En la eq (5), se halla la carga sensible de radiación solar a través de las cristaleras. Para hallar el factor de visión para los ventanales, se usa la Tabla 1, en donde se tienen valores para el factor de sombra para los obstáculos de fachada en forma de retranqueo, dado que es la configuración más común en unidades residenciales de Bucaramanga. Analizando las alturas y anchuras de los ventanales se usa la siguiente configuración:

Tabla 1

Factor de sombra para obstáculos de fachada: Retranqueo.



		0,05 < R/W ≤ 0,1	0,1 < R/W ≤ 0,2	0,2 < R/W ≤ 0,5	R/W > 0,5
		0,05 < R/H ≤ 0,1	0,1 < R/H ≤ 0,2	0,2 < R/H ≤ 0,5	R/H > 0,5
S	0,05 < R/H ≤ 0,1	0,82	0,74	0,62	0,39
	0,1 < R/H ≤ 0,2	0,76	0,67	0,56	0,35
	0,2 < R/H ≤ 0,5	0,56	0,51	0,39	0,27
	R/H > 0,5	0,35	0,32	0,27	0,17
SE/SO	0,05 < R/H ≤ 0,1	0,86	0,81	0,72	0,51
	0,1 < R/H ≤ 0,2	0,79	0,74	0,66	0,47
	0,2 < R/H ≤ 0,5	0,59	0,56	0,47	0,36
	R/H > 0,5	0,38	0,36	0,32	0,23
E/O	0,05 < R/H ≤ 0,1	0,91	0,87	0,81	0,65
	0,1 < R/H ≤ 0,2	0,86	0,82	0,76	0,61
	0,2 < R/H ≤ 0,5	0,71	0,68	0,61	0,51
	R/H > 0,5	0,53	0,51	0,48	0,39

Nota. Valores para retranqueo de fachada. Tomado de *Catálogo de elementos constructivos: Cerramientos exteriores – Fachadas pesadas – Muro doble con cámara sin aislamiento térmico,*

por Instituto de la Construcción de Castilla y León, s.f., <http://cte-web.iccl.es/sistemas.php?t=2&f=3>.

- **Carga por radiación a través de paredes y techos externos:**

La carga por transmisión y radiación que se transmite a través de las paredes y techos opacos que limitan con el exterior se calcula como sigue:

$$Q_{str} = K * A * (T_{ec} - T_i) \quad (6)$$

En donde:

K = es el coeficiente global de transmisión térmica del cerramiento $\left[\frac{W}{m^2 * ^\circ C} \right]$.

A = Área de muro expuesto a la radiación [m^2].

T_{ec} = Temperatura exterior de cálculo del recinto [$^\circ C$].

T_i = Temperatura interna del recinto [$^\circ C$].

En la eq (6), se halla la carga térmica a través de paredes y techos externos, teniendo en cuenta la geometría que se expone al sol. Así mismo, para hallar el coeficiente global de transmisión térmica del cerramiento, se usará una página web del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja y el ICCL, Instituto de la Construcción de Castilla y León, en donde se calcula de manera automática, ajustando el tipo de fachada, material, aislante, espesor del aislante y el tipo de distribución de los muros en el recinto (Softeca, 2007). Para hallar la temperatura exterior de cálculo se hace dependiendo de la orientación en donde incida el sol sobre el sistema. Tomando de la Tabla 2:

Tabla 2*Temperatura exterior de cálculo.*

Orientación	Temperatura exterior de cálculo (T_{ec}) en °C
Norte	$0,6 \cdot T_e$
Sur	T_e
Este	$0,8 \cdot T_e$
Oeste	$0,9 \cdot T_e$
Cubierta	$T_e + 12$
Suelo	$(T_e + 15) / 2$
Paredes interiores	$T_e \cdot 0,75$

De la Tabla 2, se toma que toca calcular un valor de temperatura exterior de diseño (T_e), que se calcula de la siguiente manera:

$$T_e = 0.4T_{me} + 0.6T_{m\acute{a}x} \quad (7)$$

En donde:

T_e = Temperatura exterior de diseño [°C].

T_{me} = Temperatura media del mes más cálido [°C].

$T_{m\acute{a}x}$ = Temperatura máxima del mes más cálido [°C].

En la eq (7), se halla la temperatura exterior de diseño, para poder entrar en la Tabla 2, y así calcular la temperatura exterior de cálculo.

- **Carga por radiación a través de paredes, techos, suelos y puertas interiores:**

La carga por transmisión a través de los cerramientos interiores del recinto que lo limitan con otras estancias del edificio se calcula usando la siguiente ecuación:

$$Q_{st} = K * A * (T_e - T_i) \quad (8)$$

En donde:

K = es el coeficiente global de transmisión térmica del cerramiento $\left[\frac{W}{m^2 \cdot ^\circ C} \right]$.

A = Área interior del recinto [m^2].

T_e = Temperatura exterior del recinto [$^{\circ}C$].

T_i = Temperatura interna del recinto [$^{\circ}C$].

En la eq (8), se calcula la carga térmica dentro del recinto a evaluar. Así mismo, para hallar el coeficiente de transmisión térmica, usa el mismo sitio web en la eq (6) (Softeca, 2007), revisando como está estructurado el interior de la unidad residencial.

- **Carga transmitida por infiltraciones de aire exterior:**

La carga transmitida por infiltraciones y ventilación de aire exterior se determina mediante la siguiente ecuación:

$$Q_{si} = V * \rho * C_{p_{aire}} * \Delta T \quad (9)$$

En donde:

V = Caudal infiltrado de aire [$\frac{m^3}{s}$].

ρ = Densidad del aire [$\frac{kg}{m^3}$].

C_p = Calor específico del aire [$\frac{J}{kg^{\circ}C}$].

ΔT = El cambio de temperatura entre la exterior y la interior [$^{\circ}C$].

En la eq (9), se revisa cual es la transferencia de calor por los caudales por donde se ventilen aire. También, se necesita hallar la temperatura de película para poder determinar las propiedades de densidad y calor específico del aire. Para el cálculo del caudal infiltrado de aire se usa la siguiente formula:

$$V = R_p * P_z + R_a * A_z \quad (10)$$

Donde:

R_p = Tasa de ventilación por persona [$\frac{L}{s}$].

P_z = Número de personas.

$$R_a = \text{Tasa de ventilación por unidad de área} \left[\frac{L}{s \cdot m^2} \right].$$

$$A_z = \text{Área del recinto} [m^2].$$

En la eq (10), se busca hallar el caudal infiltrado de aire que es óptimo para tener un aire de calidad en un recinto cerrado. Esta ecuación fue tomada de la Norma ASHRAE 62.1-2013 / Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality (*ANSI/ASHRAE Addendum p to ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2013*, 2015). Para calcular la tasa de ventilación por persona y la tasa de ventilación por unidad de área se hará uso de la Tabla 3, que también es sacada de la Norma ASHRAE 62.1-2013.

Tabla 3

Ratas mínimas de ventilación en zonas de respiración.

Categoría de ocupación	Rata de aire exterior para personas R_p		Rata de aire exterior del área R_a		Notas	Valores por defecto		Clase de aire	
	cfm/persona	L/s persona	cfm/pie ²	L/s-m ²		Densidad de ocupación (Ver Nota 4)	Rata combinada de aire exterior (Ver Nota 5)		
						#/1000 ft ² or #/100 m ²	cfm/persona		L/s persona
Edificios de oficinas									
Espacios de oficinas	5	2.5	0.06	0.3		5	17	8.5	1
Áreas de recepción	5	2.5	0.06	0.3		30	7	3.5	1
Teléfonos/datos de entrada	5	2.5	0.06	0.3		60	6	3.0	1
Vestíbulos de entrada principal	5	2.5	0.06	0.3		10	11	5.5	1
Espacios diversos									
Cajas de bancos / cajas de depósitos	5	2.5	0.06	0.3		5	17	8.5	2
Computador (sin inmersión)	5	2.5	0.06	0.3		4	20	10.0	1
Cuartos de equipo eléctrico	—	—	0.06	0.3	B	—			1
Cuartos de ascensores mecánicos	—	—	0.12	0.6	B	—			1
Droguería (área de preparación)	5	2.5	0.18	0.9		10	23	11.5	2
Estudios fotográficos	5	2.5	0.12	0.6		10	17	8.5	1
Despacho/Recepción	—	—	0.12	0.6	B	—			1
Cabina de teléfonos	—	—	0.00	0.0		—			1
España de transporte	7.5	3.8	0.06	0.3		100	8	4.1	1
Bodegas	—	—	0.06	0.3	B	—			2
Espacios públicos de asamblea									
Auditorio –área de sillas	5	2.5	0.06	0.3		150	5	2.7	1
Sitios de adoración religiosa	5	2.5	0.06	0.3		120	6	2.8	1
Salas de corte	5	2.5	0.06	0.3		70	6	2.9	1
Cámaras legislativas	5	2.5	0.06	0.3		50	6	3.1	1
Biblioteca	5	2.5	0.12	0.6		10	17	8.5	1
Vestíbulos	5	2.5	0.06	0.3		150	5	2.7	1
Museos (niños)	7.5	3.8	0.12	0.6		40	11	5.3	1
Museos/galerías	7.5	3.8	0.06	0.3		40	9	4.6	1
Residencial									
Unidad comunitaria	5	2.5	0.06	0.3	F,G	F			1
Corredores comunes	—	—	0.06	0.3					1

- **Carga sensible por aportaciones internas:**

La ganancia de carga sensible debida a las aportaciones internas de la unidad residencial se determina a su vez como suma de los siguientes tipos de cargas que se generan dentro del mismo, por medio de la siguiente ecuación:

$$Q_{sai} = Q_{sil} + Q_{sp} + Q_{se} \quad (11)$$

En donde:

Q_{sil} = Calor interno por iluminación interna de bombillas [kW].

Q_{sp} = Calor interno por personas ocupantes [kW].

Q_{se} = Calor por aparatos electrónicos o componentes [kW].

Para hallar el calor interno por iluminación interna de bombillas, se tiene de dos tipos: fluorescentes e incandescentes. Entonces se usa la siguiente ecuación:

$$Q_{sil} = Q_{sil,fluorescente} + Q_{sil,incandescente} \quad (12)$$

- **Carga de las lámparas fluorescentes:**

Para hallar el calor emitido por lámparas fluorescente se tiene la siguiente ecuación:

$$Q_{sil,fluorescente} = 1.25 * n * Pot_{lampara} \quad (13)$$

En donde:

n = número de lámparas fluorescentes.

$Pot_{lampara}$ = Potencia de las lámparas fluorescentes [kW].

- **Carga de las lámparas incandescentes:**

Ahora, para hallar el calor emitido por lámparas incandescente se tiene la siguiente ecuación:

$$Q_{sil,incandescente} = n * Pot_{lampara} \quad (14)$$

En donde:

n = número de lámparas incandescentes.

$Pot_{l\u00e1mpara}$ = Potencia de las l\u00e1mparas incandescentes [kW].

Ahora, para hallar el calor interno por personas ocupantes se usa la siguiente ecuaci\u00f3n:

$$Q_{sp} = n * C_{sensible, persona} \quad (15)$$

En donde:

n = n\u00famero de personas que habitan en el recinto.

$C_{sensible, persona}$ = Calor sensible emitido por las personas [kW].

En la eq (15), para hallar el calor sensible y latente emitido se tomar\u00e1 de la Tabla 4, en donde se tendr\u00e1n los grados de actividad que hace cada persona en el hogar para seleccionar el calor sensible de este mismo.

Tabla 4

Calor latente y sensible desprendido por persona.

Grado de actividad	Temperatura seca del local					
	26\u00b0C		24\u00b0C		21\u00b0C	
	W		W		W	
	Sensible	Latente	Sensible	Latente	Sensible	Latente
Sentados, en reposo	61	41	67	35	75	27
Sentados, trabajo muy ligero	63	53	70	46	79	37
Empleado de oficina	63	68	71	60	82	49
De pie, marcha lenta	63	68	71	60	82	49
Sentado, de pie	64	82	74	72	85	61
Sentado, restaurante	71	90	82	79	94	67
Trabajo ligero en banco de taller	72	147	86	133	107	113
Baile o danza	80	168	95	153	117	131
Marcha, 5 km/h	96	196	111	181	135	158
Trabajo penoso	142	282	153	270	176	247

Nota. Valores del calor sensible y latente para las diferentes actividades que realiza las personas dentro del recinto donde se encuentre a evaluar. Tomado de *gu\u00eda para el c\u00e1lculo de las cargas t\u00e9rmicas*, por IngeMec\u00e1nica, s.f., <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn255.html>.

- **Carga por electrodom\u00e9sticos:**

Ahora, para hallar el calor por aparatos electrónicos o componentes se usa la siguiente ecuación:

$$Q_{se} = \sum Pot_{electrodomesticos} * 0.75 \quad (16)$$

En la eq (16), se hace una sumatoria de la potencia de todos los componentes electrónicos en la unidad residencial, multiplicado por un factor de simultaneidad, dado que no se asumirá que todos no estarán encendidos a la vez.

2.3.1.2 Cálculo del calor latente

Para el cálculo de la carga térmica latente se usa la siguiente ecuación:

$$Q_l = Q_{li} + Q_{lp} \quad (17)$$

Donde:

Q_l = Carga térmica por calor latente [kW].

Q_{sp} = Carga térmica por infiltraciones de aire [kW].

Q_{se} = Carga térmica por ocupación de personas [kW].

- **Carga latente por infiltraciones de aire:**

Ahora se halla la carga por infiltraciones de aire:

$$Q_{li} = V * \rho_{aire} * C_{l,agua} * \Delta W \quad (18)$$

Donde:

V = Caudal infiltrado de aire $\left[\frac{m^3}{s}\right]$.

ρ_{aire} = densidad del aire $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$.

$C_{l,agua}$ = Calor latente específico del agua $\left[\frac{kJ}{kg}\right]$.

ΔW = Diferencia de humedad absoluta entre el ambiente exterior e interior

En la eq (18), para hallar el caudal infiltrado de aire se usará los pasos en la eq (10), junto con la información en la Tabla 3. La densidad del aire y el calor específico se hallarán en base a la temperatura de película para ingresar en las tablas del libro del (Cengel Y.A., 2013) tomados de la página (880-886).

- **Carga latente por ocupación de personas:**

Para hallar el calor latente por la ocupación de personas, se usa la siguiente ecuación:

$$Q_{lp} = n * C_{latente, personas} \quad (19)$$

Donde:

n = número de personas.

$$C_{l, agua} = \text{Calor latente por persona} \left[\frac{kCal}{h} \right].$$

En la eq (19), para hallar el calor latente por persona se hará uso de la Tabla 4, en donde se medirá la temperatura y el grado de actividad que realicen.

2.3.2 Cálculo de carga térmica para el fotobiorreactor

En esta sección se hará el análisis de las cargas térmicas para el fotobiorreactor. Primero se calcula el balance de energía en el sistema:

$$Q_{neto, reactor} = Q_{rad, solar} - Q_{con, tubos} - Q_{rad, tubos} + Q_{masa} \quad (20)$$

Donde:

$Q_{neto, reactor}$ = Carga térmica neta en el fotobiorreactor [kW].

$Q_{rad, solar}$ = Calor por radiación solar [kW].

$Q_{con, tubos}$ = Calor por convección en los tubos [kW].

$Q_{rad, tubos}$ = Calor por radiación en tubos [kW].

Q_{masa} = Calor masico generado por las microalgas [kW].

Ahora se halla cada una de las variables para el calor neto.

- **Calor por radiación solar:**

La carga por radiación solar, es la radiación solar que ingresa al sistema por medio del ambiente. Para calcularla, se usa la siguiente ecuación:

$$Q_{rad,solar} = G * \tau * \alpha * A_{proyectada} \quad (21)$$

Donde:

G = Irradiancia solar $\left[\frac{W}{m^2}\right]$.

τ = Absortividad.

α = Transmisividad.

$A_{proyectada}$ = Área proyectada [m^2].

En la eq (21), se tiene G , como la irradiancia que entra en el sistema a la cierta cantidad de horas que esta el sistema expuesto a la radiación solar. El área proyectada; será un área cuadrada forma entre los tubos colocado de forma paralela, en donde se dará $A=(n*L*D)$. Teniendo n el número de tubos, L la longitud del tubo, y D el diámetro del tubo.

- **Calor por convección en los tubos:**

Para calcular la carga de convección entre los tubos se usa la siguiente ecuación:

$$Q_{con,tubos} = h * A_s * (T_s - T_{\infty}) * n \quad (22)$$

Donde:

h = Coeficiente de transferencia de calor por convección $\left[\frac{W}{m^2 * ^\circ C}\right]$.

A_s = Área superficial de un tubo [m^2].

T_s = Temperatura de superficie [$^{\circ}C$].

T_{∞} = Temperatura del ambiente [$^{\circ}C$].

n = Numero de tubos.

En la eq (22), se tiene el cálculo de la carga por convección, en ello el área superficial será el área de superficie que tiene cada uno de los tubos. Para el cálculo del coeficiente de transferencia primero se hallan las propiedades del agua con la temperatura de película ($\rho, K, C_p, \nu, Pr, \beta$), tomadas en las tablas del libro del (Cengel Y.A., 2013) de las páginas (880-886). Con esas propiedades, se calcula el Rayleigh para una configuración de tubos con un diámetro:

$$R_{aD} = \frac{g * \beta * (T_s - T_\infty) * D^3 * Pr}{\nu^2} \quad (23)$$

En donde:

g = gravedad $\left[\frac{m^2}{s}\right]$.

β = Coeficiente de expansión térmica $\left[\frac{1}{K}\right]$.

T_s = Temperatura de superficie $[^\circ C]$.

T_∞ = Temperatura del ambiente $[^\circ C]$.

D = Diámetro del tubo $[m]$.

Pr = Numero de Prandlt.

ν = Viscosidad cinemática del fluido $\left[\frac{m^2}{s}\right]$.

En la eq (23), luego de hallar el número de Rayleigh, se procede a calcular el número de Nusselt con una configuración de tubos horizontales:

$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 R_{aD}^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (24)$$

Con el número de Nusselt hallado en la eq (24), se calcula el coeficiente de transferencia de calor por convección (h):

$$h = \frac{k * Nu}{D} \quad (25)$$

Donde:

k = Conductividad térmica del fluido $\left[\frac{W}{m * ^\circ C} \right]$.

Nu = Número de Nusselt.

D = Diámetro del tubo [m].

Con la eq (25), se reemplaza luego en la eq (22) los valores para hallar la convección natural para cada uno de los tubos.

- **Calor por radiación emitida por los tubos:**

En esta sección se revisa el calor que genera por radiación en cada uno de los tubos del sistema, se calcula con la siguiente ecuación:

$$Q_{rad,tubos} = n * \epsilon * \sigma * A_s * (T_o^4 - T_\infty^4) \quad (26)$$

Donde:

ϵ = Emisividad de la superficie.

σ = Constante de Stefan-Boltzmann $\left[\frac{W}{m^2 * K^4} \right]$

A_s = Área superficial del tubo [m²].

n = número de tubos

T_o = Temperatura de superficie [°C].

T_∞ = Temperatura del ambiente [°C].

- **Calor masico generado por las microalgas:**

En el sistema de transporte de microalgas, estas van a generar una pérdida de calor por medio del flujo masico, se calcula de la siguiente manera:

$$Q_{masa} = \dot{m} * C_p * \Delta T \quad (27)$$

Donde:

\dot{m} = Flujo masico de la mezcla de agua con microalgas $\left[\frac{kg}{s}\right]$.

C_p = Calor especifico del agua $\left[\frac{J}{kg * ^\circ C}\right]$

ΔT = El cambio de temperatura entre el exterior y el interior [$^\circ C$].

Ahora con el cálculo de las cargas térmicas en un recinto sin fotobiorreactor y luego la carga para el sistema, se procede a hallar la diferencia entre estos para ver cuanto reduce la carga térmica con la implementación de un sistema de captación de CO₂:

$$Q_{total} = Q_{neto,casa} - Q_{neto,reactor} \quad (28)$$

Ese sería el valor de la reducción de carga térmica para un sistema con la implementación de un fotobiorreactor.

2.4 Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos funcionan en una población de soluciones potenciales (individuos), usualmente codificadas como cadenas binarias, aunque también pueden ser representadas de manera auténtica o completa. El progreso de estas soluciones se realiza a través de un proceso iterativo que replica los procesos biológicos de selección natural, cruce (crossover) y transformación.

Así mismo, son un elemento muy importante para procesos de optimización, dada su versatilidad en la elección de la mejor propuesta. (Goldberg, 1989). Este proceso de selección por

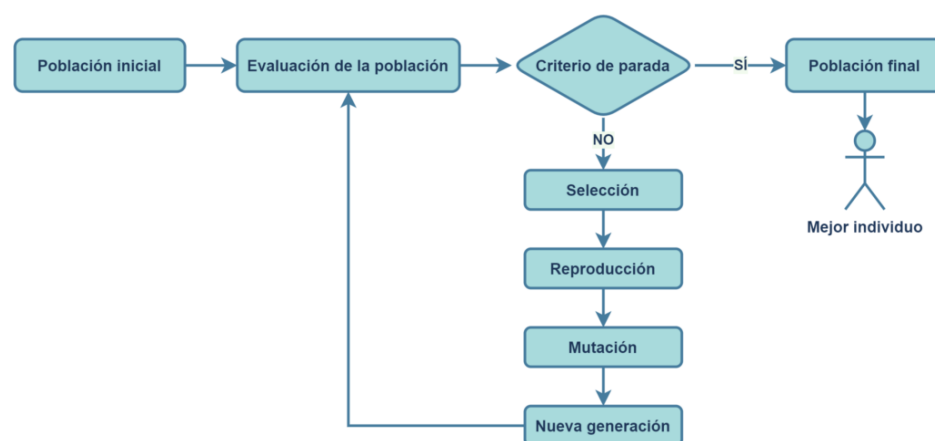
medio de algoritmos genético se hará en el programa de Matlab. Por lo tanto, un algoritmo genético tiene los siguientes pasos:

- 1) **Inicialización:** n
- 2) **Evaluación:** Se calcula la aptitud o fitness de cada individuo con base en una función objetivo $f(x)$.
- 3) **Selección:** Se eligen los mejores individuos para reproducirse, en selección tipo cromosoma.
- 4) **Cruce:** Se combinan pares de padres para generar nuevos individuos.
- 5) **Mutación:** Se introducen pequeñas alteraciones aleatorias para mantener la diversidad genética.
- 6) **Reemplazo:** Se forma una nueva población.
- 7) **Criterio de paro:** El algoritmo se detiene cuando se cumple una condición.

En la Figura 5, se ilustra el diagrama de flujo para el paso a paso a seguir para la implementación de un algoritmo genético, como es usado en este proyecto.

Figura 5

Diagrama de flujo para algoritmos genéticos.



La representación de individuos se puede dar en vectores reales, binarios o enteros. Para una representación de 3 variables como en el proyecto será de un vector real (o punto flotante):

$$x = [x_1, x_2, x_3] \in \mathbb{R}^3 \quad (29)$$

En donde los cromosomas son representados como secuencias de números de punto flotante. Esto se utiliza cuando las soluciones deben estar en un rango continuo de valores. Luego de generar la población inicial aleatoria, se calcula la función objetivo o fitness en base al objetivo de optimización, $Fitness(x)=f(x)$. Teniendo que para las condiciones de mínimos y máximos para lo que se exprese en el problema, se usa:

$$Fitness(x) = \frac{1}{1 + f(x)} \quad (30)$$

En la eq (29), se le denomina una función objetivo. Para la selección de la mejor propuesta. se usa el método de la ruleta en donde es una forma de selección proporcional a la aptitud en la que la probabilidad de que un individuo sea seleccionado es proporcional a la diferencia entre su aptitud y la de sus competidores. Usando la siguiente ecuación:

$$P_i = \frac{f(x_i)}{\sum_{j=1}^N f(x_j)} \quad (31)$$

Donde:

P_i = Probabilidad de selección del individuo.

$f(x_i)$ = Aptitud del individuo (fitness).

N = Tamaño de la población.

Luego de la selección, se hace el cruce de los pares para identificar que solución continua en el algoritmo. Se utiliza el cruce disperso dado que este procedimiento produce un nuevo ser humano al combinar de manera aleatoria los genes de ambos progenitores, empleando una máscara

binaria aleatoria. Es apropiado cuando las variables se representan de manera auténtica y se necesita preservar la diversidad en la población (Sancho, s/f). Teniendo la siguiente formula:

$$M = [m_1, m_2, \dots, m_n] \text{ en donde } m_i \in \{0,1\} \quad (32)$$

Teniendo que:

$$Hijo_i = m_i * Padre_1^i + (1 - m_i) * Padre_2^i \quad (33)$$

En donde se halla el mejor gen en base a los pares que se tiene de los padres. Para la mutación se usará una adaptativa factible en donde este operador elige una nueva solución próxima a la persona actual, asegurándose de que respete los límites y limitaciones del problema. Es óptimo en situaciones con limitaciones no lineales, como la estructura del fotobiorreactor. Para ello Se calcula una pequeña variación aleatoria dentro del espacio de búsqueda factible y con el tamaño de la variación puede reducirse con el tiempo (adaptación). La configuración en Matlab para la operación del algoritmo sería la siguiente:

```
options = optimoptions('ga', ...
    'CrossoverFcn', @crossoverscattered, ...
    'MutationFcn', @mutationadaptfeasible, ...
    'SelectionFcn', @selectionstochunif);
```

Para el reemplazo, se da luego de la mutación buscando los mejores pares genéticos. Así mismo, los criterios de paro para un algoritmo genético en donde se puede detener cuando se da cuando se cumple alguna de las siguientes condiciones: Número máximo de generaciones alcanzado, convergencia del valor de aptitud (fitness), cambio pequeño entre generaciones sucesivas.

3 Diseño Conceptual

Para el diseño del fotobiorreactor, se plantean diversas alternativas de solución, seleccionando aquellas que mejor cumplan con los parámetros establecidos para el diseño y del cliente mediante una matriz QFD. Para ello, se evaluarán los criterios clave que garanticen la optimización del diseño, para los siguientes subsistemas: microalgas y fotobiorreactores. Por medio de una ponderación se hará una toma de decisiones más precisa al evaluar de manera individual los factores específicos que afectan cada subsistema.

3.1 Alternativas para microalgas

En el sistema de microalgas, existen Se consideran las siguientes alternativas para las microalgas utilizadas en el fotobiorreactor. A su vez, se realizará una QFD, para seleccionar la de mejor rendimiento:

3.1.1 *Scenedesmus obliquus*

Scenedesmus obliquus es una microalga verde unicelular de rápido crecimiento y alta eficiencia en la captación de CO₂, utilizada en biotecnología para la producción de biomasa, bioenergía y tratamiento de aguas residuales (Ruiz-Marín et al., 2011). Su composición rica en proteínas (40-50%), lípidos (10-30%) y carbohidratos (10-20%) la hace ideal para aplicaciones industriales. Es resistente a variaciones ambientales y se adapta bien a fotobiorreactores de alta intensidad lumínica, siempre que se mantenga un adecuado suministro de CO₂ y nutrientes como nitrógeno y fósforo para optimizar su rendimiento (Martínez et al., 2005). A continuación, en la Tabla 5, se presenta los requerimientos técnicos y operacionales esenciales para la implementación de la microalga *Scenedesmus obliquus*, junto con el rango de valores máximos, mínimos y óptimos en el que se puede utilizar:

Tabla 5Requerimientos técnicos y operacionales para la *Scenedesmus*.

Requerimientos	Mínimo	Óptimo	Máximo	Unidades
Captura de CO ₂	0.5	1.2	2.0	g CO ₂ /L día
Producción de biomasa	0.1	0.3	0.6	g/L día
Demanda energética	0	≤ 3.5	5	kWh/m ³
Temperatura de operación	15	25-30	38	°C
Radiación solar absorbida	150	200-250	300	μmol fotones/m ² /s
Área de ocupación	-	≤ 75	75	m ²
Susceptibilidad a plagas		Muy baja	-	-
pH del medio	6.5	7-8	8.5	-
Oxígeno disuelto	5	7-10	12	mg/L
Velocidad de flujo	0.02	0.1-0.3	0.05	m/s
Caudal de operación	5	10-15	20	L/min
(Nitrógeno - N)	10	50-100	150	mg/L
(Fósforo - P)	0.5	1-3	5	mg/L

3.1.2 *Chlorella vulgaris*

Chlorella vulgaris es una microalga de forma esférica unicelular que forma parte del conjunto de clorofíceas. Aproximadamente tiene un diámetro de 2 a 10 μm y cuenta con una pared celular abundante en celulosa, lo que proporciona resistencia ante condiciones ambientales desfavorables. Su metabolismo autotrófico le facilita la absorción de CO₂ del entorno y su conversión a biomasa a través de la fotosíntesis. Además, posee un elevado contenido de proteínas

(hasta el 60% de su peso seco), lípidos y carbohidratos, lo que la convierte en una magnífica fuente de biomoléculas para múltiples usos industriales (Hernández-Pérez & Labbé, 2014b). A continuación, en la Tabla 6, se presenta los requerimientos técnicos y operacionales esenciales para la implementación de la microalga *Chlorella Vulgaris*, junto con el rango de valores máximos, mínimos y óptimos en el que se puede utilizar:

Tabla 6

Requerimientos técnicos y operacionales para la *Chlorella*.

Requerimiento	Mínimo	Óptimo	Máximo	Unidades
Captura de CO ₂	0.5	1.5	2.5	g CO ₂ /L·día
Producción de biomasa	0.1	1.0	1.5	g/L·día
Demanda energética	0.1	≤1.0	2.0	kWh/m ² ·día
Temperatura de operación	15	25–30	35	°C
Radiación solar absorbida	100	300–500	1000	μmol fotones/m ² ·s
Área de ocupación	1	≤50	75	m ²
Susceptibilidad a plagas	Baja			
pH del medio	6.5	6.8–7.5	8.5	- (pH)
Oxígeno disuelto	2	6–10	20	mg/L
Velocidad de flujo	0.05	0.1–0.3	0.5	m/s
Caudal de operación	0.001	0.01–0.02	0.05	m ³ /s
(N - Nitrógeno)	20	80–150	250	mg N/L
(P - Fósforo)	1	3–10	30	mg P/L

3.1.3 *Spirulina*

La microalga *Spirulina* es una variedad de cianobacteria filamentosa de forma espiralada, muy estudiada por su elevado valor nutricional y sus usos en varias industrias. Incluye el género *Arthrospira*, con las especies *Arthrospira platensis* y *Arthrospira maxima* siendo las más empleadas en la biotecnología. Su composición le facilita florecer en entornos alcalinos, con un pH de 8 a 11, y temperaturas ideales de crecimiento entre 30 y 35°C (13). Además, constituye una opción sustentable para una variedad de usos biotecnológicos, desde la nutrición hasta la bioenergía y el tratamiento de aguas (Huarachi Olivera et al., 2015). A continuación, en la Tabla 7, se presenta los requerimientos técnicos y operacionales, esenciales para la implementación de la microalga *Spirulina*, junto con el rango de valores máximos, mínimos y óptimos en el que se puede utilizar:

Tabla 7

Requerimientos técnicos y operacionales para la *Spirulina*.

Requerimiento	Mínimo	Máximo	Óptimo	Unidades
Captura de CO ₂	0.3	2.0	1.2	g CO ₂ /L·día
Producción de biomasa	0.1	1.2	0.7–1.0	g/L·día
Demanda energética	0.1	1.8	≤1.0	kWh/m ² ·día
Temperatura de operación	20	40	30–35	°C
Radiación solar absorbida	80	1200	300–600	μmol fotones/m ² ·s
Área de ocupación	1	75	≤50	m ²
Susceptibilidad a plagas	Media	Alta	Media	Cualitativa
pH del medio	8.0	11.0	9.5–10.5	- (pH)
Oxígeno disuelto	2	15	6–9	mg/L
Velocidad de flujo	0.05	0.3	0.1–0.2	m/s

Caudal de operación	0.001	0.03	0.01–0.02	m ³ /s
(N - Nitrógeno)	10	200	60–120	mg N/L
(P - Fósforo)	0.5	20	3–8	mg P/L

3.2 Matriz QFD para microalgas

Para la determinación de la mejor opción, se realizó una matriz QFD basada en los requerimientos técnicos y operacionales mostradas en las alternativas, con ello se revisó los parámetros más importantes para la implementación de las microalgas. Donde primero, se determinó los requerimientos de diseño: Diseño, productividad, iluminación, económico, biológico, mantenibilidad, ambiental, colocados en un eje horizontal en la matriz. Luego, se pasó a los requerimientos del cliente: Captura de CO₂, producción de biomasa, tasa de crecimiento, temperatura de operación, radiación solar absorbida, área de ocupación, susceptibilidad a plagas, pH del medio, oxígeno disuelto, colocados en un eje vertical en la matriz.

Con estos valores, se les dieron un orden de importancia de 1 a 9 de orden descendente para mostrar la importancia de cada requerimiento, para luego evaluar el peso de cada requerimiento, usando una relación clásica para QFD de (0,1,3,9), tomando como 0 el punto más bajo y el 9 con el número más alto de importancia. Esta información es mostrada y evaluada en la Tabla 8, para la matriz QFD de las microalgas, donde al final se colocarán los totales para cada peso de requerimiento y así elegir las mejores opciones.

Tabla 8

Matriz QFD para microalgas.

Requerimientos del cliente		Requerimientos de diseño													
		Diseño		Productividad		Iluminación		Económico		Biológicos		Mantenibilidad		Ambiental	
	Importancia	Relación	Peso	Relación	Peso	Relación	Peso	Relación	Peso	Relación	Peso	Relación	Peso	Relación	Peso
Captura de CO ₂	9	9	81	3	27	1	9	3	27	3	27	3	27	9	81
Producción de biomasa	8	9	72	3	24	3	24	3	24	3	24	9	72	9	72
Tasa de crecimiento	7	9	63	3	21	3	21	3	21	3	21	3	21	9	63
Temperatura de operación	6	3	18	3	18	3	18	3	18	3	18	3	18	3	18
Radiación solar absorbida	5	3	15	1	5	1	5	3	15	3	15	3	15	3	15
Área de ocupación	4	1	4	3	12	9	36	1	4	3	12	3	12	3	12
Susceptibilidad a plagas	3	1	3	1	3	1	3	3	9	3	9	3	9	3	9
pH del medio	2	1	2	1	2	1	2	1	2	3	6	3	6	1	2
Oxígeno disuelto	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	1	1
TOTAL			259		113		119		121		133		183		273

Tomando los valores totales de la Tabla 8, se seleccionó los 4 valores más altos, dado que serán los requerimientos de diseño u de operación, más importante a tomar en cuenta para las microalgas. Entonces, para seleccionar la microalga más adecuada, se utilizó un sistema de calificación del 1 al 5, donde 1 representa un desempeño bajo y 5 un desempeño alto en cada criterio clave. Así mismo, cada requerimiento de diseño seleccionado, se le dará un valor de porcentaje para medir su nivel de importancia, luego dándole una nota para evaluar el peso de cada y seleccionar la mejor alternativa.

Se evaluaron aspectos como la velocidad de crecimiento, la eficiencia en la conversión de CO₂, la resistencia a cambios ambientales y la facilidad de cosecha. Este método permitió una comparación objetiva y cuantificable entre las diferentes especies de microalgas analizada. En la Tabla 9, se muestra los valores de ponderación junto con su nota final para elegir la mejor alternativa.

Tabla 9

Ponderación para el QFD de microalgas.

	Puntaje QFD	%	Scenedesmus		Chlorella		Spirulina	
			Nota	Peso	Nota	Peso	Nota	Peso
Ambiental	273	0,32	4	1,29	5	1,61	4	1,29
Diseño	259	0,31	5	1,53	5	1,53	4	1,22
Mantenibilidad	183	0,22	4	0,86	4	0,86	3	0,65
Biológicos	133	0,16	3	0,47	4	0,63	2	0,31
Total	848	1,00		4,15		4,63		3,47

En este proyecto, se eligió la microalga *Chlorella Vulgaris* porque, en comparación con otras especies que se utilizan frecuentemente en fotobiorreactores, tiene un equilibrio ideal entre viabilidad económica, adaptabilidad al ambiente y eficacia técnica. En primer lugar, se distingue por su alta eficacia en la captura de CO₂, con tasas reportadas que alcanzan hasta 1.8 g CO₂/L·día, y por tolerar concentraciones altas de este gas 10-15% (Klinthong et al., 2015).

Asimismo, presenta una gran capacidad de adaptación a diferentes condiciones ambientales, tolerando rangos amplios de temperatura (20–35 °C), pH (6.5–8.5) e intensidades lumínicas, lo cual favorece su cultivo en regiones tropicales como Bucaramanga, donde el sistema estará expuesto a variaciones climáticas. Esta robustez reduce riesgos de pérdida de cultivo frente a especies más exigentes como *Spirulina*, que requiere pH alcalinos elevados ≥ 9.5 y temperaturas más controladas. (Hernández-Pérez & Labbé, 2014a)

Un factor adicional es el valor agregado de su biomasa. *Chlorella vulgaris* contiene entre un 45–60% de proteínas, además de carbohidratos, lípidos y antioxidantes, lo que la convierte en materia prima versátil para aplicaciones en nutrición humana y animal, biofertilizantes, biocombustibles y la industria cosmética. Este abanico de usos incrementa la viabilidad económica del sistema, al no limitarse únicamente a la captura de CO₂.(María Teresa Cadenas González, 2022) Por último, *Chlorella* es una de las microalgas más investigadas y cultivadas en todo el mundo, con protocolos estandarizados para la cosecha, el cultivo y el procesamiento. Esto disminuye la incertidumbre técnica al implementar un fotobiorreactor.

3.3 Alternativas para fotobiorreactores

El fotobiorreactor es la pieza principal, dado que es la máquina que se usará para el transporte de las microalgas, lo cual también tiene la función de captar CO₂ junto con la reducción de carga térmica para una unidad residencial. Así mismo, para hallar la mejor alternativa, se hará del uso de una matriz QFD en donde se evaluarán los criterios de diseño y del cliente. También, se hará uso de una ponderación para el puntaje del QFD, para elegir la mejor solución. Entonces se muestran las 3 alternativas más usadas para un fotobiorreactor:

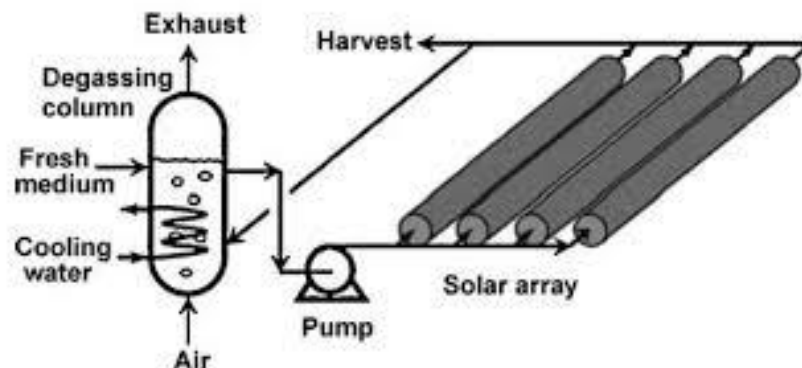
3.3.1 Fotobiorreactor tubular

Un fotobiorreactor tubular es un sistema cerrado destinado al cultivo de microalgas que utiliza energía solar como fuente de luz, y su estructura consta de tubos transparentes a través de los cuales fluye el medio de cultivo. Estos fotobiorreactores son los más adecuados para cultivos en exteriores bajo la acción de la radiación solar. Se compone de un colector solar, conformado por tubos rectos transparentes -de plástico o vidrio-, cuya su función es capturar la mayor cantidad de luz solar posible para el cultivo microalgas presente en su interior.(Guillermo et al., s/f). En la Figura 6, se muestra el esquema que contiene todo el proceso que recorre las microalgas dentro

del fotobiorreactor junto con los elementos necesarios para su construcción como lo son la bomba, la zona de recolección y desgasificación

Figura 6

Esquema de un fotobiorreactor tubular.



Nota. Esquema de un fotobiorreactor tubular. Tomado de *Fotobiorreactores, técnicas y parámetros implicados en la producción de biocombustibles de origen microalgal* (pág. 15), por Arribas Andrea, 2020, Universidad de Valladolid.

En la figura 6, se puede apreciar el diseño de un fotobiorreactor tubular, el cual contiene un tanque o columna de desgasificación que se recibe de la mezcla proveniente del receptor solar. También se tiene una bomba, donde se genera el movimiento para el transporte de las microalgas de microalgas. Así mismo, se introduce un inyector Venturi para generar ingreso de oxígeno al sistema para mantener las condiciones de supervivencia de la microalga. Toda esta mezcla y aire circula por medio de un sistema tubular el cual debe ser transparente para tener absorción solar y permitir el crecimiento de la microalga (Arribas, 2020).

El nivel de luz solar en la zona de los colectores solares se conserva estable durante todo el año, lo que suprime la necesidad de incluir fuentes de iluminación artificial. Sin embargo, este tipo de sistema tiene algunas restricciones, tales como una eficacia reducida en la transferencia de masa, altos niveles de pH y oxígeno en la mezcla, y problemas para conservar una concentración

correcta de dióxido de carbono disuelto en los tubos. Pero dado que el objetivo es reducir la cantidad de CO₂, esto es una alternativa de solución. Finalmente, los fotobiorreactores tubulares son los más sofisticados y los más especializados, pero son también económicamente menos factibles por su construcción (Ramírez, 2017). El diseño de este reactor, consiste de dos partes: lazo y desgasificador:

Lazo: Es el segmento donde se realiza la recolección de energía solar. Se conoce como "lazo" debido a que es un tubo ordenado de tal forma que brinde una forma compacta, lo que necesita codos y curvas. El lazo está diseñado específicamente para absorber la luz, sin necesidad de tener en cuenta los intercambios de calor o materia, lo que facilita la optimización de la productividad y potencia la eficiencia fotosintética.

Desgasificador: Es el componente donde ocurre el intercambio de materia, en particular la liberación de O₂ y generación de CO₂. Cuando el sistema entra en funcionamiento por el transporte de materia por la bomba, la zona de desgasificador almacena el producto y libera los gases que puedan afectar la mezcla, para mantener condiciones de operación.

A continuación, en la Tabla 10, se presenta los requerimientos técnicos y operacionales para un fotobiorreactor tubular más esenciales para el diseño y puesta en marcha., junto con sus valores mínimos, máximos y óptimos:

Tabla 10

Parámetros para un fotobiorreactor tubular.

Parámetro	Mínimo	Máximo	Óptimo	Unidades
Diámetro del tubo	0.01	0.06	0.04	m
Longitud del tubo	1	8	4	m
Material del tubo	—	—	Vidrio borosilicato o policarbonato	—
Volumen del sistema	1	4	1.5	m ³
Velocidad del fluido	0.1	0.5	0.2	m/s
Iluminación	100	1200	300 – 800	μmol fotones/m ² ·s
Densidad celular	0.5	8	2	kg/m ³
pH del medio	7	10	8	—
Temperatura óptima	20	35	30	°C
CO ₂ suministrado	—	—	1–5	% v/v
Oxígeno disuelto	150 %.	300 %.	≤200 %.	% saturación
Modo de operación			semicontinuo	—
Tiempo de residencia	2	5	3	días
Eficiencia conversión luz	—	—	Alta	—
Irradiancia solar	300	1200	700	μmol fotones/m ² ·s

3.3.2 *Fotobiorreactor de placa*

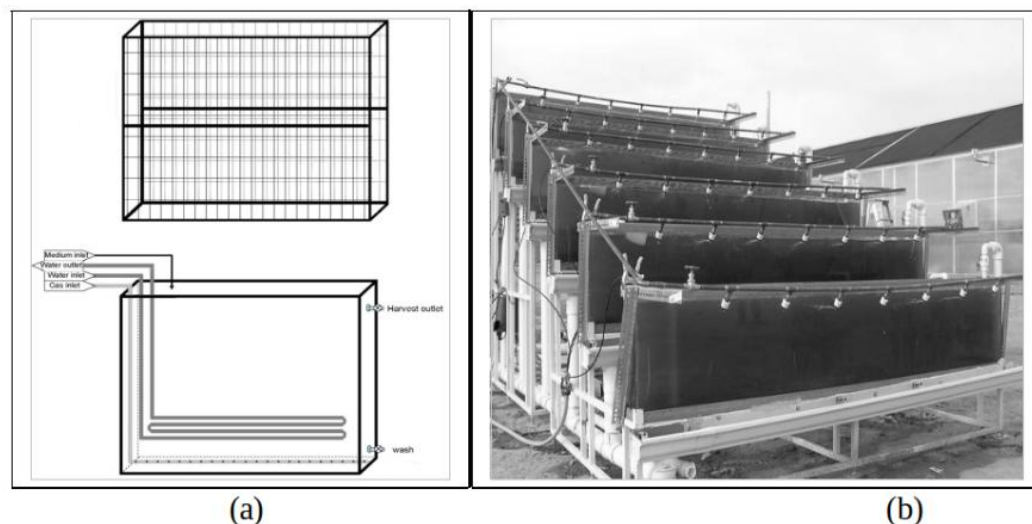
Un fotobiorreactor de placa plana es un sistema cerrado creado para el cultivo de microalgas, cianobacterias u otros microorganismos fotosintéticos, empleando un medio de cultivo plano y delgado. Su propósito es maximizar la exposición a la luz solar o artificial y mejorar la eficiencia fotosintética. Estos sistemas reúnen importantes requerimientos para a la producción de biomasa a partir de microalgas y cianobacterias, tomando mayor área superficial expuestas a la luz, y además pueden ser orientados fácilmente de acuerdo la hora del día y su ubicación

geográfica. Están diseñados para hacer un uso eficiente de luz solar, sus paneles están contruidos de tal manera que la relación superficie volumen es grande. La agitación puede ser por burbujeo de aire por uno de sus lados a través de un tubo perforado o por rotación mecánica a través de un motor (Muñiz, 2019).

Una de las características fundamentales en su operación es la correcta disposición del medio de cultivo dentro del sistema. Para lograrlo, se utilizan bombas o sistemas de agitación neumática que producen un flujo turbulento regulado, previniendo la sedimentación de las células y garantizando una combinación uniforme de nutrientes y gases disueltos. Sin embargo, un reto en este tipo de fotobiorreactor radica en la creación de gradientes de temperatura y la acumulación específica de oxígeno, lo cual puede influir en el crecimiento ideal de los microorganismos (Maria et al., 2017). La figura 7, muestra en la sección a) un esquema de del sistema por placas, y en la sección b) muestra un fotobiorreactor de placas en puesta en marcha. En ello se puede ver el proceso que se recorre para generar la producción de microalgas, esto se utilizan para producir biomasa que para una reducción térmica.

Figura 7

Esquema de un fotobiorreactor de placas.



Nota. Fotobiorreactor de placas. Tomado de *Viabilidad en la producción de biomasa microalgal a partir de fotobiorreactores solares en el Valle del Cauca, Colombia*, por J. L. Ramírez Duque, 2017, *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(2), p. 136. <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/2039>. Bajo licencia CC BY-NC-SA.

En La figura 7, muestra los dispositivos de cultivo de cultivo, donde se emplean placas planas verticales traslúcidas que facilitan la iluminación a ambos lados. Usualmente, poseen un sistema de agitación por aireación que remueve los excesos de oxígeno en el proceso de cultivo. El mayor beneficio de este tipo de fotobiorreactor es que proporcionan una disponibilidad constante de luz en el cultivo, dado que este sistema no posee tuberías de distribución ni depósito de gasificación. A continuación, en la Tabla 11, se presenta los requerimientos técnicos y operacionales para un fotobiorreactor tubular más esenciales para el diseño y puesta en marcha., junto con sus valores mínimos, máximos y óptimos:

Tabla 11

Parámetros para un fotobiorreactor de placas.

Parámetro	Mínimo	Máximo	Óptimo	Unidades
Espesor del panel	10	50	20 – 30	mm
Altura del panel	0.5	2.0	1.0 – 1.5	m
Material del panel	—	—	Vidrio o policarbonato	—
Volumen del sistema	4.5	1000	50 – 500	L
Velocidad del flujo	0.01	0.1	0.03 – 0.05	m/s
Iluminación	100	1200	300 – 800	$\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$

Densidad celular	0.5	3.0	1.0 – 2.0	g/L
pH del medio	6.5	9.0	7.5 – 8.5	—
Temperatura óptima	20	35	25 – 30	°C
CO ₂ suministrado	1.0	5.0	1.5 – 3.0	% v/v
Oxígeno disuelto	100	300	≤ 200	% saturación
Relación S/V	10	40	20 – 30	m ² /m ³
Modo de operación	Semicontinuo			—
Tiempo de cosecha	1	5	3	Día

3.3.3 *Fotobiorreactor de columna de burbuja*

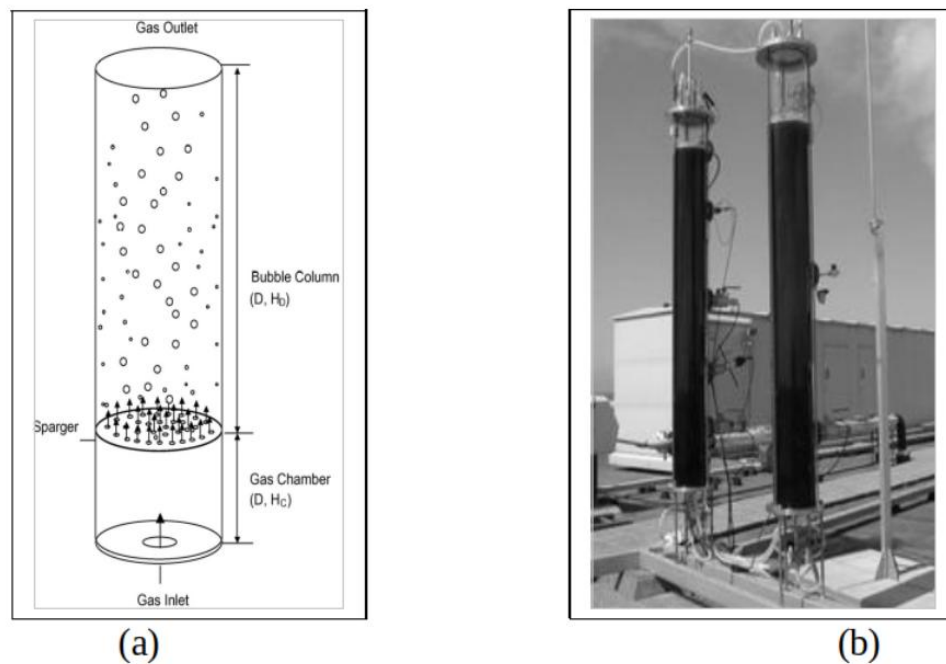
Un fotobiorreactor de columna de burbuja es un sistema cerrado empleado en el cultivo de microalgas u otros seres fotosintéticos. En este, el medio de cultivo se agita y se airea a través de la constante burbuja de un gas (usualmente una combinación de aire y CO₂) que se inserta desde la parte baja de la columna. Los fotobiorreactores de columna de burbujas se distinguen por su tamaño reducido -ocupan espacio en base y altura-, su bajo costo y su fácil manejo. Además, son altamente promisorios para el cultivo a gran escala de microalgas(Alonso, 2012).

Los fotobiorreactores de columna de aire que utilizan un sistema de bombeo de aire comprimido tienen la capacidad de lograr una concentración final de biomasa y una tasa de crecimiento determinada, muy parecidas a las obtenidas con los fotobiorreactores tubulares. Estos sistemas poseen múltiples beneficios, entre los que se incluyen la elevada transferencia de masa, una excelente agitación con esfuerzos de corte reducidos, lo que resulta en una excelente mezcla y aireación, un consumo energético reducido, una limpieza y esterilización sencillas, un control apropiado de la temperatura del medio de cultivo y una disminución de la foto-inhibición y foto-

oxidación (Guerrero et al., 2017). La figura 7 muestra en la sección a) un esquema de del sistema por columna de burbujas, y en la sección b) muestra un fotobiorreactor de columna de burbujas puesto en marcha.

Figura 8

Esquema de un fotobiorreactor de columna de burbuja.



Nota. Fotobiorreactor de columna de burbuja Tomado de *Viabilidad en la producción de biomasa microalgal a partir de fotobiorreactores solares en el Valle del Cauca, Colombia*, por J. L. Ramírez Duque, 2017, *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 8(2), p. 137. <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/2039>. Bajo licencia CC BY-NC-SA.

La figura 7 ilustra un fotobiorreactor de columna de burbuja, cuyo diseño se basa en un contenedor vertical, usualmente de forma cilíndrica y transparente, fabricado con materiales como vidrio o plásticos de elevada transmitancia óptica, lo que posibilita una exposición homogénea a la luz y promueve la fotosíntesis. Se aplica a través de la inyección de un flujo de gas (usualmente

aire enriquecido con dióxido de carbono) en la base del sistema, provocando un flujo ascendente de burbujas a través del medio de cultivo en estado líquido.

Este movimiento provoca una circulación natural que sostiene en suspensión las células de microalgas, promoviendo una distribución uniforme de los nutrientes, la luz y los gases disueltos en el sistema (Antonio Echeverría et al., 2019). A continuación, en la Tabla 12, se presenta los requerimientos técnicos y operacionales para un fotobiorreactor tubular más esenciales para el diseño y puesta en marcha., junto con sus valores mínimos, máximos y óptimos:

Tabla 12

Parámetros para un fotobiorreactor de columna de burbujas.

Parámetro	Mínimo	Máximo	Óptimo	Unidad
Diámetro de la columna	5	20	10 – 12	cm
Altura de la columna	30	200	100 – 150	cm
Material del reactor	—	—	Vidrio / PC	—
Volumen del sistema	2	200	10 – 100	L
Velocidad del flujo de aire	0.1	1.0	0.3 – 0.6	vvm
Iluminación (PAR)	100	1200	300 – 800	$\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$
Densidad celular	0.5	4.0	1.0 – 2.0	g/L
pH del medio	6.5	9.0	7.5 – 8.5	—
Temperatura óptima	20	35	25 – 30	°C
CO ₂ suministrado	0.5	5.0	1.5 – 3.0	% v/v
Oxígeno disuelto (DO)	3.0	10.0	5.0 – 7.5	mg/L
Relación altura/diámetro (H/D)	3	20	10 – 15	—
Modo de operación			Semicontinuo	—

Tiempo de residencia	4	72	24 – 48	h
Eficiencia conversión de luz	1.0	10.0	3.0 – 6.0	%

3.4 Matriz QFD para fotobiorreactores

Para la determinación de la mejor opción, se realizó una matriz QFD. Donde primero, se determinó los requerimientos de diseño: Diseño, seguridad, tamaño del equipo, economía, capacidad de carga, mantenibilidad, ensamblaje. Luego, se pasó a los requerimientos del cliente: producción de biomasa, captura de CO₂, reducción de cargas térmicas, facilidad de operación, control preciso de parámetros de cultivo, espacio de ocupación, alta eficiencia lumínica, durabilidad, facilidad de cosecha. Con estos valores, se les dieron un orden de importancia del 1 al 10, para luego evaluar el peso de cada requerimiento, así como es mostrado en la tabla 13.

Con estos valores, se les dieron un orden de importancia de 1 a 9 de orden descendente para mostrar la importancia de cada requerimiento, para luego evaluar el peso de cada requerimiento, usando una relación clásica para QFD de (0,1,3,9), tomando como 0 el punto más bajo y el 9 con el número más alto de importancia. Se muestra a continuación la Tabla 13:

Tabla 13

Matriz QFD para fotobiorreactores.

Requerimientos del cliente		Requerimientos de diseño													
		Diseño		Seguridad		Tamaño del equipo		Economía		Capacidad de carga		Mantenibilidad		Ensamblaje	
	Importancia	Relación	Peso	Relación	Peso	Relación	Peso	Relación	Peso	Relación	Peso	Relación	Peso	Relación	Peso
Producción de biomasa	10	9	90	3	30	1	10	3	30	3	30	3	30	9	90
Captura de CO2	9	9	81	3	27	3	27	3	27	3	27	3	27	9	81
Reducción de cargas térmicas	8	9	72	3	24	3	24	9	72	3	24	3	24	9	72
Bajo coste operativo	7	9	63	3	21	3	21	9	63	3	21	3	21	3	21
Facilidad de operación	6	6	36	3	18	3	18	3	18	9	54	3	18	3	18
Control preciso de parámetros de cultivo	5	3	15	3	15	9	45	3	15	3	15	3	15	3	15
Espacio de ocupación	4	1	4	3	12	9	36	3	12	3	12	3	12	3	12
Alta eficiencia lumínica	3	9	27	1	3	1	3	3	9	3	9	3	9	1	3
Durabilidad	2	3	6	3	6	1	2	1	2	9	18		0		0
Facilidad de cosecha	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	1	1
TOTAL			395		157		187		249		213		159		313

En base a la matriz para el fotobiorreactor, mostrada en la Tabla 13, se seleccionaron los cuatro requerimientos de diseño con mayor puntuación en la matriz QFD, ya que estos presentan el mayor impacto en el desempeño del fotobiorreactor y la satisfacción de los requerimientos del cliente. Estos criterios son clave porque influyen directamente en la eficiencia operativa, el costo de implementación y la viabilidad del sistema en el contexto del proyecto.

Para evaluar las alternativas, se utilizó un sistema de calificación del 1 al 5, donde 1 representa un desempeño bajo y 5 un desempeño alto en cada requerimiento de diseño clave. La evaluación consideró la eficiencia del diseño, la facilidad de ensamblaje, el costo de operación y

la capacidad de carga. Cada alternativa fue ponderada de acuerdo con su desempeño en estos aspectos, lo que permitió una comparación objetiva y cuantificable. Todo esto fue colocado en la Tabla 14, en donde se eligió la alternativa con mayor peso que fue la tubular.

Tabla 14

Ponderación para el QFD de fotobiorreactores.

	Puntaje QFD	%	TUBULAR		PLACAS		BURBUJA	
			Nota	Peso	Nota	Peso	Nota	Peso
Diseño	395	0,34	5	1,69	4	1,35	3	1,01
Ensamblaje	313	0,27	5	1,34	3	0,80	3	0,80
Economía	249	0,21	4	0,85	3	0,64	3	0,64
Capacidad de carga	213	0,18	3	0,55	3	0,55	3	0,55
Total	1170	1,00		4,42		3,34		3,00

Tras el análisis de ponderación, el fotobiorreactor tubular consiguió la puntuación más alta gracias a su eficacia en la captura de CO₂ y la generación de biomasa, elementos esenciales en este proyecto. Su diseño facilita un uso más eficiente de la luz, incrementando así el ritmo de desarrollo de las microalgas. Además, ofrece una excelente relación entre los costos operativos y la facilidad de montaje, lo que lo hace una elección ideal tanto en términos técnicos como económicos.

Finalmente, las dos opciones seleccionadas por medio de un análisis conceptual, técnico y operacional junto con una matriz QFD son las siguientes opciones:

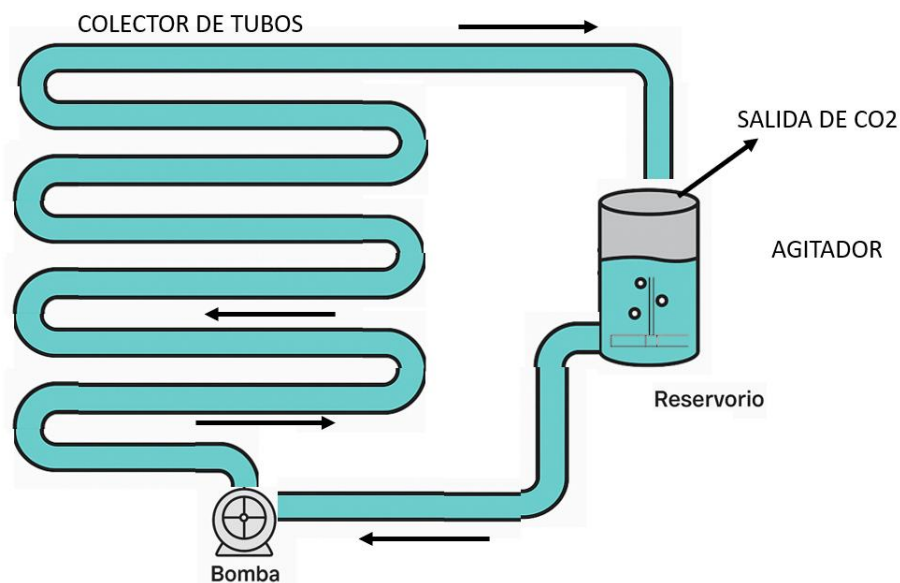
- **Microalga:** Chlorella Vulgaris.
- **Fotobiorreactor:** Tubular.

En la Figura 9, muestra el diseño conceptual de un fotobiorreactor tubular, en el que el cultivo de microalgas se propaga mediante un sistema de tubos propulsado por una bomba centrífuga. El sistema dispone de un depósito de desgasificación (reservorio), cuyo objetivo es eliminar el sobrante de oxígeno, CO₂ y otros gases acumulados durante el proceso de fotosintética.

Este diseño asegura condiciones ideales para el desarrollo de las microalgas, incrementando la eficacia en la captura de CO₂ y la generación de biomasa, mientras se asegura un flujo constante del medio como se vio en la Tablas 14 y 9.

Figura 9

Esquema de diseño conceptual para un fotobiorreactor tubular.



4 Algoritmo de optimización

El fotobiorreactor y la microalga seleccionada (Tubular, *Chlorella Vulgaris*), permite que se generen múltiples buenas soluciones para su diseño, dependiendo de los requerimientos de entrada y en donde sea su implementación. Para ello, se usará un algoritmo de optimización, dado que es parte fundamental ya que su construcción nos permitirá poder seleccionar la mejor solución entre un rango de valores establecidos para las variables de diseño requeridas. Entonces, para realizar una optimización se eligió algoritmos genéticos por medio del programa Matlab.

La selección de un algoritmo genético como técnica de optimización se basa en su carácter no lineal, multivariable y sometido a limitaciones del sistema, lo que complica la implementación de métodos deterministas convencionales. El algoritmo facilita la exploración eficaz de un espacio de soluciones extensas, teniendo en cuenta diversos objetivos y limitaciones al mismo tiempo, tales como la relación entre superficie y volumen, el ritmo de transferencia de masa, la eficiencia energética y la estabilidad térmica del sistema. Entonces, para analizar la función objetivo, se plantea primero los requerimientos principales para ejecutar el algoritmo, los cuales son:

REQUERIMIENTOS INICIALES:

- Un área menor de 75 m^2 , esto área se toma porque es el valor para una vivienda o unidad residencial promedio en la ciudad de Bucaramanga.
- Características de temperatura, humedad y radiación tomadas para la ciudad de Bucaramanga.
- Minimizar el gasto energético de consumo del fotobiorreactor.
- Maximizar producción de biomasa para microalgas.
- Maximizar la captura de CO_2 en el sistema.

Para la realización del algoritmo se dividió en dos partes, por un lado, la función objetivo y por otro lado el algoritmo de optimización.

4.1 Función objetivo

En la función objetivo que se presenta en el **Anexo A**, se coloca primero las variables de entrada, las cuales serán las que se van a optimizar, que son las siguientes: Longitud (L), Diámetro (D), caudal (Q), número de tubos (n), tiempo de operación (t_{oper}), temperatura (T), concentración inicial de biomasa (X_0), intensidad lumínica (I). Estas serán mis variables las cuales se acomodarán en un rango establecido ya en el diseño conceptual. Para el diámetro y la longitud del

tubo, se coloca un rango de valores comerciales, para hacer más cómodo su implementación. Se colocan valores de constantes como los es: gravedad (g), rugosidad (ϵ), viscosidad cinemática (ν), densidad (ρ). También se realiza una validación inicial de los datos de entrada, descartando configuraciones físicamente inválidas o fuera de catálogo comercial.

Luego de establecer las condiciones de entrada, se colocan las ecuaciones para la producción de biomasa, cálculo energético, y captación de CO₂.

4.1.1 Producción de biomasa y CO₂

Para hallar la producción de biomasa, que genera el sistema, se usa la siguiente ecuación:

$$Biomasa_{total} = X_f * V \quad (34)$$

Donde:

$$X_f = \text{Concentración final de biomasa. } \left[\frac{g}{m^3} \right]$$

V = Volumen del sistema.

$$X_f = X_o * \exp(m_u * t_{oper}) \quad (35)$$

Donde:

X_o = Concentración inicial de biomasa.

m_u = Velocidad de crecimiento.

t_{oper} = Tiempo de operación.

El tiempo de operación, como la concentración inicial de biomasa, son variables elegidas en un rango de valores por la optimización. Para la velocidad de crecimiento se usa la siguiente ecuación de Monod:

$$m_u = m_{u,max} * \left(\frac{I}{K_s + I} \right) \quad (36)$$

Donde:

$$m_{u,max} = 0.0000217 \left[\frac{1}{s} \right] \text{ (Velocidad máxima de crecimiento de la microalga).}$$

$$I = \text{Intensidad lumínica.} \left[\frac{\mu\text{mol}}{m^2 * s} \right]$$

$$K_S = \text{Constante de saturación.} \left[\frac{\mu\text{mol}}{m^2 * s} \right]$$

Tomando que la velocidad de crecimiento será una variable final del algoritmo, dado que va a depender de las variables iniciales. También la biomasa final generada en el sistema en el tiempo de operación del fotobiorreactor, será una variable de salida junto con la captura de CO₂. Así mismo, la ecuación para capturar CO₂ tendrá un factor de conversión de 1.83 que indica cuanto CO₂ se fija por cada gramo de biomasa:

$$CO_{2,capturado} = Biomasa_{total} * 1.83 \quad (37)$$

4.1.2 *Calculo energético*

Los factores mecánicos para el consumo de energía del sistema se verán afectados por la potencia de la bomba y del agitador. Para ello se usa la siguiente ecuación:

$$Energía_{total} = (P_{bomba} + P_{agitador}) * \left(\frac{t_{oper}}{3600} \right) \quad (38)$$

$$Energía_{total} = \text{Energía total del sistema. [kWh]}$$

$$P_{bomba} = \text{Potencia de la bomba. [kW]}$$

$$P_{agitador} = \text{Potencia del agitador. [kW]}$$

$$t_{oper} = \text{Tiempo de operación [s]}$$

En donde la potencia del agitador se halla con la siguiente ecuación:

$$P_{agitador} = N_p * \rho * N^3 * D^5 \quad (39)$$

$$N_p = \text{Número de potencia del impulsor.}$$

ρ = Densidad de la mezcla. $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

N = Velocidad del impulsor. $\left[\frac{rev}{s}\right]$

D = Diámetro del eje. $[m]$

Ahora, la potencia de la bomba se halla con la siguiente ecuación:

$$P_{bomba} = \left(\frac{Q * \Delta P}{n_{bomba}}\right) \quad (40)$$

Q = Caudal del sistema $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

ΔP = Presión de la bomba. $[Pa]$

n_{bomba} = Eficiencia de la bomba.

Para hallar la presión de la bomba, se hace de la siguiente manera:

$$\Delta P = \rho * g * h_f \quad (41)$$

ρ = Densidad del agua. $\left[\frac{kg}{m^3}\right]$

g = Gravedad. $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

h_f = Pérdidas del sistema. $[m]$

Para hallar las pérdidas se hace uso de la ecuación de Darcy:

$$h_f = f * \left(\frac{L * v^2}{D * 2g}\right) \quad (42)$$

Donde (f), es el coeficiente de fricción por las pérdidas en el sistema. Para ello de forma general se usa la ecuación de Reynolds si el fluido está en un flujo laminar y la ecuación ColeBrook-White para un fluido turbulento. A continuación, se presenta la ecuación para un fluido turbulento:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\epsilon}{3.71 D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right] \quad (43)$$

Teniendo que la Energía_total del sistema será una variable de salida.

4.1.3 Función fitness

Para la realización de la función fitness se hace uso de la eq (29), teniendo:

$$Fitness = \alpha * \frac{E_{total}}{E_{ref}} + \beta * \left(1 - \frac{\beta_{total}}{\beta_{ref}} \right) + \gamma * \left(1 - \frac{CO_{2,total}}{CO_{2,ref}} \right) + P_{\acute{a}rea} \quad (44)$$

Donde:

$\alpha = 0.4$ (peso de la energía consumida).

$\beta = 0.3$ (peso de la biomasa producida).

$\gamma = 0.3$ (peso de la captura de CO2).

$E_{ref} = 2$ [kWh] (Valor de referencia energético).

$B_{ref} = 10000$ [g] (Valor de referencia de biomasa).

$CO_{2,ref} = 18300$ [g] (Valor de referencia de CO2).

$P_{\acute{a}rea}$ = Penalización de área

Entonces reemplazando los valores:

$$Fitness = 0.4 * \frac{E_{total}}{2} + 0.3 * \left(1 - \frac{B_{total}}{10000} \right) + 0.3 * \left(1 - \frac{CO_{2,total}}{18300} \right) + P_{\acute{a}rea}$$

Se toman los valores de referencia sobre estimados al valor real para que la función fitness, mantenga su estabilidad en la optimización. Así mismo, se coloca una penalización de área para que la función no se ejecuta si se sobrepasa el valor de 75 m². También, como se buscan diferentes objetivos, se realiza una sumatoria de todas estas diferentes funciones para alcanzar el fitness, divididas por un porcentaje de importancia para cada una de ellas.

4.2 Código de optimización

Luego de tener el script en donde se inserta todas las variables de entrada, como de salida y las restricciones para la función, se procede a crear el código de optimización. Para encontrar la configuración óptima del fotobiorreactor tubular, se implementó un algoritmo genético (AG) en MATLAB utilizando la función (ga). Este método de optimización evolutiva se basa en la selección natural y emplea operadores como cruce, mutación y selección para evolucionar una población de soluciones a lo largo de varias generaciones.

El procedimiento comienza con un grupo inicial de posibles soluciones, en el que cada persona simboliza un grupo particular de parámetros del fotobiorreactor. Cada solución es valorada a través de la función objetivo, y se atribuye un valor de fitness que representa su calidad. El algoritmo elige los individuos más aptos para reproducirse en cada generación, empleando operadores de cruce (recombinación de parámetros entre progenitores) y mutación (alteraciones aleatorias en ciertos genes) para producir nuevas especies. Esta población recién formada sustituye completa o parcialmente a la previa, y el ciclo se repite.

El algoritmo se estableció con una población de 300 personas y un tope de 300 generaciones, manteniendo una baja tolerancia a la convergencia para garantizar soluciones de excelente calidad. En cada generación, se mide el valor de la función objetivo para cada individuo (es decir, cada posible disposición del reactor), y se mantiene la solución más óptima hallada. Además, el algoritmo conserva un registro del valor ideal de cada generación para estudiar la convergencia. El código del algoritmo de optimización se presenta en el **Anexo B**.

Así mismo, luego de generar la mejor solución, se buscó generar las 5 mejores soluciones que da el algoritmo por cada iteración realizada, guardando cada uno de los historiales del fitness y de población para un mejor muestreo, todo para comparar el proceso de selección y si había una

correlación. Los valores para la solución más óptima se encuentran en la Tabla 15, en donde se observa una longitud de tubo de 6.00 m y un diámetro de 0.075 m, seleccionados entre dimensiones comerciales viables, con un total de 35 tubos interconectados.

En términos de productividad, se logró una biomasa total de 432.84 g y una captura de CO₂ de 792.10 g, con un consumo energético de 1.04 kWh, donde la potencia requerida por la bomba fue de 0.140 kW. La geometría del sistema implica un área superficial de 49.81 m² y un volumen útil de 0.94 m³, manteniéndose dentro de las restricciones técnicas impuestas para su instalación en una unidad residencial de 75 m². Finalmente, el valor de la función objetivo obtenido fue de 0.7827 (adimensional), lo cual indica una solución balanceada entre eficiencia energética, productividad de biomasa y captura de CO₂, dentro de un marco de penalización por área y normalización de variables de salida.

Tabla 15

Valores de la consola del algoritmo de optimización.

Parámetro	Valor	Unidad
Longitud del tubo (L)	6.00	m
Diámetro del tubo (D)	0.075	m
Caudal (Q)	0.0050	m ³ /s
Número de tubos	35	-
Tiempo de operación	25000	s
Temperatura	302.9	K
Concentración inicial (X ₀)	300.0	g/m ³
Intensidad luminosa (I)	300.0	μmol/m ² ·s
Tasa de crecimiento (μ)	0.000017	1/s

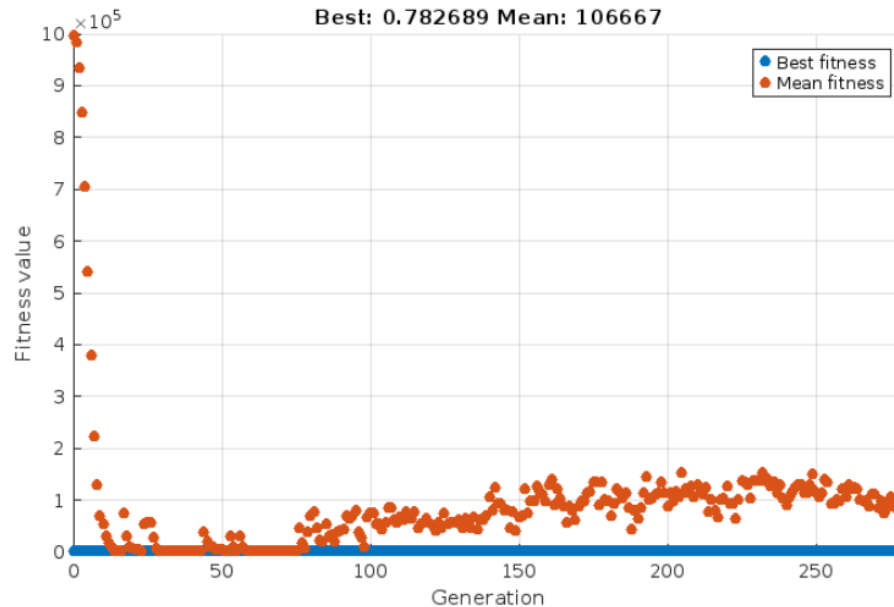
Biomasa total producida	432.84	g
CO ₂ capturado	792.10	g
Energía total consumida	1.04	kWh
Potencia de la bomba	0.140	kW
Área superficial del sistema	49.81	m ²
Volumen del sistema	0.94	m ³
Valor de la función objetivo	0.7827	adimensional

Estos valores, se dieron de la mejor elección del algoritmo, y de varias iteraciones realizadas con este mismo. También, se tomarán los valores dados en la tabla para los cálculos de la carga térmica, dado que son la mejor solución de diseño para su puesta en marcha.

El procedimiento de optimización no solo determina la configuración definitiva más adecuada, sino que también posibilita examinar el rendimiento del sistema ante diversas combinaciones de diseño. Se reconocen puntos de estancamiento (óptimos locales), los cuales son excedidos debido a la diversidad generada por la mutación. Esto asegura que el algoritmo pueda examinar eficazmente el espacio de soluciones y hallar configuraciones próximas al óptimo global. Ahora se muestran las gráficas para analizar el comportamiento de la función objetivo respecto a su generación, mutación y crecimiento del algoritmo.

Figura 10

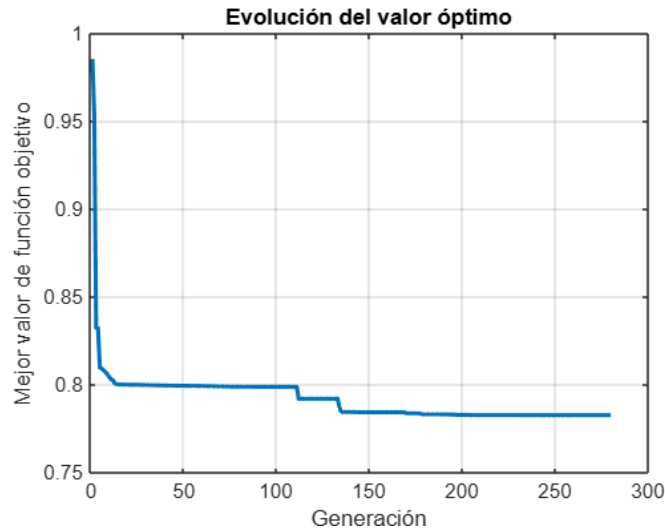
Valor del Fitness vs Generación.



La Figura 10, muestra el cambio en el valor de la función objetivo durante las distintas generaciones del algoritmo genético. Se nota una notable discrepancia entre el valor del individuo más destacado (curva azul) y el promedio de la población (curva naranja): El valor de fitness ideal obtenido fue de 0.782689, lo que señala una solución sumamente eficaz. La curva azul se mantiene estable con rapidez, lo que demuestra que una solución adecuada se ha descubierto desde las primeras generaciones. El promedio poblacional (curva naranja) muestra una amplia dispersión y se mantiene alta, lo que indica que numerosas soluciones están siendo penalizadas por limitaciones técnicas, como sobreabundancia de área o un bajo rendimiento energético.

Figura 11

Evolución del valor óptimo.



En la Figura 11, se hace el gráfico para de la función objetivo en escala logarítmica, en donde el proceso de implementación, se nota una etapa inicial de rápida mejora, seguida por un estancamiento temporal (que señala un lugar óptimo). El valor óptimo converge suavemente, con pequeños saltos descendentes en generaciones intermedias (aprox. entre la generación 100 y 200), lo que refleja mejoras menores tras la fase inicial. El algoritmo consigue escapar de este estancamiento y seguir progresando hasta llegar a una solución próxima al óptimo global. A partir de la generación ~250, el valor de la función objetivo no mejora más, lo cual indica que se alcanzó una solución óptima.

5 Análisis de cargas térmicas

Con el proceso de optimización realizado, y generando los valores de diseño para la mejor solución colocados en la Tabla 15, se procede a calcular las cargas térmicas planteadas en la sección 3.4. Hallando el calor neto con la implementación de un fotobiorreactor en una unidad

residencial de 75 m² en Bucaramanga. Para ello, se halla primero el calor neto solo de la casa, luego el calor neto para el fotobiorreactor, para así finalmente comparar cual es la reducción del calor neto implementando un sistema de captación de CO₂.

5.1 Resultado de carga térmica de la unidad residencial

- **Carga sensible:**

Para el cálculo de carga térmica en una unidad residencial de 75 m², se tomará especificaciones estándar para una familia promedio en la ciudad de Bucaramanga. Tomando la eq (3), donde primero se hallará el calor sensible expresado en la eq (4).

- **Carga en cristaleras:**

Se calcula la radiación a través de cristaleras expresada en la eq (5). Teniendo una irradiancia en la ciudad de Bucaramanga de 650 (W/m²). Así mismo el área será el de las ventanas, tomando que cada casa tendrá 4 ventanas:

$$A = A_{ventana} = Lando * ancho * \#_{ventanas}$$

$$A_{ventana} = 1.2 * 1.2 * 4 = 5.76 [m^2]$$

Tomando de la tabla 1 el valor con un espesor de 12 cm junto con orientación de las ventanas SE/SO, se halla f=0.86. Ahora se reemplaza:

$$Q_{sr} = f * A * W$$

$$Q_{sr} = 5.76 * 650 * 0.86 = 3.219 [kW]$$

- **Radiación a través de paredes y techo externo e interno:**

Ahora se halla la carga por radiación a través de paredes y techos de la eq (6). Primero se halla el valor de la conductividad térmica, para ello se usa la página tomada de (Softeca, 2007), teniendo en cuenta que se usará una facha de revestimiento continuo, ventilada, con un asilamiento

interno de espesor de 50 mm con poliestireno expandido como tipo de aislante. Teniendo que $k=0.655$ (W/K*m²).

Ahora se halla la temperatura exterior de diseño de la eq (7), teniendo que para 2024 en la ciudad de Bucaramanga el mes más cálido fue el mes de marzo, con una $T_{max}=36.8$ °C y una temperatura media de ese mes de, $T_{me}=24.5$ °C. Entonces la temperatura exterior de diseño será:

$$T_e = 0.4 * (24.5) + 0.6 * (36.8) = 9.8 + 22.08 = 31.88 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Tomando una temperatura interna del recinto de $T_i=22$ °C. Entonces para hallar la temperatura exterior de cálculo, se hace uso de la Tabla 2, con una orientación hacia el oeste:

$$T_{ec} = 0.9 * T_e = 0.9 * 31.88 = 28.7 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Ahora se halla la radiación a través de paredes y techos:

$$Q_{str} = K * A * (T_{ec} - T_i)$$

$$Q_{str} = 0.655 * 72 * (28.7 - 22) = 0.316 \text{ [kW]}$$

Para fines del cálculo se tendrá una ubicación de paredes interna de la misma manera que una pared externa, se usarán los mismos valores que las paredes externas para el cálculo. Teniendo entonces:

$$Q_{st} = Q_{str} = 0.316 \text{ [kW]}$$

- **Carga por infiltraciones de aire:**

Ahora se halla la carga transmitida por infiltraciones internas de aire expresada en la eq (9). Primero se halla la temperatura de película, teniendo que $T_{ext}= 28^\circ\text{C}$, y una $T_{int}=22$ °C. Entonces:

$$T_p = \frac{28 + 22}{2} = 25 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Con este valor, se hallan los valores del aire de densidad del aire y del calor específico, los cuales son:

$$\rho = 1.092 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]; C_p = 1007 \left[\frac{\text{J}}{\text{Kg} * \text{K}} \right]$$

Para el caudal infiltrado de aire se hace uso de la eq (10), sacando los valores dados en la Tabla 3, para una unidad residencial donde $R_p = 2.5$ (L/s) y $R_a = 0.3$ (L/s*m²), tomando una casa donde habitan 4 personas, teniendo entonces:

$$V = (2.5 * 4) + (0.3 * 75) = 32.5 \left[\frac{\text{L}}{\text{s}} \right] = 0.0325 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$$

Con el caudal de infiltración de aire, ahora se halla el calor generado por las infiltraciones de aire exterior de la eq (9):

$$Q_{si} = V * \rho * C_{p\text{aire}} * \Delta T$$

$$Q_{si} = 0.0325 * 1.092 * 1007 * (28 - 22)$$

$$Q_{si} = 0.214 \text{ [kW]}$$

- **Carga por aportaciones internas en el recinto:**

Ahora se hallan las cargas por aportaciones internas que ocupan el recinto como lo son bombillas de luz y electrodomésticos expresados en la eq (11). Para una unidad residencial promedio no se tendrán lámparas incandescentes por el ahorro energético. Entonces se hallan el calor por lámparas fluorescentes mostrada en la eq (13):

$$Q_{sil,fluorescente} = 1.25 * n * Pot_{lampara}$$

$$Q_{sil,fluorescente} = 1.25 * 8 * 30 = 0.3 \text{ [kW]}$$

Luego, se halla la carga sensible por las personas ocupadas en el recinto, tomando los valores de la Tabla 4, para una persona de pie en marcha lenta:

$$Q_{sp} = n * C_{sensible, persona}$$

$$Q_{sp} = 4 * 63 = 0.252 [kW]$$

Ahora se halla la carga térmica para los aparatos electrónicos colocados en el recinto, los cuales son: Nevera, lavadora, extractor, estufa, 2x computador, 2x televisor, horno, microondas.

Usando la eq (16):

$$Q_{se} = \sum Pot_{electrodomesticos} * 0.75$$

$$Q_{se} = 0.75 * (800 + 2000 + 200 + 1000 + 100 + 2000 + 1200) = 5.475 [kW]$$

Tomando la eq (4), la carga sensible total será:

$$Q_S = Q_{sr} + Q_{str} + Q_{st} + Q_{si} + Q_{sai}$$

$$Q_S = 3.219 + 0.316 + 0.316 + 0.214 + 0.252 + 5.47 = 9.794 [kW]$$

- **Carga latente:**

Luego de tener la carga sensible, se halla la carga latente, usando latente usando la eq (18), para ello se tiene que el calor latente por infiltraciones de aire, usará el mismo caudal de aire, usando la misma temperatura de película dando un calor latente=2,257(KJ/kg). Con un diferencial de humedad absoluta de 0.009, tomando T_ext=28 y T_int=24. Entonces el calor de la carga latente será:

$$Q_{li} = V * \rho_{aire} * C_{l, agua} * \Delta W$$

$$Q_{li} = 0.0325 * 1007 * 2.257 * 0.009 = 0.665 [kW]$$

Luego se halla el calor latente por ocupación de las personas usando la Tabla 4, entonces:

$$Q_{lp} = n * C_{latente, personas}$$

$$Q_{lp} = 4 * 68 = 0.272 [kW]$$

Tomando la eq (17), se tiene:

$$Q_l = Q_{li} + Q_{lp} = 0.665 + 0.272 = 0.937 [kW]$$

- **Carga neta total de la unidad residencial:**

Usando la eq (3), se obtiene:

$$Q_{neto, casa} = Q_{sensible} + Q_{latente} = 9.794 + 0.937 = 10.731 [kW]$$

Teniendo que ese será el valor de la carga térmica neto para que se produce en una unidad residencial de 75 m², en la ciudad de Bucaramanga.

5.2 Resultado de carga térmica para el fotobiorreactor

Para hallar la carga térmica únicamente del fotobiorreactor, se hace uso de la eq (20). En donde se expresa el balance de energía que entra y sale del fotobiorreactor.

- **Radiación solar:**

Primero se hallará la radiación que entra en el sistema por medio de la radiación solar expresada en la eq (21). La absorptividad y transmisividad son propias del material, y se usan tubos de policarbonato. El área proyectada es hallada $A = \pi * n * L * D$. La irradiancia es un valor de 1000 (W/m²). Entonces:

$$Q_{rad, solar} = G * \tau * \alpha * A_{proyectada}$$

$$Q_{rad, solar} = 1000 * 0.85 * 0.15 * 49.48 = 6.308 [kW]$$

- **Convección natural:**

En el proceso del análisis térmico, se genera una convección natural por medio del aire en la configuración de tubos en donde debido a diferencias de temperatura que generan variaciones de densidad, provoca que el movimiento del fluido este sin necesidad de medios externos como ventiladores o bombas, esto se muestra en la eq (22). Teniendo que la temperatura del ambiente es $T_{\infty} = 24 \text{ }^{\circ}\text{C}$, y la temperatura de la superficie es $T_s = 30 \text{ }^{\circ}\text{C}$, dado que no puede superar esa temperatura de superficie como requerimiento de la microalga. Primero se calcula el coeficiente de transferencia de calor por convección, para ello se halla la temperatura de película.

$$T_p = \frac{30 + 24}{2} = 27 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Con la temperatura de película se hallan las propiedades para el aire con las tablas del Cengel (Cengel Y.A., 2013):

$$\beta = 0.037 \left[\frac{1}{K} \right], Pr = 0.72904, \nu = 0.000015804 \left[\frac{m^2}{s} \right], k = 0.025658 \left[\frac{W}{m \cdot K} \right]$$

Reemplazando en la eq (23) se tiene:

$$R_{ad} = \frac{g * \beta * (T_s - T_{\infty}) * D^3 * Pr}{\nu^2}$$

$$R_{ad} = \frac{9.81 * 0.037 * (30 - 24) * (0.075)^2 * 0.72904}{(0.000015804)^2} =$$

$$R_{ad} = 2.681779 \times 10^6$$

Teniendo que el $Ra < 10^{12}$, se puede hacer uso de la ecuación (24), para hallar el Nusselt en un tubo horizontal:

$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 R_{ad}^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 (2.681779 \times 10^6)^{1/6}}{[1 + (0.559/0.72904)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2$$

$$Nu = 19.31$$

Con el número de Nusselt, se puede hallar el coeficiente de transferencia de calor por convección en la eq (25):

$$h = \frac{k * Nu}{D}$$

$$h = \frac{0.025658 * 19.31}{0.075} = 6.607 \left[\frac{W}{m^2 * ^\circ C} \right]$$

Ahora se halla el calor por convección usado en la eq (22):

$$Q_{con,tubos} = h * A_s * (T_s - T_\infty) * n$$

$$Q_{con,tubos} = 6.607 * 1.4137 * (30 - 24) * 35$$

$$Q_{con,tubos} = 1.961 [kW]$$

- **Radiación emitida por tubos:**

En el análisis de calor, se tiene también una emisión de radiación dada por los mismos tubos. Para ello se hace uso de la eq (26), asumiendo una emisividad de 0.9 para tubos de policarbonato transparente, entonces:

$$Q_{rad,tubos} = n * \epsilon * \sigma * A_s * (T_o^4 - T_\infty^4)$$

$$Q_{rad,tubos} = 35 * 0.9 * (5.6703 \times 10^{-8}) * 1.4137 * (303.15^4 - 297.15^4)$$

$$Q_{rad,tubos} = 1.639 \cong 1.64 [kW]$$

- **Carga por flujo masico:**

El transporte de las microalgas, tendrá un flujo masico por el cual se estará moviendo, este flujo generará un calor expresado en la eq (27):

$$Q_{masa} = \dot{m} * C_p * \Delta T$$

$$Q_{masa} = 0.02 * 4.180 * (30 - 24) = 0.50 [kW]$$

- **Carga neta total del fotobiorreactor:**

Con esto se suma los diferentes tipos de carga que entran y salen del fotobiorreactor, para hallar el calor neto del fotobiorreactor:

$$Q_{neto,reactor} = Q_{rad,solar} - Q_{con,tubos} - Q_{rad,tubos} + Q_{masa}$$

$$Q_{neto,reactor} = 6.308 - 1.961 - 1.64 + 0.5 = 3.207 [kW]$$

6 Análisis económico

El estudio económico es un paso crucial en la valoración de la factibilidad de un sistema de fotobiorreactor tubular diseñado para la captura de dióxido de carbono (CO₂), la generación de biomasa y la disminución de cargas térmicas en viviendas. Aunque el diseño técnico y la optimización operativa del sistema posibilitan lograr un rendimiento eficaz en términos energéticos y ambientales, su puesta en marcha demanda un análisis exhaustivo de los costos relacionados y las ganancias anticipadas a corto y largo plazo.

Este análisis financiero tiene como objetivo establecer los factores financieros clave del proyecto, como la inversión inicial (valor de sus componentes para su instalación) y los ahorros producidos por la reducción del uso de energía en sistemas de aire acondicionado. Además, se proyecta la posible producción de biomasa como subproducto para el comercio, junto con los beneficios provenientes de la captura de CO₂, que pueden convertirse en estímulos ambientales o valoración por servicios del ecosistema.

A continuación, se presenta la Tabla 16, con los costos estimados para la implementación del sistema de fotobiorreactor tubular, obtenidos a partir de fuentes comerciales en línea y

catálogos de proveedores. Los precios corresponden al año 2025 y se expresan en pesos colombianos (COP). Estos productos se listan en el **Anexo C**.

Tabla 16

Costos de los componentes del fotobiorreactor.

OBJETOS	PRECIO UNITARIO	UNIDAD	PRECIO TOTAL
Bomba 1 HP	\$490.000	1	\$490.000
Tubería	\$40.000	105	\$3.570.000
Unión	\$15.000	70	\$1.050.000
Conexión en U	\$20.000	35	\$700.000
Caudalímetro	\$300.000	1	\$300.000
Inyector Venturi	\$150.000	1	\$150.000
Reservorio	\$450.000	1	\$450.000
Agitador	\$1.600.000	1	\$1.600.000
Válvula de globo	\$125.000	1	\$125.000
Válvula de retención	\$150.000	1	\$150.000
	Total		\$8.585.000

Con la tabla de costos para la implementación y puesta en marcha del fotobiorreactor, se procede a realizar un cálculo de comparación para saber cuánto consumo de energía se ahorra implementando todo el sistema.

$$\%_{ahorro} = \frac{Q_{neto,fotobioreactor}}{Q_{neto,casa}} = \frac{3.207}{10.731} * 100 = 30\%$$

Haciendo el cálculo de ahorro con la implementación del fotobiorreactor, se tiene que se reduce la carga térmica es de un 30% con el sistema en funcionamiento. Esta disminución implica un consumo energético reducido en los sistemas de climatización, que puede evaluarse económicamente en función de la tarifa media de electricidad en hogares. Teniendo que en un recinto común usa un sistema de A.A de 18.000 BTU, su consumo mensual de energía es de 450 (kWh/mes). Tomando una tarifa de la empresa ESSA colocada en el **Anexo D**, para el costo de la energía que es de 840 (COP/kWh) genera un coste anual de:

$$Costo_{A.A/18.000.BTU} = 450 * 840 = 378.000 \text{ COP/mes}$$

Con el valor del costo al 100%, se tiene que con la implementación del fotobiorreactor se espera tener una reducción del 30% en los costos de consumo de aire acondicionado. Por lo tanto, el ahorro sería de:

$$Ahorro = (378.000) * 0.30 = 113.400 \text{ COP/mes}$$

Lo cual, si se traslada a un año, el ahorro sería de:

$$Ahorro = 113.400 * 12 = 1.360.800 \text{ COP/año}$$

Para evaluar la rentabilidad del sistema fotobiorreactor, se aplicó un análisis de Tasa Interna de Retorno (TIR) considerando una inversión inicial de **8.585.000 COP** y un ahorro anual en consumo energético de **1.360.800 COP**, asociado a la reducción de uso de aire acondicionado.

Los flujos de caja se consideraron constantes a lo largo de los años, sin considerar reinversiones ni mantenimiento mayor. Mediante el uso de la función financiera TIR en Excel, se obtuvo una TIR de **11.66%**, lo que indica que el sistema genera una rentabilidad del 10.57 % anual. Además, se determinó un tiempo de recuperación de la inversión de **6.31 años**, es decir, en poco más de seis años el sistema compensa su costo inicial. Estos resultados respaldan la viabilidad económica del proyecto bajo condiciones energéticas actuales y sin considerar ingresos adicionales por comercialización de biomasa o incentivos ambientales.

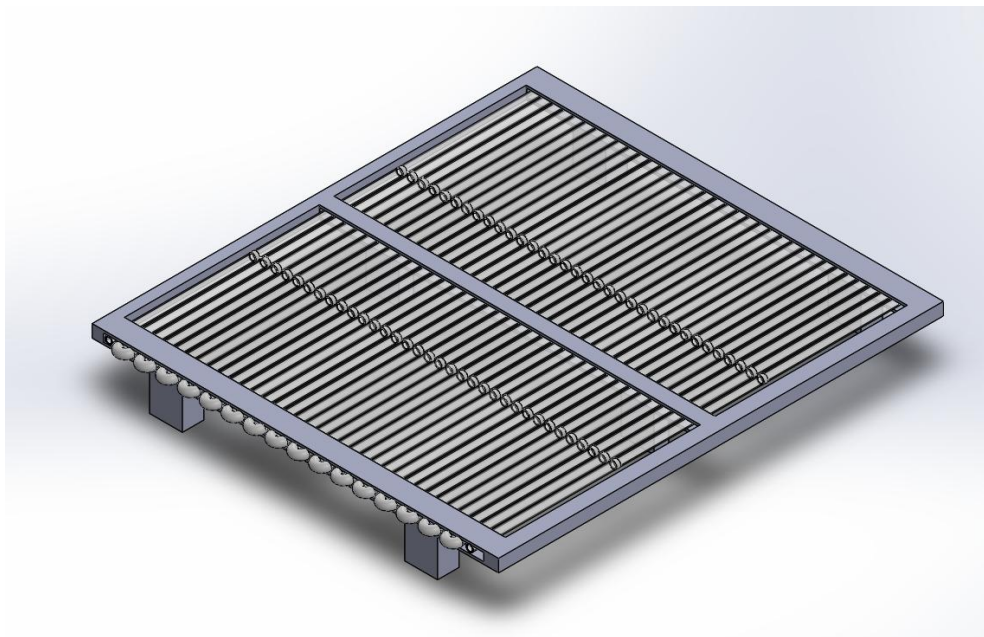
7 Diseño en detalle

Este diseño se refiere a un sistema de fotobiorreactor de tubular horizontal, sugerido para su uso en unidades residenciales con el objetivo de disminuir la carga térmica en superficies solares y aportar a la captura de CO₂ atmosférico a través del cultivo de microalgas del género *Chlorella*

Vulgaris. Además, el diseño aspira a optimizar la eficiencia energética, asegurar la viabilidad estructural y posibilitar un funcionamiento constante bajo las condiciones climáticas locales de Bucaramanga. En la Figura 12, se muestra un modelado del sistema para el colector que se compone de 35 tubos de policarbonato técnico de grado transparente, cada uno de 6 metros de longitud y 75 mm de diámetro exterior, unidos paralelamente para formar un volumen útil total de cerca de $0.94 m^3$. Estos valores fueron tomados en la tabla 15. Los tubos se ubican de manera horizontal sobre una estructura de metal, para sostener el sistema de tubos.

Figura 12

Modelado 3D del sistema del colector solar.

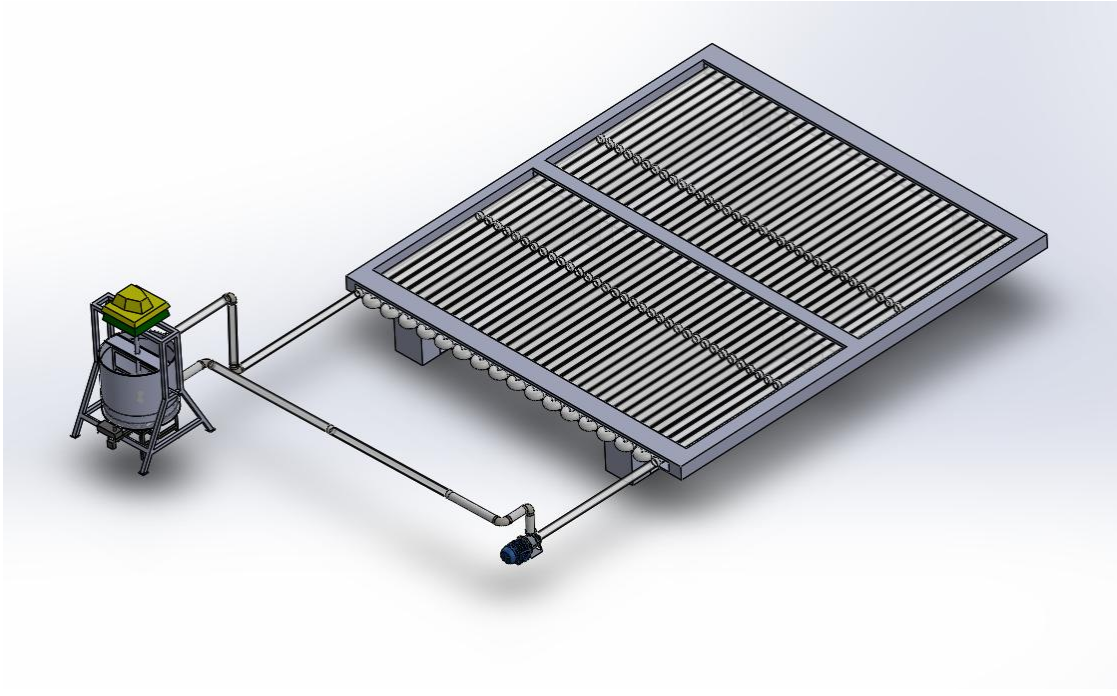


En la Figura 13, se hace un modelado para el sistema con todos los elementos que se incorporan para la recolección, transporte y radiación, los cuales son: una bomba centrífuga de 1 HP para la recirculación continua del medio líquido O_2 , un agitador neumático para mantener homogénea la suspensión de microalgas y que no genere cizallamiento, sistema de cosecha y almacenamiento por un tanque de 1000 litros, soporte para sostener el tanque y las tuberías, y estas

mismas para unir todo el sistema. Teniendo una conexión del reservorio en la succión de la bomba y una salida en la descarga al arreglo de tubos. Los planos para todo el sistema del fotobiorreactor completo se encuentran en el **Anexo E**.

Figura 13

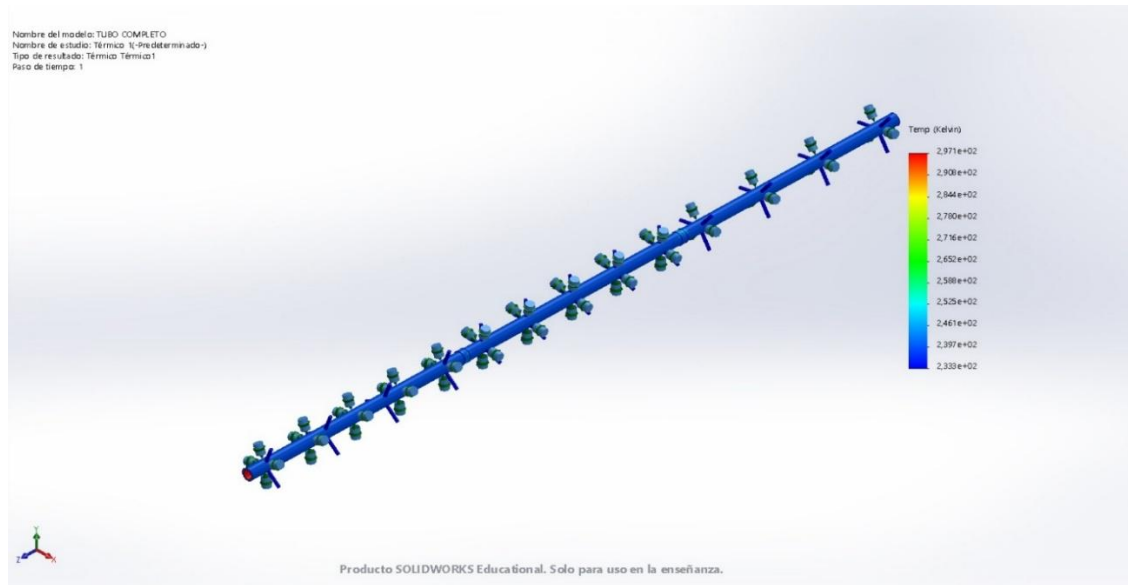
Modelado 3D del fotobiorreactor tubular completo.



En la Figura 14, se presenta una simulación térmica transitoria realizada en SolidWorks Simulation aplicada sobre el diseño de un tubo del colector solar. La escala de colores mostrada indica un rango de temperatura que va desde los 233.8 K (~ -39.3 °C) hasta los 297.1 K (~ 24.0 °C), evidenciando un gradiente térmico progresivo desde un extremo frío del tubo (zona azul) hasta un extremo caliente (zona roja). La distribución de temperatura es continua y sin puntos críticos de acumulación de calor, lo que refleja un desempeño térmico adecuado del material del tubo y una conducción eficiente del calor a lo largo de su longitud.

Figura 14

Simulación para el cambio de temperatura en un tubo.



En conclusión, los resultados de esta simulación confirman que el diseño propuesto permite una distribución térmica estable, sin zonas de sobrecalentamiento, lo cual refuerza su viabilidad operativa y energética en entornos residenciales.

8 Conclusiones

- Se desarrolló un fotobiorreactor tubular adaptado a las condiciones y limitaciones de una unidad residencial de 75 m² en la ciudad de Bucaramanga. El diseño consideró tanto el planteamiento conceptual como el diseño en detalle del sistema, incluyendo la selección de materiales, dimensiones comerciales de tubos, caudal de operación, disposición espacial y componentes auxiliares como la bomba centrífuga, el sistema de agitación y el reservorio de desgasificación. Se integraron mecanismos funcionales para la captación de radiación solar, el transporte del cultivo, la

recolección de biomasa y el control de gases. Esta fase garantizó la viabilidad técnica y constructiva del techo verde dentro del entorno urbano. Además, se eligió la microalga *Chlorella Vulgaris* como base biológica por su alta tasa de crecimiento, eficiencia en la captura de CO₂ y adecuación a las condiciones climáticas locales. Este análisis fue complementado con una simulación térmica en SolidWorks que demostró la capacidad del sistema para reducir la carga térmica pasiva mediante sombreado y absorción de energía solar.

- Se implementó un modelo matemático de optimización multiobjetivo en MATLAB utilizando algoritmos genéticos, el cual permitió identificar configuraciones de diseño que minimizan el consumo energético mientras maximizan la captura de CO₂ y la producción de biomasa. La función objetivo consideró penalizaciones por área ocupada y normalizó los objetivos clave: energía total consumida, biomasa producida y CO₂ capturado. Los mejores resultados obtenidos muestran una producción diaria de hasta 432.84 g de biomasa y una captura de 792.10 g de CO₂, con un consumo energético total de apenas 1.04 kWh. Estos valores fueron alcanzados con una longitud de 6 m, un diámetro de 0.075 m y 35 tubos, validando la eficiencia de la estrategia de optimización utilizada.
- Se realizó un análisis financiero que incluyó la estimación del costo total del sistema (aproximadamente 8.585.000 COP), el ahorro anual en consumo energético por climatización (1.360.800 COP) y la evaluación de indicadores como la Tasa Interna de Retorno 11.38%, recuperando la inversión en 6,31 años. Los resultados

mostraron un retorno de inversión viable, lo cual evidencia que, además de ser una solución técnica eficiente, el fotobiorreactor también representa una alternativa económicamente sostenible para viviendas residenciales. Así mismo, el proceso tiene un valor agregado fundamental: la biomasa producida a partir del cultivo de *Chlorella Vulgaris* puede ser aprovechada con fines comerciales o industriales. Generando así una fuente adicional de ingresos para el usuario de un techo verde. Este beneficio económico complementario no solo mejora la rentabilidad del sistema, sino que lo convierte en una solución productiva y sostenible en el tiempo.

9 Recomendaciones

El presente proyecto ofrece un marco teórico y metodológico para el diseño de un fotobiorreactor tubular dirigido a obtener CO₂, disminuir las cargas térmicas en las viviendas y generar biomasa empleando la microalga *Chlorella vulgaris*. En el futuro, este trabajo tiene el potencial de llevarse a cabo mediante la creación y validación de un prototipo piloto a escala real. Dicha construcción debería posibilitar que se compruebe la eficacia del sistema en condiciones de funcionamiento al aire libre frente a variables como la temperatura ambiente, la radiación solar y la calidad del gas residual que se emplea como fuente de carbono. Este tipo de aplicación tiene un gran potencial en ciudades con climas cálidos, pues ayudaría a la sostenibilidad del medio ambiente y a la eficacia energética.

Así mismo, utilizando la biomasa, el uso de esta en áreas como la producción de biofertilizantes, la creación de biocombustibles y la fabricación de suplementos nutricionales se incluye en las proyecciones. Esto ayuda a que el sistema sea económicamente viable al diversificar

los usos del cultivo. La experiencia adquirida con este diseño, además, puede ser utilizada como base para integrar otras especies de microalgas, desarrollar modelos de optimización más sofisticados y combinar tecnologías de control automatizado en los fotobiorreactores.

En términos generales, el proyecto se presenta como una opción novedosa y sostenible que tiene la posibilidad de escalar de forma gradual, desde la fase experimental hasta su implementación en aplicaciones urbanas y residenciales. Esto contribuye tanto a la reducción del cambio climático como al paso hacia una bioeconomía circular en Colombia.

Referencias Bibliográficas

- Acid Fidalgo E Torres C Herrero, J. P. (s/f). •= *UNIVERSIDAD DE DACORUNA MICROALGAS: Cultivo y Aplicaciones*. <https://doi.org/10.17979/spudc.9788497497695>
- Alonso, P. G. (2012). *UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID TESIS DOCTORAL. ANSI/ASHRAE Addendum p to ANSI/ASHRAE Standard 62.1-2013*. (2015). www.ashrae.org
- Antonio Echeverría, J., González-Lazo, Y. I., Antonio Rodríguez-Ramos, P. I., Sánchez-Borroto III, Y., Teresa-Lombardi, A. I., & Candido, C. I. (2019). *Artículo Original Diseño y simulación de un fotobiorreactor para el cultivo de la microalga Chlorella Vulgaris Design and Simulation of a photobiorreactor for the cultivation of the microalga Chlorella Vulgaris Este documento posee una licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional*. 22(3), 169–177. <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu>
- Arribas, A. (2020). *Fotobiorreactores, técnicas y parámetros implicados en la producción de biocombustibles de origen microalgal*.
- Bermejo, N. (2016). *Primeras páginas DTIE 12.02*.
- Brennan, L., & Owende, P. (2010). Biofuels from microalgae-A review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. En *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 14, Número 2, pp. 557–577). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.009>
- Cengel Y.A. (2013). *Transferencia de Calor y Masa. McGraw-Hill Education.*, (4.^a ed.), 880–886.
- Científica, Y., & Tecnológica, A. C. (s/f). *INSTITUTO POTOSINO DE INVESTIGACIÓN*.
- Darlin Ramírez Leiva. (2023, junio 27). *Bucaramanga tiene su propio Inventario de Gases de Efecto Invernadero. Alcaldía de Bucaramanga*. <https://www.bucaramanga.gov.co/noticias/bucaramanga-tiene-su-propio-inventario-de->

Revista Colombiana de Biotecnología, 17(1), 143–150.

<https://doi.org/10.15446/rev.colomb.biote.v17n1.50679>

Klinthong, W., Yang, Y. H., Huang, C. H., & Tan, C. S. (2015). A Review: Microalgae and their applications in CO₂ capture and renewable energy. En *Aerosol and Air Quality Research* (Vol. 15, Número 2, pp. 712–742). AAGR Aerosol and Air Quality Research. <https://doi.org/10.4209/aaqr.2014.11.0299>

Liu, X., & Hong, Y. (2021). Microalgae-Based Wastewater Treatment and Recovery with Biomass and Value-Added Products: a Brief Review. *Current Pollution Reports*, 7(2), 227–245. <https://doi.org/10.1007/s40726-021-00184-6>

Maria, A., Zambrano, C., Rodolfo, M., & Rubio Aguiar, J. (2017). *UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES Y AMBIENTALES*.

María Teresa Cadenas González, G. L. A. , C. B. C. C. , J. J. R. V. (2022). *145-1-472-1-10-20221125*.

Maroneze, M. M., Alberto, C., Herrera, M., & Martínez Jiménez, A. (2021). *Perspectivas sobre los sistemas de cultivo de microalgas: una revisión crítica Insights into microalgae culture systems: A critical review* (Vol. 25, Número 5).

Martínez, V., Pellón, A., Pérez, E., Correa, O., Escobedo, R., Madruga, Y., Oña, A., & Arencibia, R. (2005). Produccion de Biomasa de *Scenedesmus Obliquus* en diferentes medios de cultivo. En *Revista CENIC Ciencias Biológicas* (Vol. 36).

Muñiz, R. (2019). Los fotobiorreactores de microalgas: Un recurso para el tratamiento terciario de aguas residuales. *Rev. Tekhné*, 22, 13–025. <http://revistasenlinea.saber.ucab.edu.ve/temas/index.php/tekhne/index>

- Núñez Valdés, Y. (2021). Determinación de los parámetros adecuados para la simulación del proceso de crecimiento de la microalga *Determination of suitable parameters for simulation of the Chlorella vulgaris growing in a bubble column fotobiorreactor* Este documento posee una licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional Resumen. En *Revista Estudiantil Nacional de Ingeniería y Arquitectura* (Vol. 2, Número 3).
- OMM. (2024, octubre 28). *Las concentraciones de gases de efecto invernadero se disparan una vez más: nuevo récord en 2023*. Organización Metereológica Mundial. <https://wmo.int/es/news/media-centre/las-concentraciones-de-gases-de-efecto-invernadero-se-disparan-una-vez-mas-nuevo-record-en-2023>
- Prieto Márquez, I., Elena, C., & Alías, B. (2020). “*ESTUDIO DEL CRECIMIENTO DE LA MICROALGA Chlorella vulgaris Y SU CAPACIDAD DE DEPURACIÓN DE AGUA RESIDUAL*”.
- Pulz, O. (2001). Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 57(3), 287–293. <https://doi.org/10.1007/s002530100702>
- Ramírez, J. (2017). *Viabilidad en la producción de biomasa microalgal a partir de fotobiorreactores solares en el Valle del Cauca, Colombia*.
- Ras, M., Steyer, J.-P., & Bernard, O. (2013). Temperature effect on microalgae: a crucial factor for outdoor production. *Reviews in Environmental Science and Bio/technology*, 12(2), 153–164. <https://doi.org/10.1007/s11157-013-9310-6>
- Rodríguez, H. (s/f). *Guía para el cálculo de las cargas térmicas en los edificios*. ingemecánica. Recuperado el 4 de junio de 2025, de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn255.html>

- Rubio Fernández, D., Alexandra Sierra Herrera, J., Ruiz Fonseca, S., & Andrés Sandoval Herrera, J. (2013). *Diseño de un fotobiorreactor Airlift a escala banco Grupo de investigación BIOTECFUA*.
- Ruiz-Marín, A., Mendoza-Espinosa, L. G., Del, M., & Sánchez-Saavedra, P. (2011). PHOTOSYNTHETIC CHARACTERISTICS AND GROWTH OF ALGINATE-IMMOBILIZED *Scenedesmus obliquus* CARACTERÍSTICAS FOTOSINTÉTICAS Y CRECIMIENTO DE *Scenedesmus obliquus* INMOVILIZADA EN ALGINATO. En *Agrociencia* (Vol. 45).
- Sancho. (s/f). *Algoritmo Genéticos*. Recuperado el 9 de junio de 2025, de https://www.cs.us.es/~fsancho/Blog/posts/Algoritmos_Geneticos.md#
- Softeca, S. L. (2007). *PRONTUARIO DE SOLUCIONES CONSTRUCTIVAS*. CTE WEB.
- Tredici, M. R., Carlozzi, P., Chini Zittelli, G., & Materassi, R. (1991). A vertical alveolar panel (VAP) for outdoor mass cultivation of microalgae and cyanobacteria. *Bioresource Technology*, 38(2), 153–159. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0960-8524\(91\)90147-C](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0960-8524(91)90147-C)
- Vergara, L. (2019). *Captura de CO2 por Chlorella vulgaris y Scenedesmus obliquus bajo condiciones controladas en fotobiorreactores*.

ANEXOS

Anexo A

Código para la función objetivo del fotobiorreactor.

```
function [f, energia, P_bomba, CO2, biomasa, area, volumen, mu] =
objetivo_fotobiorreactor(x)
    %% Variables de entrada
    L = x(1);           % Longitud del tubo [m]
    D = x(2);           % Diámetro del tubo [m]
    Q = x(3);           % Caudal [m³/s]
    n_tubos = round(x(4)); % Número de tubos
    t_oper = x(5);      % Tiempo de operación [s]
    T = x(6);           % Temperatura [K]
    X0 = x(7);          % Concentración inicial de biomasa [g/m³]
    I = x(8);           % Intensidad luminosa [µmol/m²·s]

    %% Listas de medidas comerciales
    longitudes_comerciales = [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8]; % m
    diametros_comerciales = [0.025, 0.032, 0.04, 0.05, 0.063, 0.075, 0.09, 0.11,
0.125, 0.16]; % m

    %% Constantes físicas y del sistema
    epsilon = 0.0001;   % Rugosidad [m]
    nu = 1e-6;          % Viscosidad cinemática [m²/s]
    rho = 1000;         % Densidad del agua [kg/m³]
    g = 9.81;           % Gravedad [m/s²]
    eta_bomba = 0.7;    % Eficiencia de la bomba

    %% Parámetros de crecimiento de microalgas (Chlorella vulgaris)
    mu_max = 2.17e-5;   % Velocidad máxima de crecimiento [1/s]
    Ks = 80;            % Constante de saturación [µmol/m²·s]

    %% Parámetros del agitador
    Np = 1.5;           % Número de potencia (depende del impulsor)
    rho_agitador = 1000; % Densidad del medio (kg/m³)
    N = 300/60;         % Velocidad del impulsor (rev/s)
    D_agitador = 0.14;  % Diámetro del impulsor (m)

    % Cálculo de potencia
    P_agitador = (Np * (rho_agitador) * N^3 * (D_agitador)^5); % Resultado en W
    P_agitador_kW = P_agitador/1000 ; % Resultado en W

    %% Inicializar outputs con valores seguros
    f = 1e6;
    energia = NaN;
    P_bomba = NaN;
    CO2 = NaN;
    biomasa = NaN;
    area = NaN;
    volumen = NaN;
    mu = NaN;
```

```

%% Validación de variables y medidas comerciales
if any([L, D, Q, t_oper, X0, I] <= 0) || n_tubos < 1
    return;
end
if ~ismember(round(L, 3), longitudes_comerciales) || ~ismember(round(D, 3),
diametros_comerciales)
    return;
end

%% Cálculo de  $\mu(I)$  - cinética de tipo Monod
mu = mu_max * (I / (Ks + I));

%% Geometría del sistema
A_superficie = n_tubos * pi * D * L;           % Área total externa [m2]
V = pi * (D/2)^2 * L * n_tubos;             % Volumen total [m3]

%% Crecimiento de biomasa
Xf = X0 * exp(mu * t_oper);                 % Biomasa final [g/m3]
biomasa_total = Xf * V;                    % Biomasa total [g]
CO2_consumido = biomasa_total * 1.83;      % CO2 capturado [g]

%% Cálculo del número de Reynolds
Re = (Q * 4) / (pi * D * nu);              % Número de Reynolds

%% Factor de fricción
if Re < 2300
    f_friccion = 64 / Re;                   % Flujo laminar
else
    f_friccion = 0.02;
    for i = 1:10
        f_friccion = 1 / (-2 * log10((epsilon / (3.7 * D)) + (2.51 / (Re *
sqrt(f_friccion))))))^2;
    end
end

%% Pérdida de carga y energía
v = Q / (pi * (D/2)^2);                    % Velocidad del fluido
hf = f_friccion * (L / D) * (v^2) / (2 * g); % Pérdida de carga [m]
hf = max(hf, 2);
Delta_P = rho * g * hf;                    % Presión [Pa]
P_bomba_W = (Q * Delta_P) / eta_bomba;     % Potencia en W
P_bomba_kW = P_bomba_W / 1000;            % Potencia en kW
energia_total_kWh = (P_bomba_kW + P_agitador_kW) * (t_oper / 3600); % Energía
[kWh]

%% Penalización por área excesiva
penalizacion_area = 0;
if A_superficie > 50
    penalizacion_area = 1000 * (A_superficie - 50);
end

%% Normalización de objetivos
energia_ref = 2;                          % [kWh]
biomasa_ref = 10000;                      % [g]
CO2_ref = 18300;                          % [g]

```

```
%% Función objetivo
alpha = 0.4;
beta = 0.3;
gamma = 0.3;

fitness = alpha * (energia_total_kWh / energia_ref) + ...
          beta * (1 - biomasa_total / biomasa_ref) + ...
          gamma * (1 - CO2_consumido / CO2_ref) + ...
          penalizacion_area;

if isnan(fitness) || isinf(fitness)
    fitness = 1e6;
end

fitness = max(0, fitness);

%% Asignar outputs
f = fitness;
energia = energia_total_kWh;
P_bomba = P_bomba_kW;
CO2 = CO2_consumido;
biomasa = biomasa_total;
area = A_superficie;
volumen = V;
end
```

Anexo B

Código para la función de optimización del fotobiorreactor.

```

clc
clear all
close all

% Número de variables (ahora son 8, ya no se optimiza mu)
nvars = 8;

longitudes_comerciales = [1, 2, 3, 4, 5, 6]; % [m]
diametros_comerciales = [0.03175, 0.0381, 0.0508, 0.05715, 0.0762]; % [m]

% Límites inferiores y superiores
lb = [min(longitudes_comerciales), min(diametros_comerciales), 0.005, 10, 25000, 293,
150, 150]; % sin mu
ub = [max(longitudes_comerciales), max(diametros_comerciales), 0.011, 35, 40000, 303,
300, 300]; % sin mu

% Función para guardar historial del fitness y población
function [state, options, optchanged] = outputfun_guardar_historial(options, state,
flag)
    global hist_fitness hist_population
    optchanged = false;
    switch flag
        case 'iter'
            hist_fitness(end+1) = state.Best(end);
            hist_population = [hist_population; state.Population];
    end
end

% Almacenar historial
global hist_fitness hist_population
hist_fitness = [];
hist_population = [];

% Opciones del algoritmo genético
options = optimoptions('ga',...
    'PopulationSize', 300, ...
    'MaxGenerations', 300, ...
    'Display', 'iter', ...
    'FunctionTolerance', 1e-6, ...
    'PlotFcn', {@gaplotbestf}, ...
    'OutputFcn', @outputfun_guardar_historial, ...
    'UseParallel', false, ...
    'EliteCount', 5, ...
    'CrossoverFraction', 0.8, ...
    'MutationFcn', {@mutationadaptfeasible});

% Ejecutar optimización
[x_opt, fval_opt, exitflag, output, population, scores] =
ga(@objetivo_fotobiorreactor, nvars, [], [], [], [], lb, ub, [], options);

% Guardar resultados finales

```

```

final_pop = population;
final_scores = scores;

% Mostrar mejor resultado
disp('--- Mejor solución encontrada ---');
[f, energia, P_bomba, CO2, biomasa, area, volumen, mu] =
objetivo_fotobiorreactor(x_opt);
fprintf('Longitud tubo (L): %.2f m\n', x_opt(1));
fprintf('Diámetro tubo (D): %.3f m\n', x_opt(2));
fprintf('Caudal (Q): %.4f m³/s\n', x_opt(3));
fprintf('Número de tubos: %d\n', round(x_opt(4)));
fprintf('Tiempo operación: %.0f s\n', x_opt(5));
fprintf('Temperatura: %.1f K\n', x_opt(6));
fprintf('X0: %.1f g/m³\n', x_opt(7));
fprintf('Intensidad luminosa: %.1f µmol/m²·s\n', x_opt(8));
fprintf('Tasa crecimiento mu (calculada): %.6f 1/s\n', mu);
fprintf('Valor función objetivo: %.4f\n', fval_opt);

% Mostrar gráfica del fitness
figure;
plot(hist_fitness, 'LineWidth', 2);
xlabel('Generación');
ylabel('Mejor valor de función objetivo');
title('Evolución del valor óptimo');
grid on;

% -----
% Top 5 mejores soluciones únicas
% -----
[sorted_scores, idx] = sort(scores);
sorted_population = population(idx, :);

% Eliminar duplicados exactos
[~, unique_idx] = unique(sorted_population, 'rows');
unique_population = sorted_population(unique_idx, :);
unique_scores = sorted_scores(unique_idx);

% Seleccionar top 5 únicos
top_n = min(5, size(unique_population, 1));
best_individuals = unique_population(1:top_n, :);
top_scores = unique_scores(1:top_n);

% Inicializar vectores para gráficas
hist_L = [];
hist_D = [];
hist_Q = [];
hist_P_bomba = [];
hist_X0 = [];
hist_mu = [];
hist_A = [];
hist_biomasa = [];
hist_energia = [];

% Mostrar las mejores soluciones y almacenar para gráficas

```

```

disp('--- Top 5 mejores soluciones (con salidas) ---');
for i = 1:top_n
    x_i = best_individuals(i, :);
    [f, energia, P_bomba, CO2, biomasa, area, volumen, mu] =
objetivo_fotobiorreactor(x_i);

    hist_L(end+1) = x_i(1);
    hist_D(end+1) = x_i(2);
    hist_Q(end+1) = x_i(3);
    hist_P_bomba(end+1) = P_bomba;
    hist_X0(end+1) = x_i(7);
    hist_mu(end+1) = mu;
    hist_A(end+1) = area;
    hist_biomasa(end+1) = biomasa;
    hist_energia(end+1) = energia;

    fprintf('\nSolución #%d\n', i);
    fprintf('L: %.2f m, D: %.3f m, Q: %.4f m³/s, N° tubos: %d\n', ...
        x_i(1), x_i(2), x_i(3), round(x_i(4)));
    fprintf('Tiempo: %.0f s, Temp: %.1f K\n', ...
        x_i(5), x_i(6));
    fprintf('X0: %.1f, I: %.1f, mu: %.6f\n', ...
        x_i(7), x_i(8), mu);
    fprintf('Fitness: %.4f\n', top_scores(i));
    fprintf('>> CO₂ capturado: %.2f gramos\n', CO2);
    fprintf('>> Biomasa producida: %.2f gramos\n', biomasa);
    fprintf('>> Energía consumida: %.2f kWh\n', energia);
    fprintf('>> Potencia de la bomba: %.3f kW\n', P_bomba);
    fprintf('>> Área superficial: %.2f m², Volumen: %.2f m³\n', area, volumen);
end

```

Anexo C

Costos de los componentes del fotobiorreactor.



Ver más productos marca Truper

Nuevo | +5 vendidos

MÁS VENDIDO 6° en Bombas Centrifugas


Bomba De Agua Periferica Eléctrica 1hp Truper 10070 Color Naranja Frecuencia 60 Hz

4.8 ★★★★★ (5)

~~\$ 490.900~~
\$ 439.700 10% OFF
 en 3 cuotas de \$ 146.567 con 0% interés

Ver los medios de pago

Color: Naranja



ERSON erson.de

Oferta Noticias Sobre nosotros Contacto telefon 

CATEGORÍAS ▾    



Tubos De Policarbonato 10mm/7mm

17,00 zł - 29,00 zł (20,91 zł - 35,67 zł inkl. MwSt.)

Länge

1

♥ Agregar a la lista de deseos

SKU: N/D
 Categoría: Tubos de policarbonato

 Entrega rápida  Pagos rápidos  +48 695 995 270



SOLD OUT

Inicio / CONSTRUCCIÓN / TUBERIA PVC / ACCESORIOS PVC / Union lisa pvc presion 3", durman

Union lisa pvc presion 3", durman

\$ 16.500

UNION LISA PVC 3" DURMAN, PARA ALTA PRESION

Sin existencias

Paga con tarjeta de crédito, débito, PSE y efectivo



SKU: 2005840

Categorías: ACCESORIOS PVC, CONSTRUCCIÓN, TUBERIA PVC

Etiquetas: DURMAN, TUBERIA DE PRESION, TUBO, UNION LISA

Compártelo en: [f](#) [t](#) [p](#) [in](#) [e](#)

Todas las Categorías

Comprador Ayuda Apps Español

Inicio > Maquinaria de Procesamiento > Maquinaria Agrícola > Maquinaria de Plantación y Fertilización



3 pulgadas de la agricultura de los inyectores de fertilizante de riego por goteo Venturi

US\$ 36,00-39,00

120 Piezas (MOQ)

Detalles de Producto

Personalización: Disponible
 El campo de aplicación: Agricultura
 Función: Fertilización

[Contactar](#) [Charlar](#)

¿Aún no te decides? ¡Consigue muestras por US\$ 39/Pieza! [Solicitar Muestra](#)

ARKA Fuzhou Arthas Fluid Equipment Technology Co.,... > [786](#) [📍](#)
 Fabricante/Fábrica & Empresa Comercial



Tanque 1.000 Lts para Almacenamiento de Agua

SKU: 13840

STOCK: 91

\$403.900 ~~\$459.900~~

Oferta de 12% en este producto!

AÑADIR AL CARRO

Tanque / Agua / Almacenamiento / 1000 Litros en polietileno resistente, ideal para uso residencial, agrícola o industrial. Cuenta con tapa desmontable de cierre hermético, protección contra la intemperie y certificación de calidad ICONTEC.

Encuentra aquí los mejores pisos y paredes para la decoración y remodelación de tu hogar. Aprovecha y realiza tu compra ya, contamos con envíos gratis a nivel nacional por compras superiores a \$199.900 y si estas en Sincelejo, Sucre el envío se realiza en menos de 24 horas hábiles.

IMPORTANTE: El envío de estos productos aplica únicamente para Sucre, Bolívar y Municipios cercanos al departamento, si está por fuera de los límites por favor consultar el valor del despacho *Aplica Términos y condiciones*

Precios sujetos a negociación por volumen, para mayor información visítenos en alguna de nuestras sucursales.



Nuevo | 2 vendidos



Mezclador Industrial Agitador Pintura Químico Neumático 50g

\$1.680.000

en 12 cuotas de \$140.000 con 0% interés

[Ver los medios de pago](#)

Envío gratis a todo el país

Conoce los tiempos y las formas de envío.

[Calcular cuándo llega](#)

Disponible 18 días después de tu compra

Cantidad: **1 unidad** ▾ (+5 disponibles)

Comprar ahora

Agregar al carrito



Bodega Industrial
Ferretera
649 visitas

[Ver Empresa](#)

ESPECIFICACIONES

Marca: Bodega

Entregas a: CDMX

Industrial y Científico › Hidráulica, Neumática y Plomería › Aditamentos › Válvulas › Válvulas Esféricas



Zócalo de válvula de bola de PVC de 3 pulgadas con mango en T rojo para líneas de suministro de agua fría, sistema de instalación de tubería de riego (zócalo x zócalo), instalación de válvulas de

Marca: Lswteiz
4.7 ★★★★★ 232 calificaciones

Opción Amazon

100+ comprados el mes pasado

US\$ 29.99

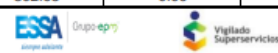
Sin cargos de importación y US\$16.08 de envío a Colombia Detalles ▼

Tamaño: 3Inch

1Inch Ver las opciones disponibles	1-1/2Inch Ver las opciones disponibles	1/2Inch Ver las opciones disponibles	2Inch US\$12.99	2-1/2Inch US\$20.99
3Inch US\$29.99	3/4Inch US\$12.99			

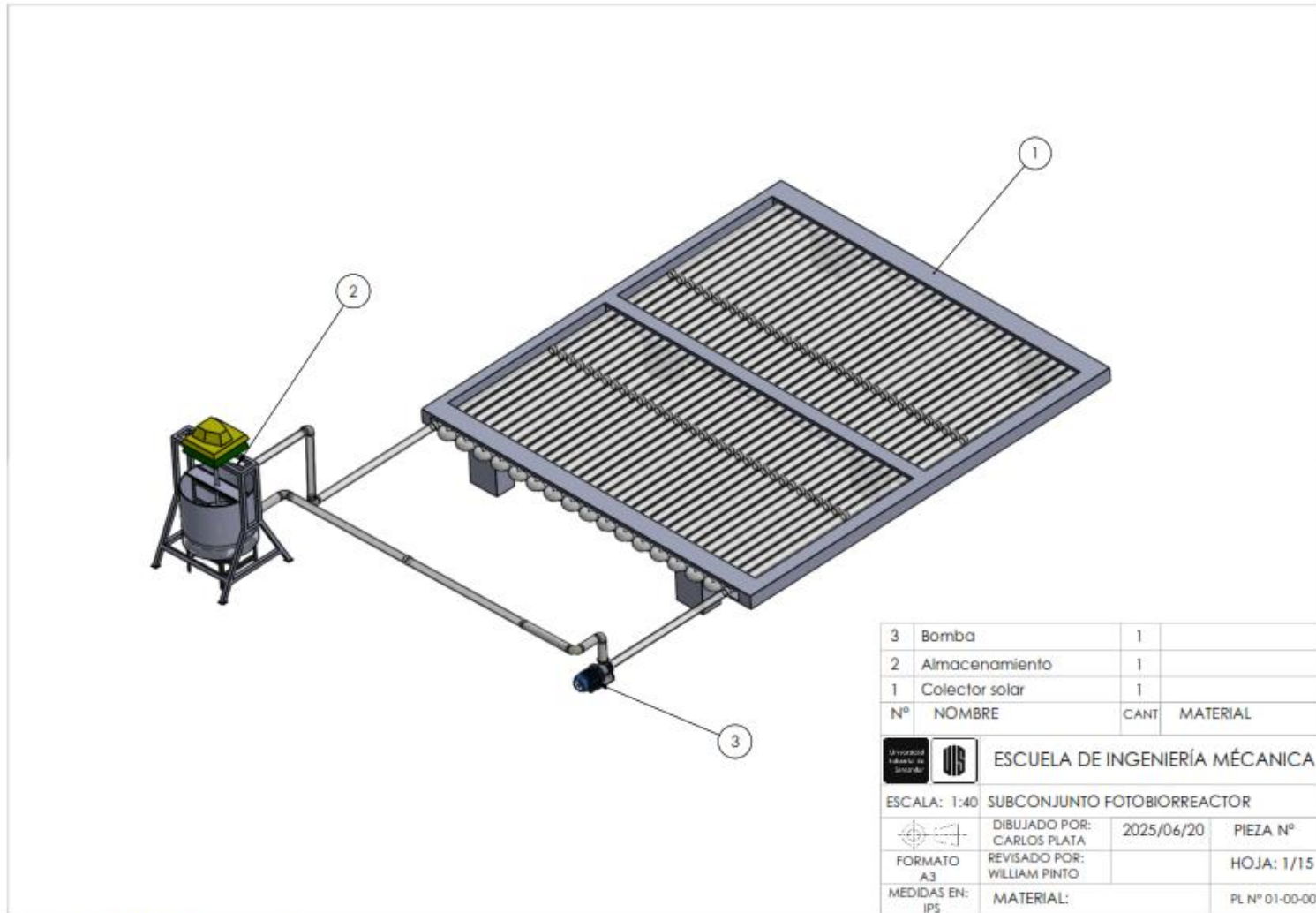
Anexo D

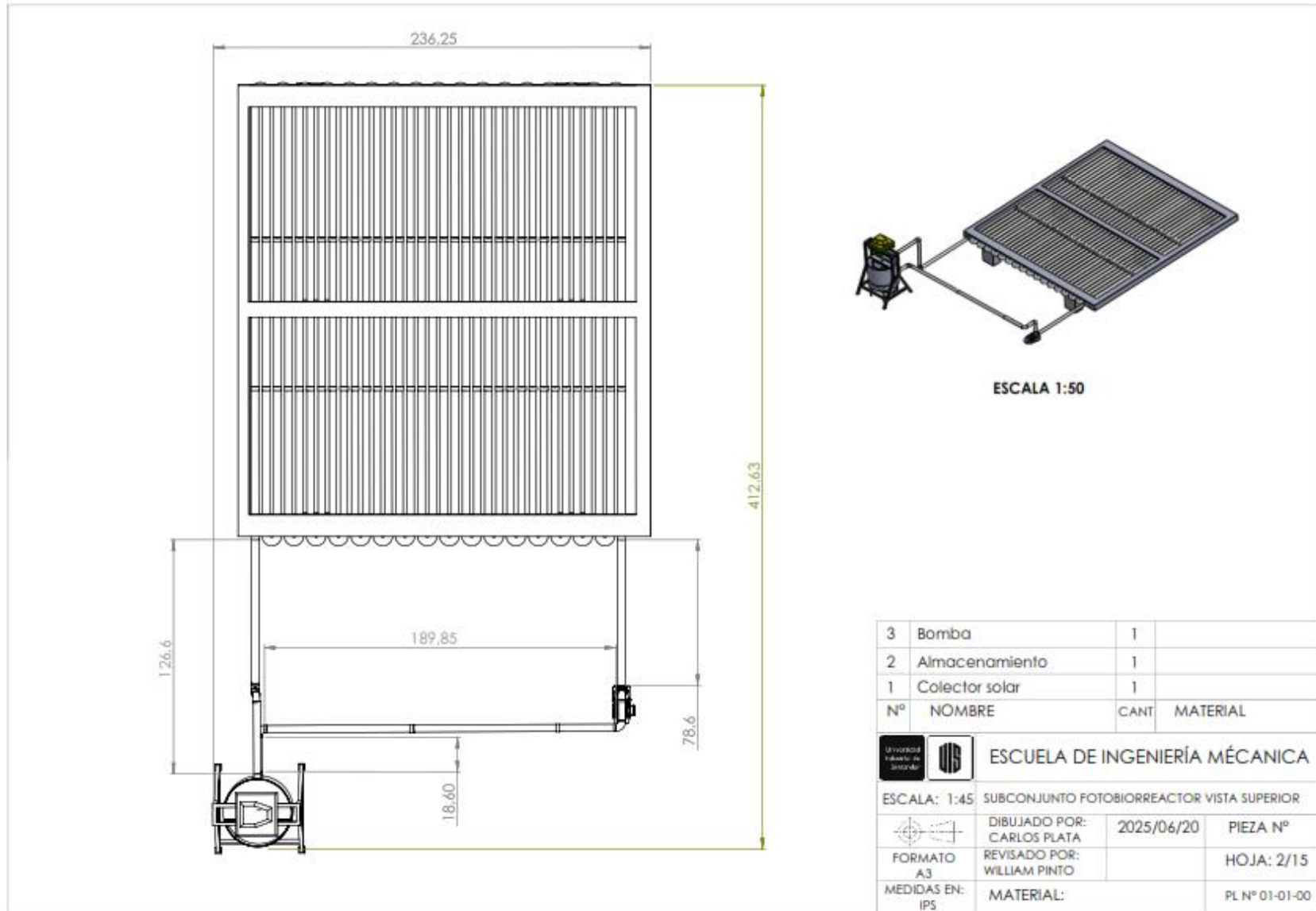
Tarifa de costos energéticos de ESSA.

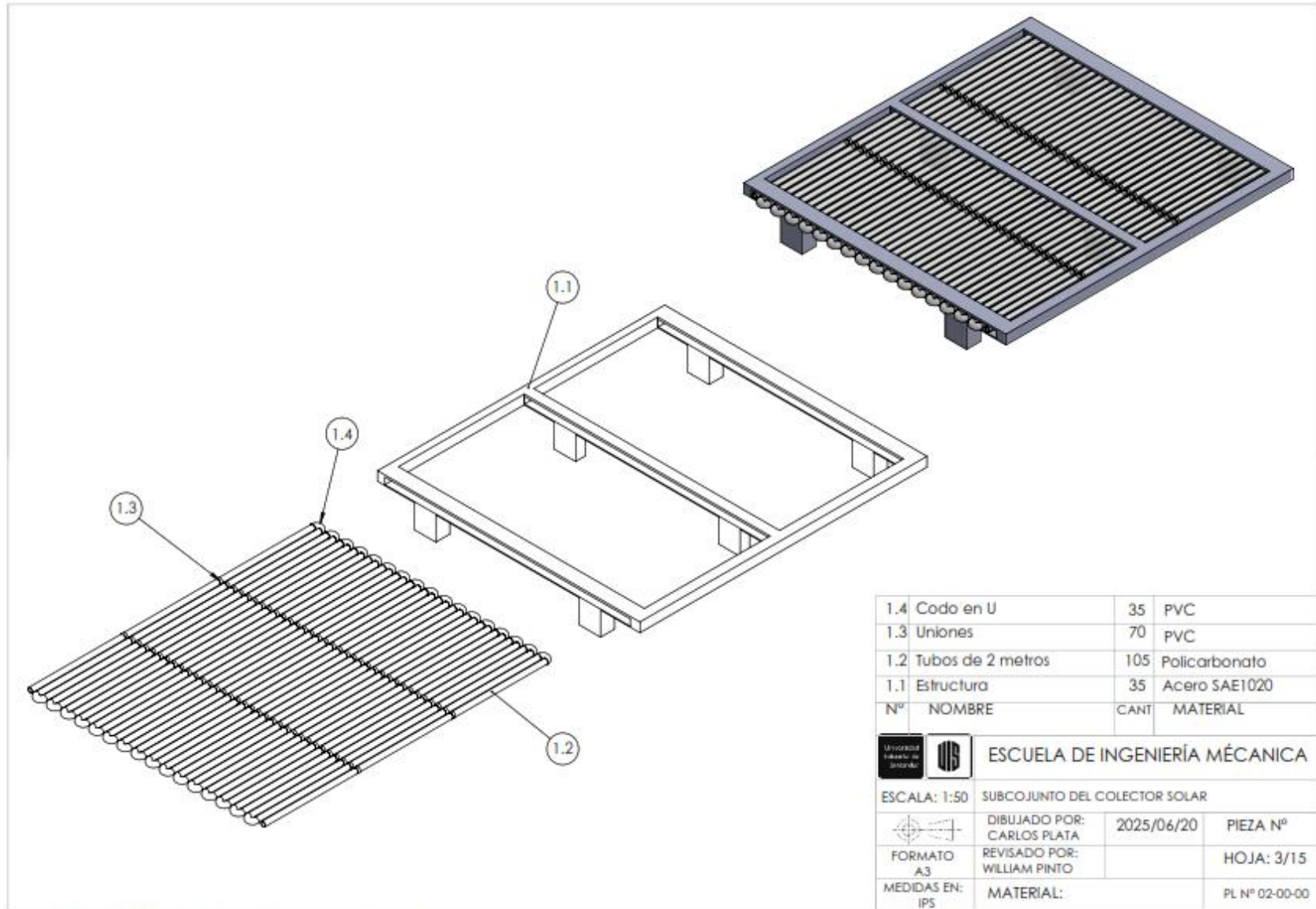
ELECTRIFICADORA DE SANTANDER S.A. ESP.									
INFORMA A SUS USUARIOS DEL SISTEMA DE ENERGIA ELECTRICA DEL DEPARTAMENTO DE SANTANDER, NORTE DE SANTANDER, SUR DEL CESAR, BOLIVAR Y BOYACA, Y LAS TARIFAS DEL MERCADO REGULADO DE MAYO DE 2025									
Teniendo en cuenta las resoluciones 119/07, 180/14, 191/14 y 015/16, 015/18, 019/18, 158/19, 103/19, 129/19, 036/19, 199/19, 104/20, 174/21, 101 002/22, 501 023/22, 101 028/23 expedidas por la Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG, que permiten establecer los costos de la prestación del servicio a usuarios regulados.									
TARIFAS RESIDENCIALES									
ESTRATO		1		2		3		4	
PROPIEDAD ACTIVOS	NIVEL MEDIDA	% SUBSIDIO	TARIFA \$/kWh	% SUBSIDIO	TARIFA \$/kWh	% SUBSIDIO	TARIFA \$/kWh	TARIFA \$/kWh	
ESSA	I	-53.2787%	415.02	-41.5984%	518.78	-15.00%	755.05	888.29	
CLIENTE		-52.2105%	380.76	-40.2631%	475.95	-15.00%	677.24	796.75	
COMPARTIDA		-52.7736%	397.89	-40.9670%	497.36	-15.00%	716.14	842.52	
ESSA sin COT	I	-51.3215%	413.00	-39.1518%	516.25	-15.00%	721.16	848.42	
CLIENTE sin COT		-50.2816%	376.31	-37.8520%	470.39	-15.00%	643.35	756.88	
COMPARTIDA sin COT		-50.6394%	396.19	-38.2992%	495.24	-15.00%	682.25	802.65	
Nota: El subsidio es aplicado hasta el consumo de subsistencia.									
TARIFAS RESIDENCIALES				TARIFAS NO RESIDENCIALES					
ESTRATO		5 y 6		COMERCIAL / INDUSTRIAL		ACUEDUCTOS. ESP		OFICIAL	
PROPIEDAD ACTIVOS	NIVEL MEDIDA	% CONTRIB.	TARIFA \$/kWh	CONTRIB. 20%	TARIFA \$/kWh	CONTRIB. 10%	TARIFA \$/kWh	TARIFA \$/kWh	
ESSA	I	20.00%	1065.95	177.66	1065.95	88.83	977.12	888.29	
CLIENTE		20.00%	956.10	159.35	956.10	79.67	876.42	796.75	
COMPARTIDA		20.00%	1011.02	168.50	1011.02	84.25	926.77	842.52	
	II			142.33	854.01	71.17	782.84	711.67	
	III			118.41	710.47	59.21	651.26	592.05	
	IV			101.27	607.62	50.64	556.99	506.35	
ESSA sin COT	I	20.00%	1018.11	169.68	1018.11	84.84	933.26	848.42	
CLIENTE sin COT	I	20.00%	908.25	151.38	908.25	75.69	832.57	756.88	
COMPARTIDA sin COT	I	20.00%	963.18	160.53	963.18	80.27	882.92	802.65	
	II sin COT			137.69	826.11	68.84	757.27	688.43	
	III sin COT			113.52	681.12	56.76	624.36	567.60	
	IV sin COT			101.27	607.62	50.64	556.99	506.35	
COMPONENTES DEL COSTO UNITARIO VARIABLE Y FLUJO DE PRESTACION DEL SERVICIO (CU) según Res. CREG 119/2007									
Conforme con las resoluciones CREG 180/14, 015/16 y 019/18 el valor (Cfm.) que aplica para el mes de Mayo de 2025 es 9890.52 \$/factura									
NIVEL MEDIDA	G	T	D	Cv	PR	R	CUv Calculado	COT	CUf Aplicado
	Compra Energía	Costo STN	Costo Distribución	Costo de Comercialización	Costo de Compra, transporte y reducción de pérdidas	Costo de Restricciones	Costo Unitario Variable de Prestación del Servicio	Costo Recuperación Opción Tarifaria CREG 101 628/23	Costo Unitario Fijo de Prestación del Servicio
	\$/kWh	\$/kWh	\$/kWh	\$/kWh	\$/kWh	\$/kWh	\$/kWh	\$/kWh	\$/kWh
I ESSA	274.74	56.76	326.95	123.78	62.27	43.80	888.29	39.87	0.00
I CLIENTE	274.74	56.76	235.40	123.78	62.27	43.80	796.75	39.87	0.00
II	274.74	56.76	206.27	107.16	22.95	43.80	711.67	23.24	0.00
III	274.74	56.76	90.89	108.37	17.50	43.80	592.05	24.45	0.00
IV	274.74	56.76	36.10	83.91	11.04	43.80	506.35	0.00	0.00
I 50%	274.74	56.76	281.17	123.78	62.27	43.80	842.52	39.87	0.00
I ESSA sin COT	274.74	56.76	326.95	83.91	62.27	43.80	848.42	0.00	0.00
I CLIENTE sin COT	274.74	56.76	235.40	83.91	62.27	43.80	756.88	0.00	0.00
II sin COT	274.74	56.76	206.27	83.91	22.95	43.80	688.43	0.00	0.00
III sin COT	274.74	56.76	90.89	83.91	17.50	43.80	567.60	0.00	0.00
IV sin COT	274.74	56.76	36.10	83.91	11.04	43.80	506.35	0.00	0.00
I 50% sin COT	274.74	56.76	281.17	83.91	62.27	43.80	802.65	0.00	0.00
CONSUMO DE SUBSISTENCIA		Alturas inferior a 1000 Mts		Alturas superior o = a 1000 Mts					
Resolución UPME 0355 de 8 de Julio de 2004.		173 kWh		130 kWh					

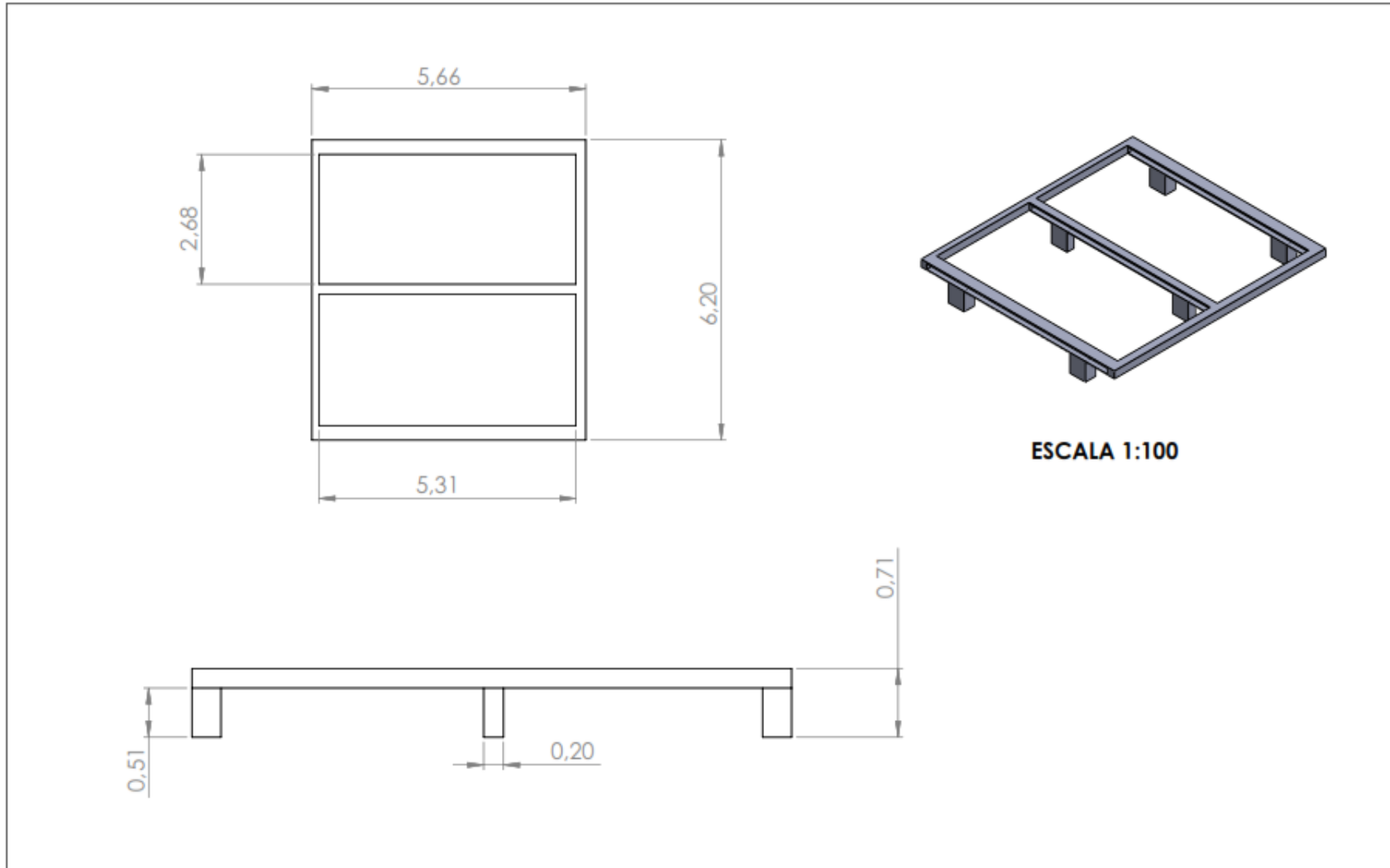
Anexo E

Planos del fotobiorreactor.


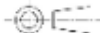


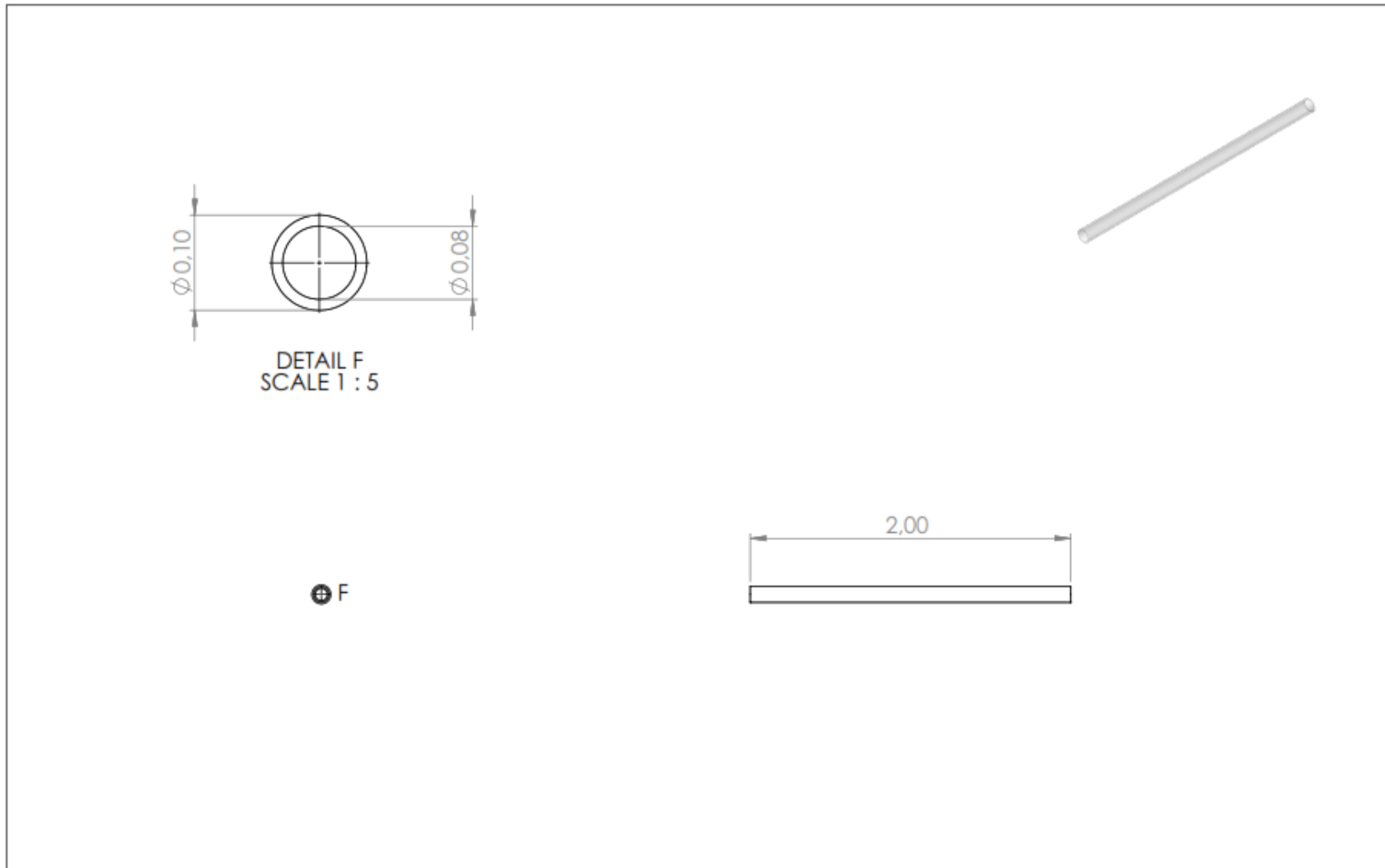



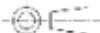


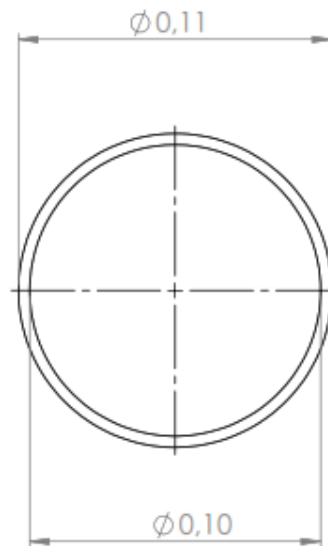


ESCALA 1:100

Universidad Industrial de Santander 	ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA			BASE DEL COLECTOR		PIEZA N° 1.1	Material: SAE 1020
	ESCALA: 1:100	MEDIDAS EN: m	FECHA: 20/06/22	DIBUJADO POR: CARLOS PLATA		HOJA: 4/15	PL N° 01-01-01



Universidad Industrial de Santander 	ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA			TUBO		PIEZA N° 1.2	Material: Policarbonato
	ESCALA: 1:30	MEDIDAS EN: METROS	FECHA: 20/06/25	DIBUJADO POR: CARLOS PLATA		HOJA: 5/15	PL N° 01-01-02



Universidad
Industrial de
Santander



ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

UNION

PIEZA N° 1.3

Material:
PVC

ESCALA: 1:2

MEDIDAS EN: m

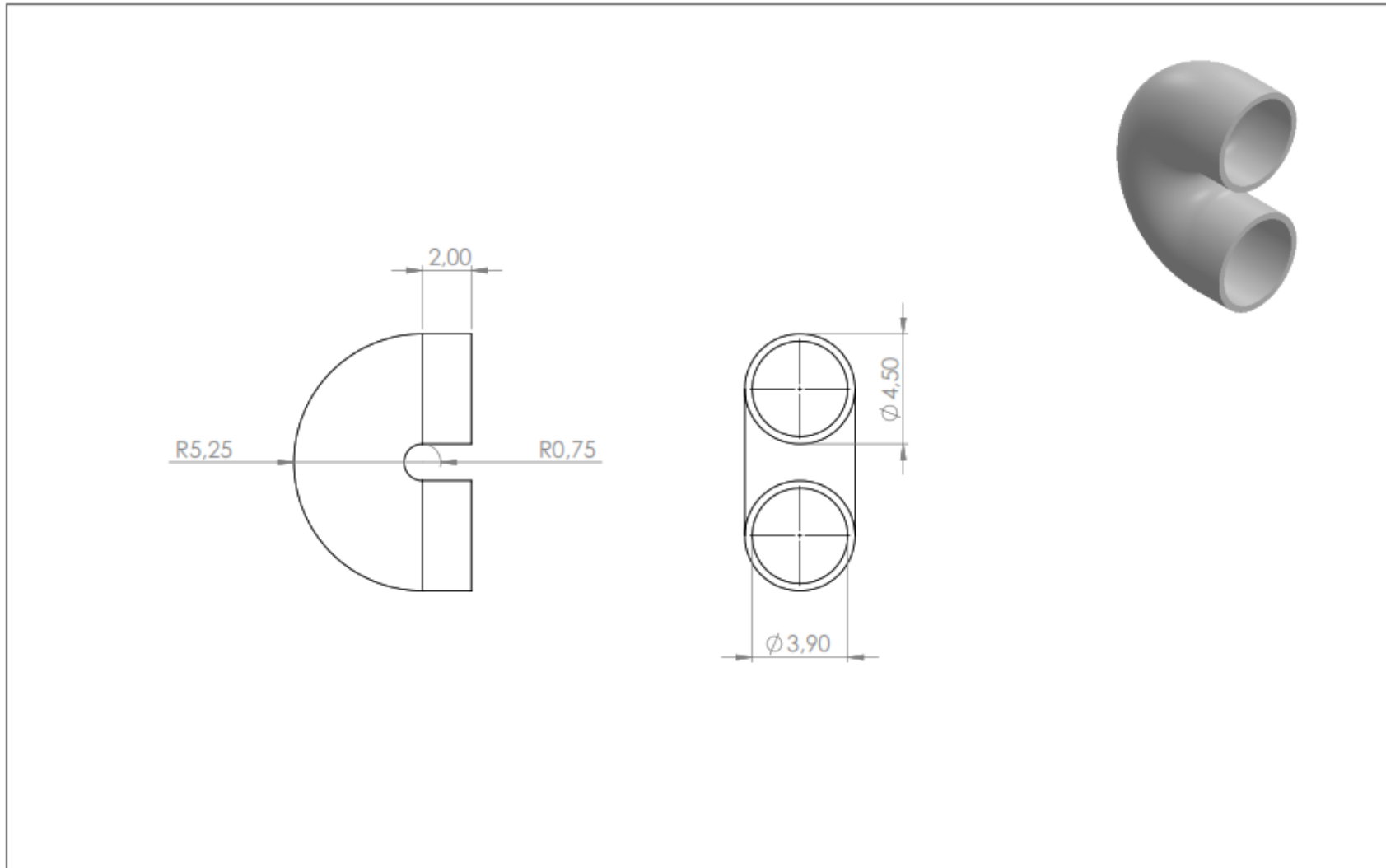
FECHA: 20/06/25


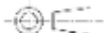
DIBUJADO POR:
CARLOS PLATA

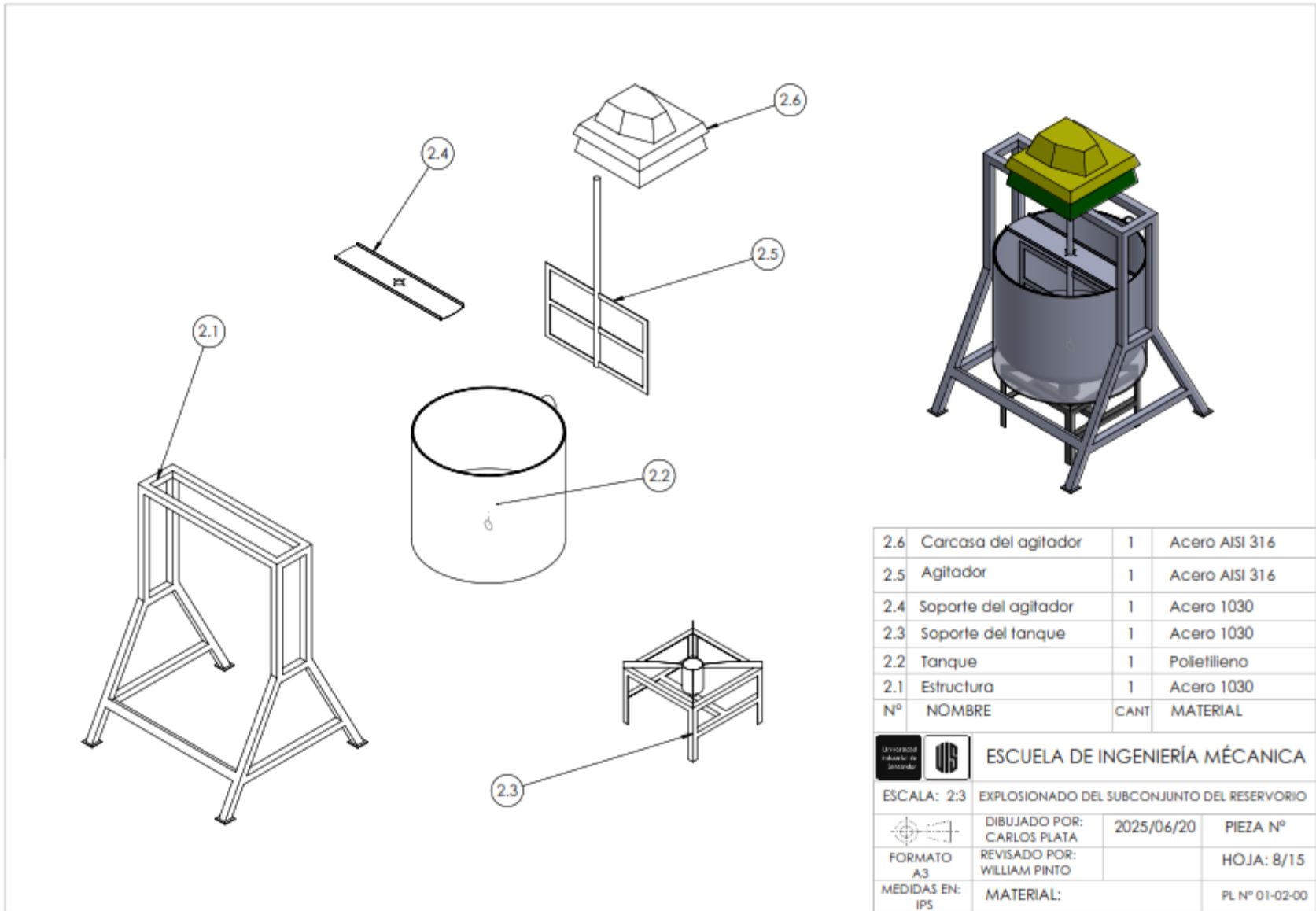


HOJA: 6/15

PL N° 01-01-03

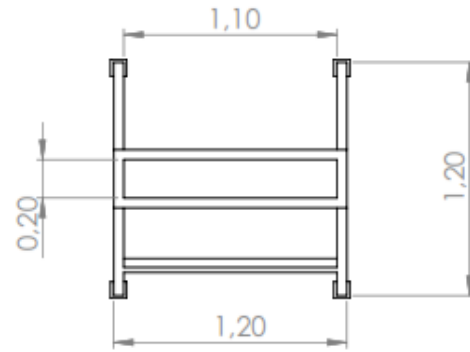


Universidad Industrial de Santander 	ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA			UNIÓN EN U		PIEZA N° 1.4	Material: PVC
	ESCALA: 1:5	MEDIDAS EN: IPS	FECHA: 20/06/25	DIBUJADO POR: CARLOS PLATA		HOJA: 7/15	PL N° 01-01-04

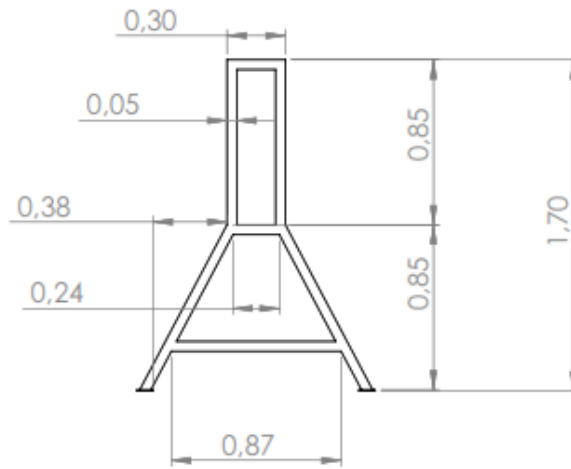




2.6	Carcasa del agitador	1	Acero AISI 316
2.5	Agitador	1	Acero AISI 316
2.4	Soporte del agitador	1	Acero 1030
2.3	Soporte del tanque	1	Acero 1030
2.2	Tanque	1	Poliétileno
2.1	Estructura	1	Acero 1030
Nº	NOMBRE	CANT	MATERIAL

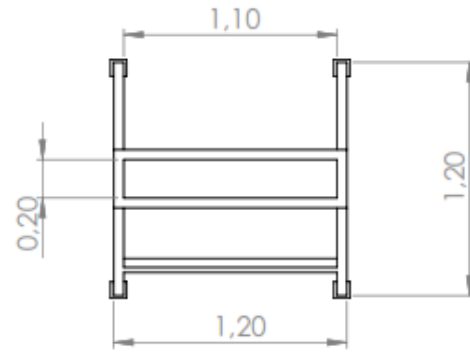
	ESCUELA DE INGENIERÍA MÉCANICA		
ESCALA: 2:3	EXPLOSIONADO DEL SUBCONJUNTO DEL RESERVORIO		
	DIBUJADO POR: CARLOS PLATA	2025/06/20	PIEZA Nº
FORMATO A3	REVISADO POR: WILLIAM PINTO		HOJA: 8/15
MEDIDAS EN: IPS	MATERIAL:		PL Nº 01-02-00



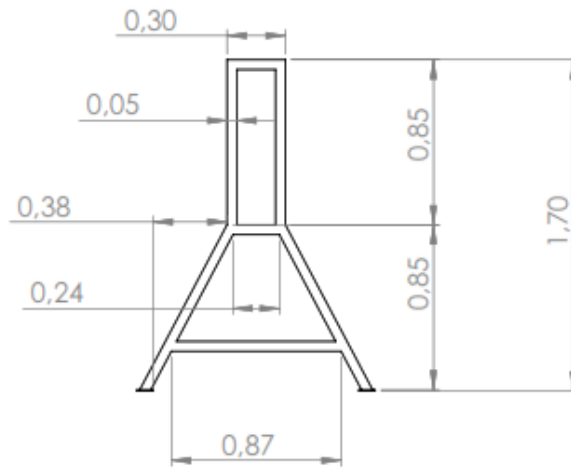
ESCALA 1:30



Universidad Industrial de Santander 	ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA			ESTRUCTURA		PIEZA N° 2.1	Material: SAE 1030
	ESCALA: 1:30	MEDIDAS EN: m	FECHA: 20/06/25	DIBUJADO POR: CARLOS PLATA		HOJA: 9/15	PL N° 01-02-01



ESCALA 1:30



Universidad Industrial de Santander



ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESTRUCTURA

PIEZA N° 2.1

Material:
SAE 1030

ESCALA: 1:30

MEDIDAS EN: m

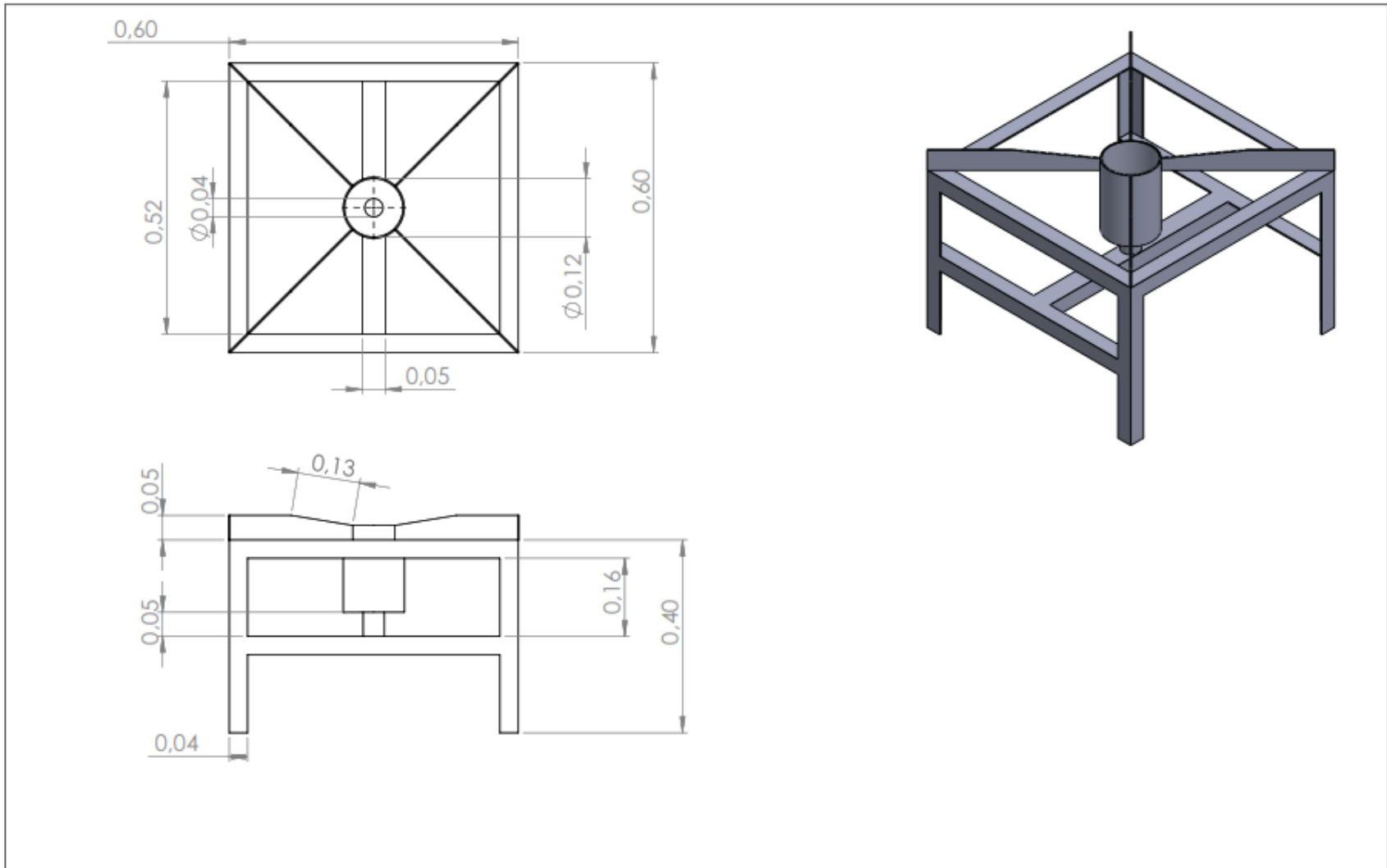
FECHA: 20/06/25


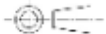
DIBUJADO POR:
CARLOS PLATA

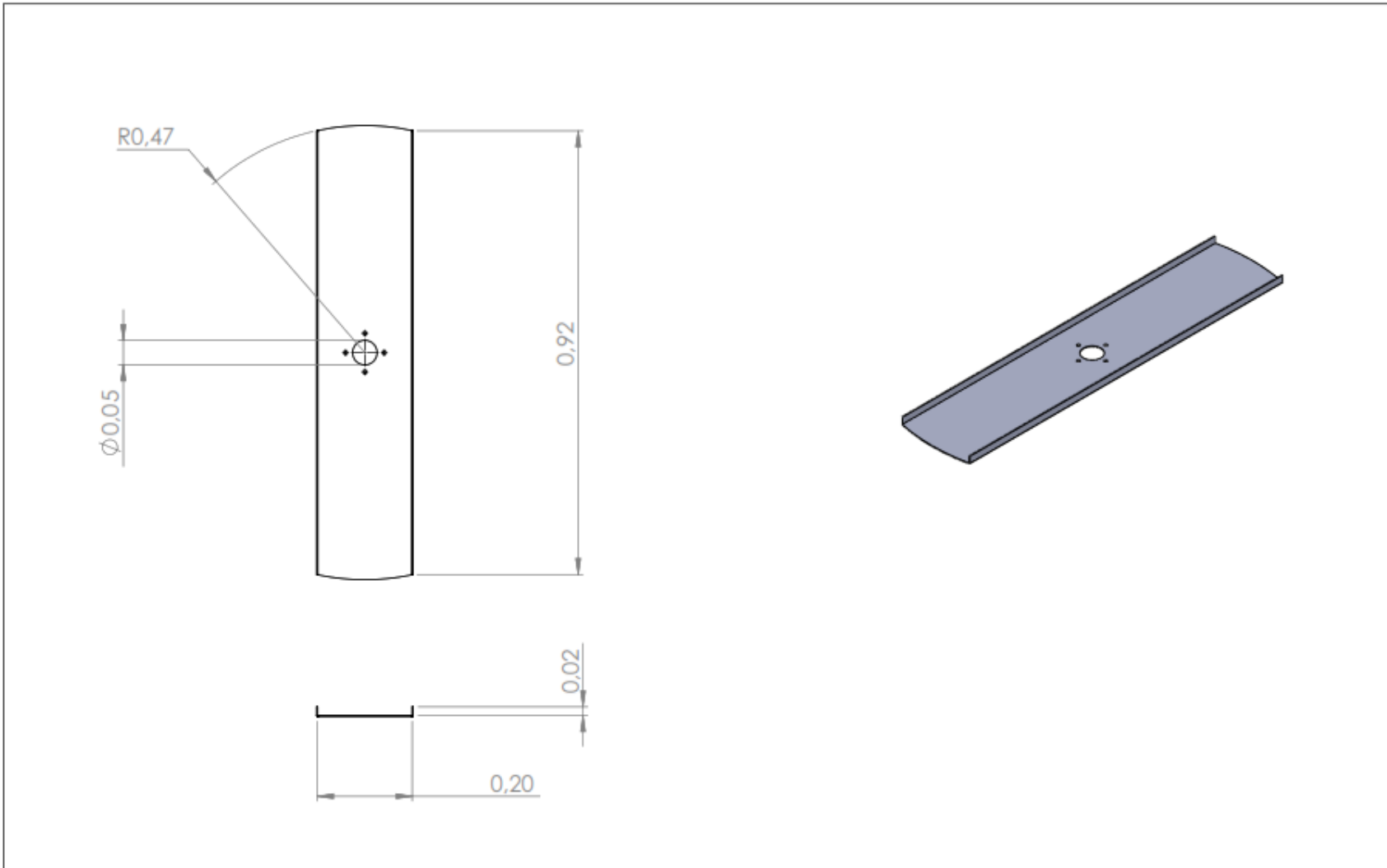



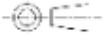
HOJA: 9/15

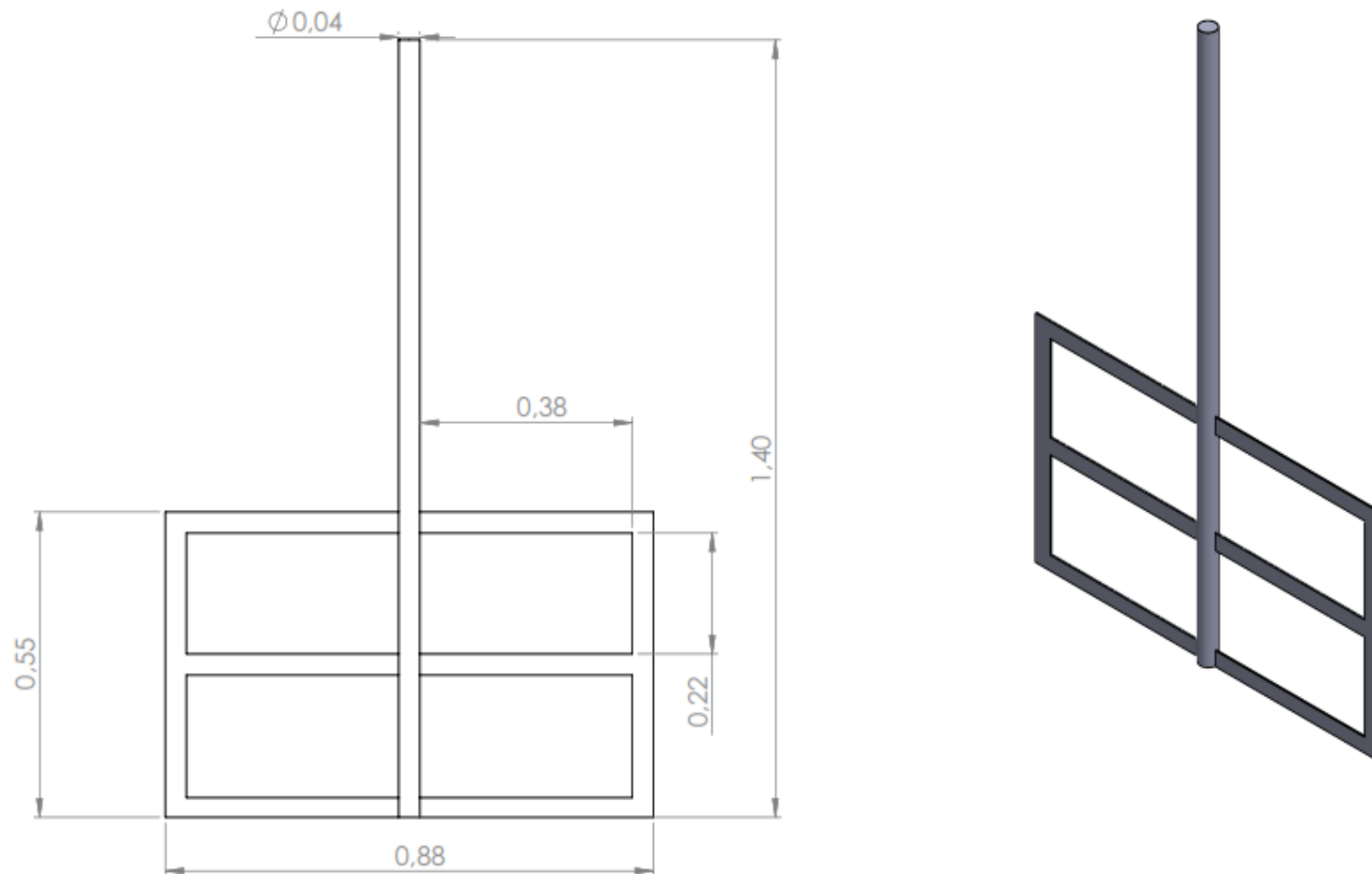
PL N° 01-02-01



Universidad Industrial de Santander 	ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA			SOPORTE DEL TANQUE		PIEZA N° 2.3	Material: SAE 1030
	ESCALA: 1:10	MEDIDAS EN: m	FECHA: 20/06/25	DIBUJADO POR: CARLOS PLATA		HOJA: 11/15	PL N° 01-02-03



Universidad Industrial de Santander 	ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA		SOPORTE AGITADOR		PIEZA N° 2.4	Material: SAE 1030
	ESCALA: 1:10	MEDIDAS EN: m	FECHA: 20/06/25	DIBUJADO POR: CARLOS PLATA		HOJA: 12/15



Universidad
Industrial de
Sancander



ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

ESCALA: 1:10

MEDIDAS EN: m

FECHA: 20/06/25

AGITADOR

DIBUJADO POR:
CARLOS PLATA

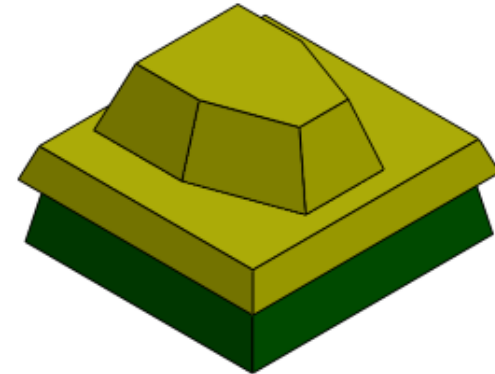
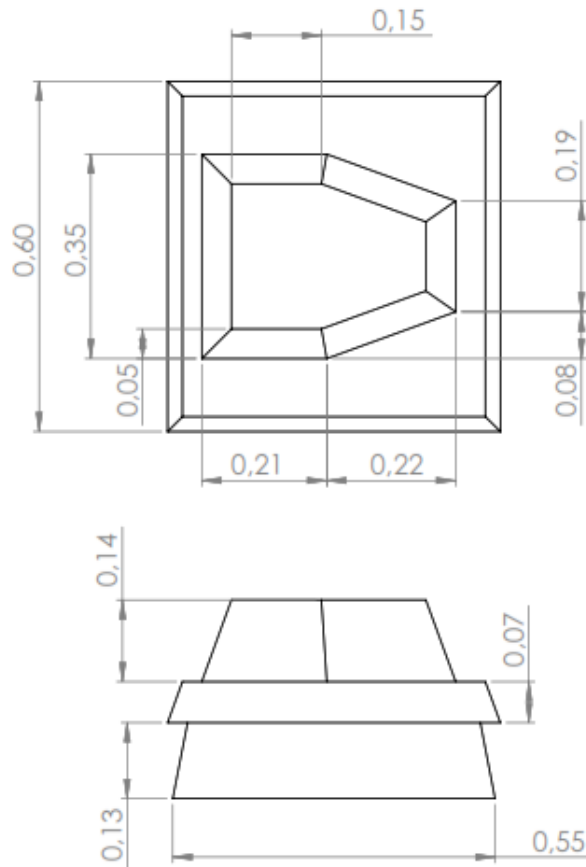


PIEZA N° 2.5

HOJA: 13/15

Material:
AISI 316

PL N° 01-02-05



Universidad Industrial de Santander



ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

CARCASA AGITADOR

PIEZA N° 2.6

Material:
SAE 1030

ESCALA: 1:10

MEDIDAS EN: IPS

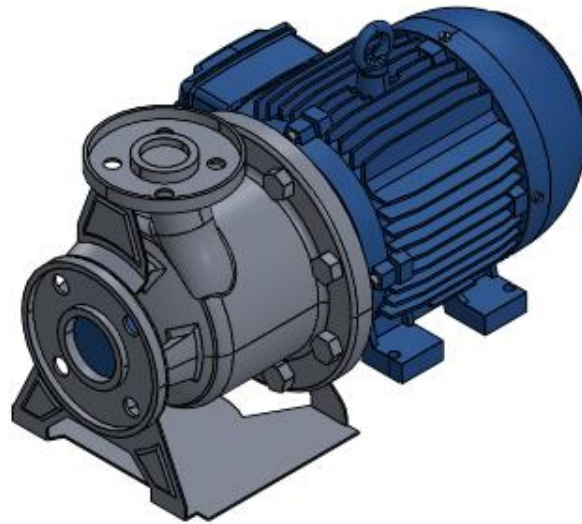
FECHA: 20/06/25

DIBUJADO POR:
CARLOS PLATA




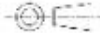
HOJA: 14/15

PL N° 01-02-06



BOMBA CENTRIFUGA TRUPER DE 1 HP

Frecuencia: 60 Hz.
 Fase eléctrica: Monofásica.
 Potencia: 1 HP
 Voltaje: 110V.
 Pesa 10kg.
 Con diámetro de entrada de 2.54 cm y de salida de 2.54 cm.
 Altura máxima de 70m.
 Altura máxima de succión de 8m.
 Soporta un caudal máximo de agua de 50l/min.
 Impulsor de latón.
 El material del cuerpo esta hecho de acero.

Universidad Industrial de Santander 	ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA			BOMBA CENTRIFUGA		PIEZA N° 3	Material:
	ESCALA: 1:5	MEDIDAS EN: m	FECHA: 20/06/25	DIBUJADO POR: CARLOS PLATA		HOJA: 15/15	PL N° 01-03-00