

**ANÁLISIS DE ESTRATEGIAS PARA EL ESCALAMIENTO DE UN
FOTOBIORREACTOR TIPO *AIRLIFT* PARA EL CULTIVO DE MICROALGAS**

**ROCÍO MILENA CUAO ARÉVALO
ANA MARÍA MARTÍNEZ CEPEDA**

**Proyecto integral de grado para optar el título de
INGENIERO QUÍMICO**

**Director
Juan Daniel Valderrama Rincón
Ingeniero Químico**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ D.C
2021**

NOTA DE ACEPTACIÓN

Nombre
Firma del Director

Nombre
Firma del Presidente Jurado

Nombre
Firma del jurado

Nombre
Firma del jurado

Bogotá D.C, Noviembre de 2021

DIRECTIVOS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectoría Académica de Investigaciones

Dra. Alexandra Mejía Guzmán

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano de la Facultad de Ingenierías

Ing. Julio César Fuentes Arismendi

Director del Programa de Ingeniería Química

Ing. Nubia Liliana Becerra

DEDICATORIAS

Para mis padres que siempre han estado en cada momento de mi vida, gracias a su confianza, apoyo incondicional y gran amor que depositaron en mí, he culminado una meta en mi vida. Son mi más grande inspiración, orgullo y motivación para salir adelante. Nada de esto hubiera sido posible sin ustedes, este triunfo es para ustedes.

Rocío.

A mi mamá por motivarme a seguir adelante cada día, por su apoyo y amor incondicional. Eres mi ejemplo a seguir y la razón de mi vida. Sin ti no hubiese llegado hasta acá por eso te lo dedico a ti.

Ana María.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecerle a Dios por permitirme cumplir un logro más en mi vida, a mis padres Roberto Cuao y Rocío Arévalo por estar siempre en los buenos y en los malos momentos, por su gran esfuerzo por sacarme adelante, por depositar en mí su confianza y por ser los mejores consejeros. Gracias por enseñarme a tener confianza en mí, luchar por lo que quiero y a no rendirme ante las adversidades que se presenten. **Gracias por todo, son mi motor, los amo.**

A mis hermanos que siempre han estado en cada paso de mi vida, brindándome su amor, palabras de ánimo y su apoyo incondicional.

A mis amigos que estuvieron presentes en todo este largo camino, en donde compartí muchos momentos increíbles y aprendí algo de cada uno. Los mejores recuerdos gracias y por muchos más.

Rocío.

Le agradezco eternamente a mi mamá y a la vida por apoyarme en cada momento por animarme a seguir en cada momento que sentía que me rendía, por hacer todo lo posible por darme buenos estudios y bases para el camino que viene por delante, gracias por ser la mejor mamá del mundo eterno amor a ti.

Agradecerle a mi familia entera por lograr estar en este logro, al amor y sin olvidar a mis amigos más cercanos mucha luz para ustedes. Quiero también agradecer a Rocío porque sin ella esto no hubiese sido posible, por ser tan inteligente, y dedicada. Que tienes un espacio en mi corazón, gracias por todo no solo eres solamente mi amiga también eres la mejor colega que pude escoger para este punto de mi carrera.

Ana María.

Al profesor Juan Valderrama, director de este proyecto el cual siempre nos brindó su tiempo y nos orientó con sus conocimientos y paciencia, para sacar este trabajo de grado adelante. Agradecemos de todo corazón su paciencia y entrega.

Rocío y Ana María.

Las directivas de la Universidad de América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

TABLA DE CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	13
INTRODUCCIÓN	14
OBJETIVOS	15
1. MARCO TEÓRICO	16
1.1 Escalamiento	16
1.1.1 <i>Definición</i>	16
1.1.2 <i>Métodos de escalamiento</i>	16
1.1.3 <i>Variables más utilizadas para el escalamiento</i>	16
1.2 Biorreactores	17
1.2.2 <i>Definición</i>	17
1.2.2 <i>Clases de biorreactores</i>	17
1.3 Fotobiorreactores	18
1.3.1 <i>Tipos de fotobiorreactores</i>	18
1.4 Fotobiorreactor airlift	22
1.4.1 <i>Descripción del fotobiorreactor airlift</i>	23
1.4.2 <i>Ventajas del fotobiorreactor airlift</i>	24
1.5 Microalgas	25
1.5.1 <i>Definición</i>	25
1.5.2 <i>Tipos de metabolismo de las microalgas</i>	25
1.5.3 <i>Métodos de cultivo de las microalgas</i>	26
1.5.4 <i>Ventajas del uso de microalgas</i>	28
1.5.5 <i>Parámetros de cultivo</i>	28
1.5.6 <i>Medios de cultivo</i>	30
2. METODOLOGIA	31
3. PARÁMETROS DE ADAPTACIÓN PARA EL CULTIVO DE MICROALGAS EN UN FOTOBIORREACTOR	32
3.1 Selección de estudios	32
3.2 Análisis de parámetros de cultivo	36
3.2.1 <i>Tipo de cultivo</i>	36
3.2.2 <i>Cultivo continuo</i>	36
3.2.3 <i>Medio de cultivo</i>	37
3.3 Condiciones de operación	42
3.3.1 <i>La temperatura</i>	43
3.3.2 <i>El pH</i>	43

3.3.3 <i>Intensidad lumínica</i>	43
3.3.4 <i>Agitación</i>	45
4. VARIABLES PARA EL ESCALAMIENTO DE FOTOBIORREACTORES	46
4.1 Diseño conceptual de los fotobiorreactores <i>airlift</i>	46
4.2 Selección de estudios	46
4.3 Variables de diseño	49
4.3.1 <i>Volumen</i>	49
4.3.2 <i>Productividad</i>	50
4.3.3 <i>Productividad volumétrica (Pv)</i>	50
4.3.4 <i>Relación superficie-volumen (S/V)</i>	51
4.3.5 <i>Geometría de los fotobiorreactores Airlift</i>	52
4.3.6 <i>Fotobiorreactores Airlift de bucle interno</i>	54
4.3.7 <i>Fotobiorreactores Airlift de bucle externo</i>	54
4.3.8 <i>Difusores de gas</i>	56
4.3.9 <i>Tipos de difusores</i>	56
4.3.10 <i>Ubicación del difusor de gas</i>	58
4.3.11 <i>Tamaño de burbuja</i>	59
4.4 <i>Variables de operación</i>	60
4.4.1 <i>Transferencia de masa</i>	60
4.4.2 <i>Coefficiente volumétrico de transferencia de masa Gas-Líquido</i>	60
4.4.3 <i>Dinámica del electrodo de oxígeno</i>	60
4.4.4 <i>Método de oxidación de sulfito</i>	61
4.4.5 <i>Retención de gas</i>	61
4.4.6 <i>Velocidad de circulación del líquido.</i>	63
4.4.7 <i>Tiempo de mezclado</i>	64
4.4.8 <i>Fotoperíodo</i>	65
4.5 <i>Ecuaciones de escalamiento con base en la transferencia de luz</i>	65
4.5.1 <i>Dimensiones y relaciones de los fotobiorreactores Airlift</i>	70
5. SELECCIÓN DE LA ESTRATEGIA PARA EL ESCALAMIENTO DE UN FOTOBIORREACTOR TIPO AIRLIFT.	72
5.1 Proceso para la elaboración de los criterios de calificación	72
5.2 Selección del material para la construcción	75
5.3 Análisis de la estrategia seleccionada	79
6. DISEÑO BÁSICO CONCEPTUAL Y PLAN P&ID PARA UN FOTOBIORREACTOR TIPO AIRLIFT	80
6.1 Implementación de normativas de instrumentación ISA S5.1	80
6.2 Especificación de la nomenclatura asociada al sistema de monitoreo y control de	

procesos	82
6.3 Descripción de los sistemas de monitoreo y control del fotobiorreactor planteados a través del Diagrama P&ID	83
6.4 Descripción de los cálculos para el fotobiorreactor	83
6.5 Descripción vista planos fotobiorreactor	88
7. CONCLUSIONES	89
BIBLIOGRAFÍA	90
ANEXOS	98

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Tipos básicos de fotobiorreactores	19
Figura 2. Fotobiorreactores de placas planas	20
Figura 3. Fotobiorreactor tubular horizontal	21
Figura 4. Fotobiorreactor tubular helicoidal	22
Figura 5. Columnas de burbujeo y fotobiorreactores airlift	24
Figura 6. Intensidad en comparación a tasa de fotosíntesis	29
Figura 7. Esquema de la metodología	31
Figura 8. Diagrama de flujo revisión bibliográfica	33
Figura 9. Gráfico correspondiente al número de citas por año de publicación	35
Figura 10. Tipos de cultivos	37
Figura 11. Espectro electromagnético	44
Figura 12. Diagrama de flujo revisión bibliográfica de las variables para el escalamiento	47
Figura 13. Gráfico correspondiente al número de citas por año de publicación	48
Figura 14. Esquema de un fotobiorreactor Airlift	52
Figura 15. Tipos de configuraciones de los fotobiorreactores airlift	53
Figura 16. Esquema fotobiorreactor airlift dividido con múltiples tubos concéntricos de bucle interno	55
Figura 17. Difusores de gas estáticos	56
Figura 18. Difusores dinámicos	57
Figura 19. Ubicación del difusor de gas en la base del fotobiorreactor	58
Figura 20. Ubicación del difusor de gas dentro del fotobiorreactor	59
Figura 21. Vista del riser lateral	100
Figura 22. Vista del downcomer lateral	101
Figura 23. Vista superior y lateral del riser y downcomer	102
Figura 24. Diagrama de tuberías e instrumentación (P&ID)	103

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características metabólicas de las microalgas	26
Tabla 2. Características de los métodos de cultivo	27
Tabla 3. Documentos bibliográficos para su respectivo análisis	34
Tabla 4. Composición química de varios tipos de microalgas (% del peso seco en total)	38
Tabla 5. Nutrientes presentes en el medio de cultivo	39
Tabla 6. Medios de cultivo	40
Tabla 7. Descripción de ecuaciones de escalamiento	66
Tabla 8. Relaciones de los parámetros de geometría	70
Tabla 9. Ecuaciones de dimensionamiento de fotobiorreactores <i>airlift</i>	71
Tabla 10. Características de las variables para el escalamiento	73
Tabla 11. Matriz selección estrategia de escalamiento	75
Tabla 12. Especificación de los materiales	76
Tabla 13. Propiedades de los materiales	77
Tabla 14. Matriz selección material	78
Tabla 15. Conceptos de las letras de identificación	81
Tabla 16. Nomenclatura instrumentos	82
Tabla 19. Velocidad de crecimiento específica	84
Tabla 17. Parámetros diseño fotobiorreactor	89
Tabla 18. Conversión de PFFD a lux	99

LISTA DE SÍMBOLOS Y ABREVIATURAS

μm: micrómetros

PFR: reactor flujo pistón

CSTR: reactor de tanque agitado continuo

FBR: fotobiorreactor.

CO₂ : dióxido de carbono

VTR: reactor tubular vertical

DBO: demanda bioquímica de oxígeno.

DQO: demanda química de oxígeno.

mL: mililitros

nm: nanómetros.

mm: milímetros

vvm: flujo de volumen de gas por unidad de volumen de líquido por minuto

cm: centímetro.

g: gramos

L: litros.

m: metros

mg: miligramos

OD: oxígeno disuelto.

ppmv: partes por millón por volumen.

t: tiempo

RESUMEN

El objetivo de este proyecto de investigación es presentar la estrategia más adecuada para el escalamiento de un fotobiorreactor tipo *airlift*, ya que como sesabe aún sigue siendo un reto. Para el desarrollo de esta se implementó la metodología de revisión bibliográfica, de modo que se especificó los parámetros de cultivo de las microalgas, como lo son la temperatura en donde se establecen valores en un rango de 27 °C a 35 °C, el pH entre 8,2 a 8,7, intensidad lumínica 130000 lux a 270000 lux, una agitación entre los valores 0,1 a 0,3 vvm, también identificando el tipo de cultivo más adecuado para las microalgas, siendo el cultivo continuó el más acorde.

Posteriormente, se identifican las principales variables de diseño y de operación para el escalamiento de los fotobiorreactores *airlift*, también presentando las ecuaciones de Lambert-Beer y la hipótesis de Schuster, como modelos de escalamiento por medio de la transferencia de luz; Dado que a partir de dicha recopilación de información se definieron los criterios de calificación, en donde se seleccionaron los sistemas hidrodinámicos como la estrategia de escalamiento, en igual forma proporcionado el material apto para la construcción del fotobiorreactor que en este caso es el PMMA.

Como resultado se proporciona un diseño básico del fotobiorreactor *airlift*, en donde se implementan las normativas ISA-S5.1 para el correspondiente monitoreo y control de variables de proceso.

PALABRAS CLAVE: Fotobiorreactor, escalamiento, *airlift*, microalgas, variables diseño, variables operación, monitoreo.

INTRODUCCIÓN

Como bien se sabe en la actualidad se piensa en contrarrestar los daños ambientales provocados por algunos procesos como la producción de productos químicos altamente contaminantes, la obtención de combustible y la explotación de recursos naturales. En los últimos años se han desarrollado nuevas biotecnologías con el fin de reducir el calentamiento global, las emisiones de CO₂ y evitar el aumento de costos en la producción energética; de acuerdo con las investigaciones se encuentra el uso de las microalgas como una aplicación prometedora con un valor agregado alto en la cual *“ofrecen la capacidad de combatir los daños ambientales, proporcionar biomasa para la obtención de bioproductos de gran importancia económica, ecológica, energética y nutricional.”*[1]

Bajo este contexto para la obtención de dichos productos el escalamiento de fotobiorreactores ha sido uno de los factores más importantes, ya que es un desafío actual en el cual se debe tener en cuenta que hay una relación entre el diseño que se emplee como en la productividad que va ligada a la fisiología del microorganismo que en este caso es la microalga. *“Diversas instituciones privadas y públicas están invirtiendo recursos considerables para encontrar los mejores diseños y desarrollar fotobiorreactores innovadores que tomen en cuenta las necesidades de producción, los productos a obtener con base en las condiciones geográficas existentes y elección de la microalga.”*[2]

En este caso se busca proporcionar al grupo de investigación GRESIA de la Universidad Antonio Nariño una adecuada estrategia de escalamiento para un fotobiorreactor tipo *airlift* teniendo en cuenta las variables a manipular como lo son la *“luz ya sea directamente del sol, por medio de lámparas fluorescentes o fibras de luz, la razón CO₂/O₂, temperatura, nutrientes, salinidad, pH, velocidad del burbujeo”* [3]. En cuanto a los materiales, sugerir el adecuado que cumpla con la transparencia, durabilidad y los costos de estos, ya que se busca suministrar un fotobiorreactor con un sistema eficiente y rentable siendo un reto lograr obtener una gran productividad a nivel industrial con costos bajos.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Analizar estrategias para el escalamiento de un fotobiorreactor tipo *airlift* en el cultivo de microalgas

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar los parámetros de adaptación para el cultivo de microalgas en un fotobiorreactor.
2. Determinar las variables para el escalamiento de fotobiorreactores.
3. Seleccionar la mejor estrategia para el escalamiento de un fotobiorreactor tipo *airlift*.
4. Proporcionar un diseño básico conceptual y plan P&ID para un fotobiorreactor tipo *airlift*.

1. MARCO TEÓRICO

Para el presente trabajo de grado de ingeniería química, se presentan las siguientes definiciones para la comprensión general del tema a desarrollar.

1.1 Escalamiento

1.1.1 Definición

"Proceso mediante el cual se desarrollan los criterios y las reglas de asignación numérica que determinan las unidades de medida significativas para llevar de un tamaño dado a otro tamaño mayor o menor una operación u objeto. Escalar un proceso o equipo es convertirlo de su escala de investigación (laboratorio o piloto) a escala industrial (producción)". [4]

1.1.2 Métodos de escalamiento

De acuerdo con los métodos que actualmente se utilizan para el escalamiento de fotobiorreactores, son aquellos que proporcionan datos adecuados que han sido obtenidos en laboratorio, para así dar paso al estudio y elaboración de fotobiorreactores a escalas superiores, los modelos que se emplean son:

- **Fenomenológico:** es aquel que se basa en fundamentos teóricos, en donde permite hacer la predicción de fenómenos que no han sido estudiados experimentalmente. [4]
- **Empírico:** este modelo es aquel que es desarrollado y postulado sin tener bases teóricas, se basa en los resultados de la experimentación. [4]
- **De Similitud:** se basa en el *"análisis de similitud con respecto a analogías físicas de tipo térmico, mecánico, geométrico, químico entre otras"*. [4]

1.1.3 Variables más utilizadas para el escalamiento

Para el escalamiento de fotobiorreactores hay una serie de parámetros que se deben tener en cuenta al momento de diseñarlos, ya que lo que se quiere lograr al

cambiar la escala es no afectar el comportamiento de este. Dicho esto, para el escalamiento se deben tener en cuenta variables físicas, químicas y biológicas; el control y manejo de estas permitirán el funcionamiento correcto del fotobiorreactor. Aparte de una similitud geométrica, las variables operacionales que tienen mayor influencia en cuanto al rendimiento del fotobiorreactor son: el coeficiente volumétrico de transferencia de oxígeno, potencia de agitación, velocidad de agitación, tiempos de mezcla y transferencia de luz. [5]

Sin excluir variables como la temperatura, luz, pH y salinidad comparten una estrecha relación con el funcionamiento del fotobiorreactor y las características del microorganismo, por lo tanto, al tener las condiciones óptimas se obtendrá un crecimiento y funcionamiento adecuado.

1.2 Biorreactores

1.2.1 Definición

Un biorreactor se conoce como *"recipiente o sistema que mantiene un ambiente biológicamente activo, en donde se lleva un proceso químico que involucra organismo o sustancias bioquímicamente activas. Los procesos pueden ser aerobios o anaerobios. Generalmente estos sistemas son empleados para hacer crecer células o tejidos en operaciones de cultivo"*. [6]

1.2.2 Clases de biorreactores

Hace referencia a cómo estos sistemas operan, teniendo en cuenta las reacciones químicas y biológicas que se desarrollan dentro del biorreactor. [6]

1.2.2.a Reactor batch. Son aquellos que no cuentan con un flujo de entrada ni de salida. Este tipo de reactores tiene la ventaja de que cuentan con altas conversiones debido a que se pueden dejar los reactivos por largos periodos de tiempo. [6], [7]

1.2.2.b Reactor de lecho empacado. Es *"la configuración de mayor importancia industrial, se usa principalmente para la producción a gran escala de reactivos primarios o intermedios, presenta la ventaja de que no requiere la separación del catalizador"*. [8]

1.2.2.a Reactor de flujo pistón (PFR). Generalmente se usan para reacciones en fase gaseosas, *"las reacciones que ocurren se consumen continuamente a medida que fluyen por la izquierda del reactor, en el modelado del reactor, se asume que la concentración varía continuamente en dirección axial"*, [7] lo que implica que la mezcla no ocurre en la dirección del eje. [6]

1.2.2.b Reactor continuo de tanque agitado (CSTR). Este tipo de reactores son muy usados a nivel industrial, ya que su modo de operación es continuo, generalmente se usa para reacciones de fase líquida. También se conocen por brindar una mezcla perfecta; no tienen dependencia del tiempo, posición o temperatura, debido a que la temperatura y la concentración son iguales en todo el reactor. [7]

1.2.2.c Reactor de lecho fluidizado (FBR). Su principal característica es que al tener un aumento en el flujo dentro del reactor las partículas que se encuentran comienzan a elevarse gradualmente, dando paso a una mezcla eficiente entre las fases y por lo tanto brindar como resultado una alta conversión y eficiencia. [9]

1.3 Fotobiorreactores

Son equipos especializados para el cultivo de microalgas, en donde se pueden encontrar con un sistema de agitado mecánico o neumático [10]. Para un correcto cultivo de microalgas dentro del fotobiorreactor es necesario que se mantenga un medio estable, en donde se proporcione la temperatura, nutrientes y concentración de oxígeno a los microorganismos. [11]

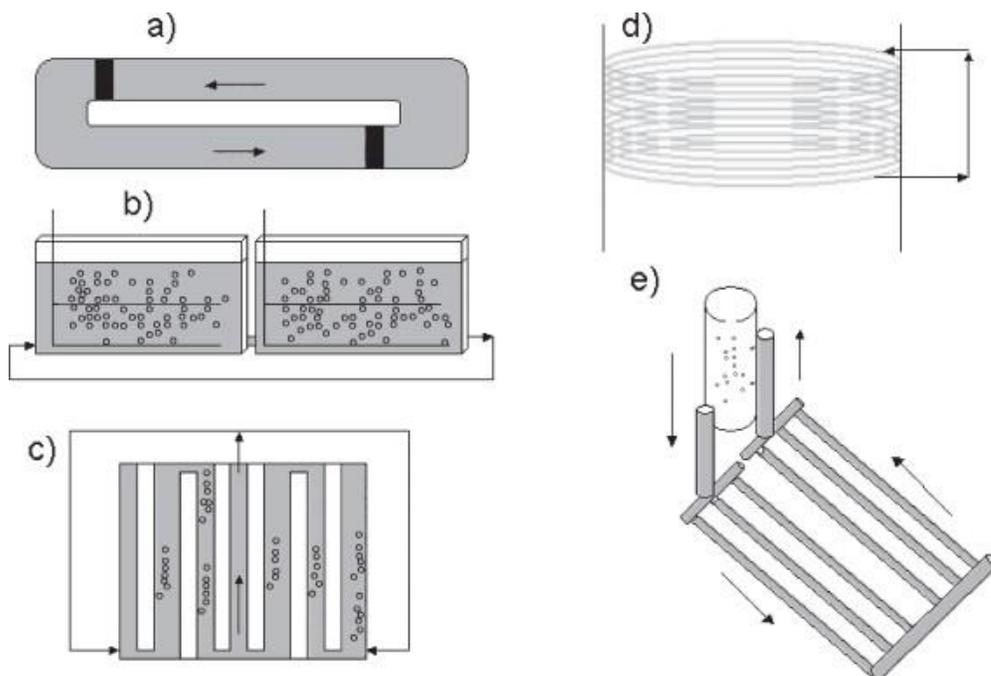
1.3.1 tipos de fotobiorreactores

Se encuentran los abiertos y los cerrados; cuando se hace referencia a los fotobiorreactores abiertos, son aquellos que están en contacto con la atmósfera. Al estar expuestos no se tiene un debido control de los parámetros para el crecimiento de los

microorganismos, son menos costosos que los cerrados, pero tienen el riesgo de que se contaminen [11]. En cuanto a los fotobiorreactores cerrados son aquellos que no están en contacto con el exterior, permitiendo así un mejor control en cuanto a los parámetros para el cultivo de microalgas, dentro de los fotobiorreactores cerrados se encuentran varios tipos: placas planas, tubular vertical, tubular horizontal y tubular helicoidal. [12]

Figura 1.

Diseño de fotobiorreactores.

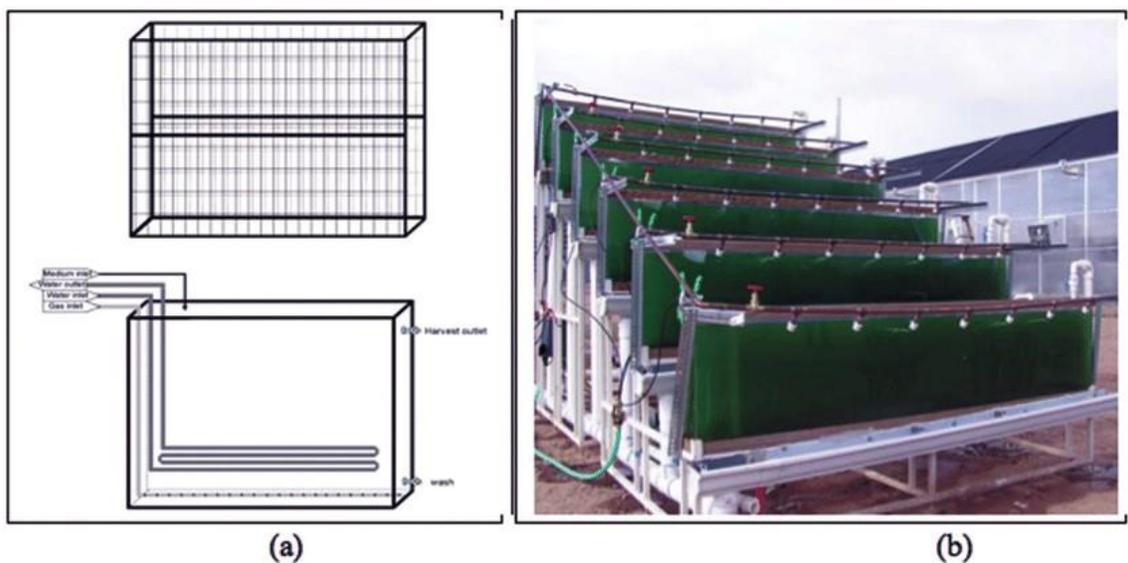


Nota. Se muestran algunos diseños de los fotobiorreactores. (a) Tipo carrusel, (b) Tipo plano, vista horizontal, (c) Con iluminación interna, (d) Tipo serpentín, (e) Tipo tubular horizontal con sistema airlift. Tomado de: "CINVESTAV-IPN. México. Avance en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas." [En línea]. Disponible: http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0378-18442003000800004&script=sci_arttext&tlng=pt

1.3.1.a Fotobiorreactor de placas planas. Los fotobiorreactores de placas planas, le brindan al cultivo de microalgas una mayor disponibilidad luminosa la cual es constante, ya que estos dispositivos cuentan con una mayor área superficial, y sin tuberías[13]. Para su "fabricación se utilizan placas planas translúcidas, que permiten la iluminación por ambos lados, y su sistema de agitación es por medio de la aireación, la cual permite remover los excesos de oxígeno en el cultivo".[13]

Figura 2.

Fotobiorreactores de placas planas



Nota. Fotobiorreactor de placa plana. (a) Estructura, (b) Fotografía de un sistema de fotobiorreactores de placas planas. Tomado de: "Viabilidad en la producción de biomasa microalgal a partir de fotobiorreactores solares en el Valle del Cauca, Colombia." [En línea]. Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6285366>

1.3.1.b Fotobiorreactor tubular vertical. Este tipo de fotobiorreactor se considera adecuado para los cultivos en el exterior, ya que debido a que están conformados por tubos transparentes, ya sea de vidrio o polímero, permiten capturar la suficiente luz natural para el óptimo crecimiento de los microorganismos. Para el suministro de CO₂ en estos fotobiorreactores se ubica un rociador en el fondo, el cual da paso a pequeñas burbujas que ayudan a obtener una mezcla homogénea. [12], [13]

1.3.1.c Fotobiorreactor tubular horizontal. "Se pueden encontrar varios diseños, los cuales también permiten una buena captura de luz. La transferencia de gas se lleva a cabo en las conexiones de los tubos o en una unidad especial dedicada al intercambio de gas. Pueden manejar volúmenes grandes, ya que son menos susceptibles a la contaminación". [12]

Figura 3.

Fotobiorreactor tubular horizontal.

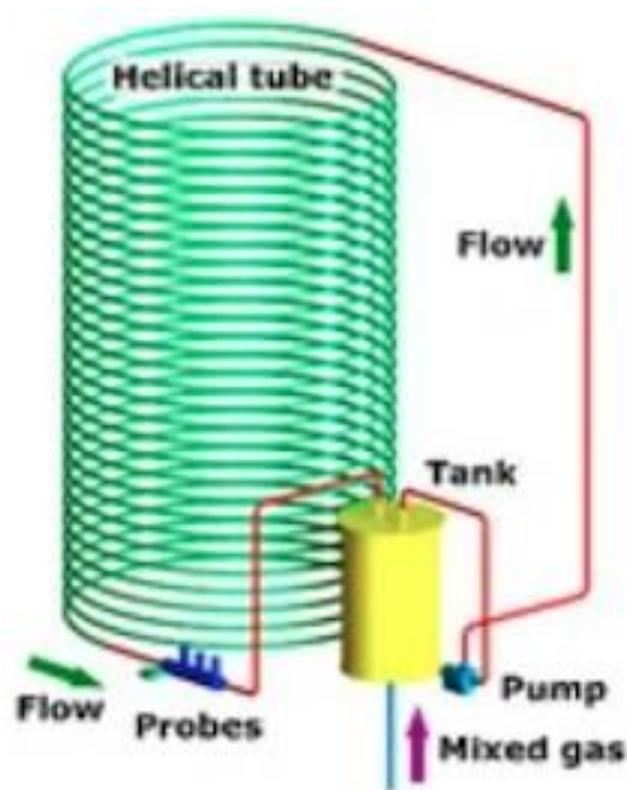


Nota. PBR tubulares horizontales. Tomado de: "*Placing microalgae on the biofuels priority list: a review of the technological challenges*". [En línea] Disponible: <https://royalsocietypublishing.org/doi/pdf/10.1098/rsif.2009.0322>

1.2.1.d Fotobiorreactor tubular helicoidal. Los fotobiorreactores helicoidales se identifican por tener una "alta relación S/V, el diseño más usado es el biocoil, que está compuesto por un set de tubos de polietileno enrollados en un armazón circular abierto, acoplado a una torre de intercambio de gas y un intercambiador de calor".[12]

Figura 4.

Fotobiorreactor tubular helicoidal.



Nota. Fotobiorreactor tubular helicoidal. Tomado de: "Perspective design of algae photobioreactor for greenhouses a comparative study." [En línea]. Disponible: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/5/1338>

1.4 Fotobiorreactor airlift

Los fotobiorreactores *airlift* se consideran adecuados para los procesos con microorganismos sensibles al cizallamiento, ya que estos sistemas no implementan la agitación mecánica, cuentan con un sistema de aireación lo cual permite un mezclado eficiente entre los nutrientes y el oxígeno, permitiendo así un buen crecimiento celular [14]. "Su funcionamiento se basa en la formación de un sistema gas-líquido-sólido y la circulación del medio se realiza a través de un tubo concéntrico". [15]

1.4.1 Descripción del fotobiorreactor airlift

Este tipo de fotobiorreactor cuenta con una clasificación de zonas que cada una cumple una función importante dentro del proceso de cultivo de microalgas, cuenta con una zona de ascenso de fluido (*riser*), zona de descenso del fluido (*downcomer*), desgasificación y una base o zona inferior.[16]

1.4.1.a Zona de ascenso del fluido (*riser*). Zona vertical en donde el movimiento del fluido es generado por la presión del aire que es inyectado a través de un difusor, también se debe a las propiedades de los líquidos como la diferencia de densidades. Al ser la zona en donde se inyecta el gas, permite que se lleve a cabo la transferencia de oxígeno y que el líquido ascienda por el tubo interno del fotobiorreactor. [16]

1.4.1.b Zona de flujo descendente (*downcomer*). Zona que está entre el tubo interior y las paredes del fotobiorreactor, luego que el líquido asciende por el *riser*, este es recirculado por el fotobiorreactor. *"La fuerza motriz que provoca la recirculación del medio es la diferencia de densidades del fluido ascendente y descendente; esta diferencia de densidades genera un gradiente necesario para la recirculación del líquido"*. [16]

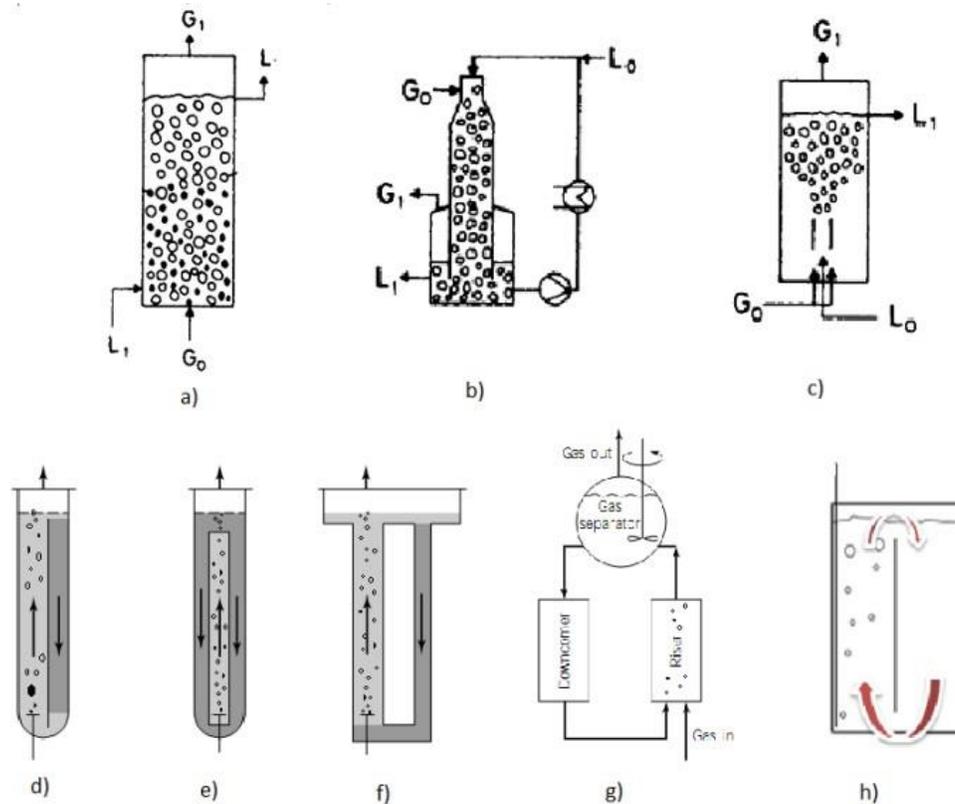
1.4.1.c Zona de desgasificación. Para el diseño de esta parte del fotobiorreactor se deben tener en cuenta características de diseño en cuanto al tubo interno, propiedades de los líquidos (densidad), ya que permitirá la correcta eliminación de gases generados en el cultivo, esta zona se encuentra en la parte superior del fotobiorreactor. [16]

1.4.1.d Zona inferior o base. En esta zona inferior o base del fotobiorreactor es aquella en donde está ubicado el difusor de gas, el cual permite el paso del gas y oxígeno en la circulación del líquido y la mezcla dentro del fotobiorreactor. En esta zona juega un papel importante en cuanto a los parámetros como la velocidad del líquido y a la retención de gas. [16]

En la **figura 5** se muestran las diferentes formas de reactores *airlift* y el sentido en el que se mueve el flujo de cada uno de ellos.

Figura 5.

Columnas de burbujeo y fotobiorreactores airlift.



Nota. Tipos de columnas de burbujeo y fotobiorreactores *airlift*. (a) Columna de burbujeo (b) Columna de burbujeo en contracorriente (c) Reactor JET (d) *Airlift* cilíndrico de tubo dividido (e) *Airlift* en una configuración de tubos concéntricos (f) *Airlift* de bucle externo (g) *Airlift* de bucle externo con separador de gases agitado (h) *Airlift* de placas planas. Tomado de: "Diseño, montaje y caracterización de fotobiorreactores *airlift* para el cultivo de la microalga *chlorella sorokiniana*." [En línea]

Disponible: https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/8219/Miguel_FernandezAn

[gel_2013.pdf;jsessionid=4D7797FA42AF6C308AC060BDF9655104?sequence=2](https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/8219/Miguel_FernandezAn_gel_2013.pdf;jsessionid=4D7797FA42AF6C308AC060BDF9655104?sequence=2)

1.4.2 Ventajas del fotobiorreactor *airlift*

Sus principales ventajas son su diseño simple; bajo costo de construcción, facilidad de control de las variables de operación entre otras. Otra ventaja que se considera es su

sistema de burbujeo que permite obtener un mezclado homogéneo y una alta transferencia de masa sin necesitar grandes cantidades de flujo con respecto a otros fotobiorreactores. [15]

.5 Microalgas

1.5.1 Definición

Las microalgas son microorganismos unicelulares eucariotas, que cuentan con una alta capacidad fotosintética; aparte de esta característica que las identifica, también se ha encontrado que tienen la capacidad de generar biomasa a partir del dióxido de carbono. Dentro de la clasificación de las microalgas se pueden encontrar una gran variedad de ellas con distintos requerimientos en cuanto a la temperatura, pH, salinidad, nutrientes para su correcto crecimiento. [17]

1.5.2 Tipos de metabolismo de las microalgas

Dentro de los tipos de metabolismo de las microalgas estas se clasifican en: Autótrofas, heterótrofas, fotoautótrofa, fotoheterótrofa y mixotrófica.

1.5.2.a Autótrofos. Las microalgas que para su crecimiento dependen de la luz solar como fuente de energía y del dióxido de carbono, para sus necesidades metabólicas. [18]

1.5.2.b Heterótrofos. Son aquellas *"algas que pueden desarrollarse en la ausencia de luz, los compuestos orgánicos les proporcionan tanto energía como la fuente de carbono."*[19]

1.5.2.c Fotoautótrofas. Son las algas que *"obtienen la energía del sol y el carbono de compuestos orgánicos."*[19]

1.5.2.d Fotoheterótrofas. Son las cuales *"obtienen la energía del sol y emplean compuestos orgánicos como fuente de carbono"*. [19]

1.5.2.e Mixotróficas. Son aquellas *"capaces de crecer bajo procesos autótrofos como"*

heterótrofos, de manera que la fuente de energía es tanto la luz como la materia orgánica. El carbono lo obtienen de compuestos orgánicos y del CO₂". [19]

Tabla 1.

Características metabólicas de las microalgas.

Modo de nutrición (Regímenes)	Características metabólicas				
	Fuente Energética	Fuente de Carbono	Respiración	Donador de electrones	Requerimientos de luz
Autótrofo					
Fotoautotrófico oxigenico	Luz	CO ₂	Aeróbica	H ₂ O	Obligado
Fotoautotrófico anoxigenico	Luz	CO ₂	Anaeróbica	H ₂ , H ₂ S	Facultativo
Quimioautotrófo	N, S y Fe inorgánicos	CO ₂	Anaeróbica	H ₂ , H ₂ S	Nulo
Heterótrofo					
Fotoheterotrófico	Luz	CO ₂ C-orgánico	Aeróbica	C-orgánico	Obligado
Quimioheterotrófico	C-orgánico	C-orgánico	Aeróbica	C-orgánico	Nulo
Mixotrófico	Luz C-orgánico	CO ₂ C-orgánico	Aeróbica	C-orgánico	Facultativo

Nota. La tabla 1. Muestra las características metabólicas de cada microalga. Tomado de: "Eliminación de nutrientes para el tratamiento biológico de agua residual usando un sistema inmovilizado microalga-bacteria en crecimiento autotrófico, heterotrófico y mixotrófico." [En línea]. Disponible: http://dspace.cibnor.mx:8080/bitstream/handle/123456789/256/perez_r.pdf?sequence=1&isAllowed=y

1.5.3 Métodos de cultivo de las microalgas

Dependiendo del metabolismo de las microalgas, se encuentran dos métodos de cultivos que son los fototróficos y heterotróficos. Los cultivos fototróficos, sus parámetros esenciales son la luz y el control de la proporción O₂/CO₂, ya que son las principales fuentes de energía para su crecimiento, dentro de este método se encuentran las que poseen el metabolismo fotoautotrófico y mixotrófico. Generalmente el método de cultivo fototrófico es implementado en sistemas abiertos. [20]

Con respecto al método de cultivos heterotróficos en él se encuentran las microalgas con el metabolismo quimioheterotróficos y mixotróficos; este tipo de método tiene una ventaja económica con respecto al otro método, ya que se pueden producir cultivos de altas densidades y permite el cultivo de microalgas a gran escala. Este método es implementado en sistemas cerrados, en donde el principal sustrato son los orgánicos, debido a que estos le aportan al cultivo el carbono y la energía para el crecimiento de las microalgas. [20]

En la **tabla 2** se muestra una comparación entre los cultivos fototróficos y heterotróficos.

Tabla 2.

Características de los métodos de cultivo.

Característica	Fotobiorreactor (cultivo fotoautotrófico)	Biorreactor (cultivo quimioheterotrófico)
Fuente de energía	Luz	Compuesto orgánico
Densidad celular o peso seco	Bajo	Alto
Factor limitante del crecimiento	Luz	Carbono orgánico
Cosechado	Diluido, mas difícil	Denso, más fácil
Geometría del contenedor	Dependiente de la penetración de luz	Independiente de la fuente energética
Costo de construcción	Alto por unidad de volumen	Baja por unidad de volumen
Costo de operación	Alto por Kg de biomasa	Bajo por Kg de biomasa
Algas utilizada	Algas fotosintéticas	Algas quimioheterotrofas

Nota. La tabla 2 muestra las características de condicionamiento para el cultivo de microalgas en dos tipos de cultivo. Tomado de: *“Eliminación de nutrientes para el tratamiento biológico de agua residual usando un sistema inmovilizado microalga-bacteria en crecimiento autotrófico, heterotrófico y mixotrófico.”* [En línea]. Disponible:

http://dspace.cibnor.mx:8080/bitstream/handle/123456789/256/perez_r.pdf?sequence=1&isAllowed=y

1.5.4 Ventajas del uso de microalgas

La implementación de microalgas en la industria ha tenido un impacto importante, debido a su gran campo de aplicación, esto se debe a su alta capacidad de utilizar la energía solar para su crecimiento y a su facilidad de fijar el CO₂. Además, las microalgas cuentan con una alta eficiencia biológica, es decir un rápido crecimiento en el cual permiten tener una viabilidad económica en los procesos, también por su versatilidad en el uso de diferentes tipos de agua para su desarrollo ya sean dulce, agua de mar o aguas residuales, como también adaptarse a diferentes condiciones de operación para su crecimiento. [21]

1.5.5 Parámetros de cultivo

En cuanto a los parámetros de cultivo para el crecimiento óptimo de las microalgas dentro de un fotobiorreactor, los factores fisicoquímicos cumplen una función importante dentro del cultivo, como: la luz, la intensidad lumínica, pH, temperatura, agitación y nutrientes. Se debe tener en cuenta que las características de cada microalga juegan un papel importante en el cultivo, ya que de esto dependerá el crecimiento óptimo del microorganismo.

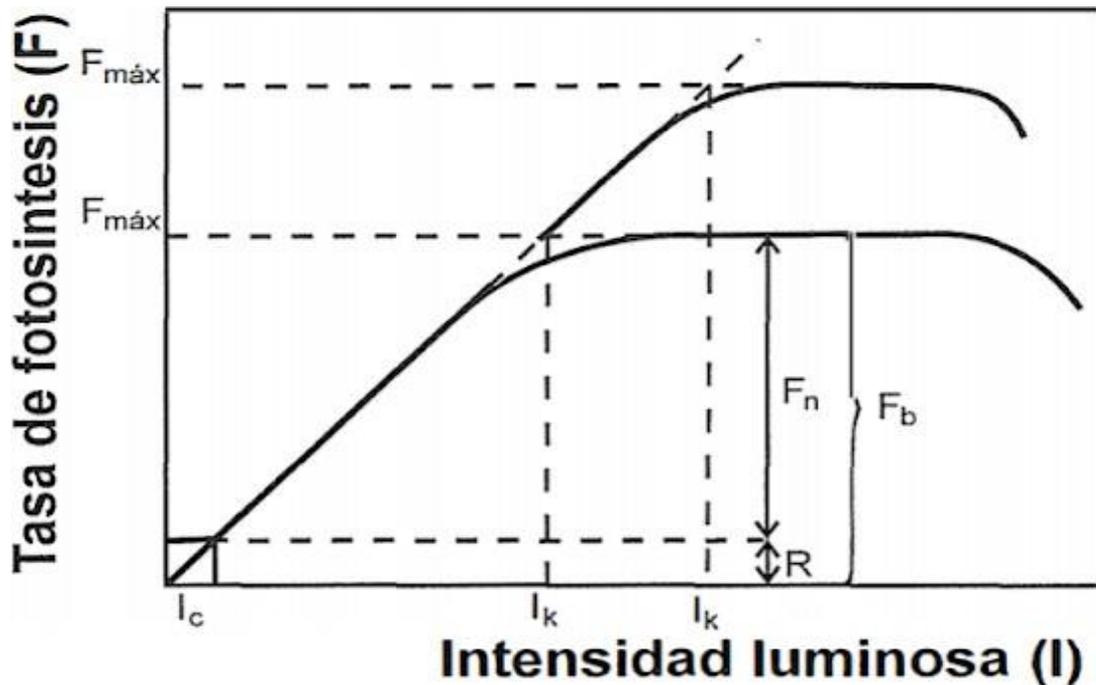
1.5.5.a Luz. Dentro de los parámetros para el cultivo de microalgas la luz es considerada una de las más importantes para su control, ya que representa la fuente de energía para la fotosíntesis [22]. La ausencia de esta le impedirá al microorganismo un correcto desarrollo.

1.5.5.b Intensidad lumínica. La "fotosíntesis se incrementa con el aumento de la intensidad lumínica, hasta alcanzar la máxima tasa de crecimiento específica para cada especie en el punto de saturación por luz, pasado este punto se alcanza la fotoinhibición". [23]

En la **figura 6** se presenta la curva que relaciona la tasa de fotosíntesis del microorganismo con la intensidad lumínica a la que se cultiva.

Figura 6.

Intensidad en comparación a tasa de fotosíntesis.



Nota. Tasa de fotosíntesis. (F) frente a intensidad luminosa (I). (Ic) Intensidad luminosa de compensación, (Fn) fotosíntesis neta; (Fb) fotosíntesis bruta; (Fmax) fotosíntesis máxima; (R) respiración. Las curvas corresponden a dos intensidades distintas. Tomado de: “*MICROALGAS: Cultivo y Aplicaciones.*” [En línea]. Disponible: [https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/25013/Abalde Julio 1995 Microalgas cultivo aplicaciones.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/25013/Abalde%20Julio%201995%20Microalgas%20cultivo%20aplicaciones.pdf?sequence=2&isAllowed=y)

1.5.5.c pH. Su control dependerá de los rangos necesarios de cada especie de microalga, los cambios que se puedan llegar a tener dentro del cultivo, se verán influenciados por la alcalinidad, respiración celular y composición iónica. [23]

1.5.5.d temperatura. Con respecto a la temperatura se considera otro factor de suma importancia dentro del cultivo de microalgas, está también varía con respecto a cada especie de microalga. Al proporcionar una temperatura dentro de los rangos óptimos de cada especie se obtendrá mayor tasa de crecimiento, al sobrepasar el rango adecuado para cada especie, se dará paso al aumento de respiración celular. [23]

1.5.5.e Agitación. Al proporcionarle una correcta agitación al medio de cultivo, se obtendrá un alto rendimiento en la producción de biomasa, como también proporcionar un mezclado homogéneo al cultivo para evitar la sedimentación de las células en las paredes del fotobiorreactor. Al tener una correcta agitación o burbujeo permitirá que se incorporen adecuadamente todas las fases y los nutrientes, aparte mejora la distribución de la luz dentro del fotobiorreactor, porque brinda un adecuado ciclo de luz/ oscuridad a los microorganismos. [22]

1.5.5.f Nutrientes. Para un buen crecimiento de los microorganismos es necesario suministrarle al cultivo los nutrientes esenciales y en cantidades adecuadas para su correcta absorción, ya que estos influirán en la velocidad de crecimiento de las microalgas [22]. Este parámetro se ve afectado en cuanto a las concentraciones de lípidos, tasas de difusión por lo que los nutrientes afectarán la composición bioquímica. [23]

1.5.6 Medios de cultivo

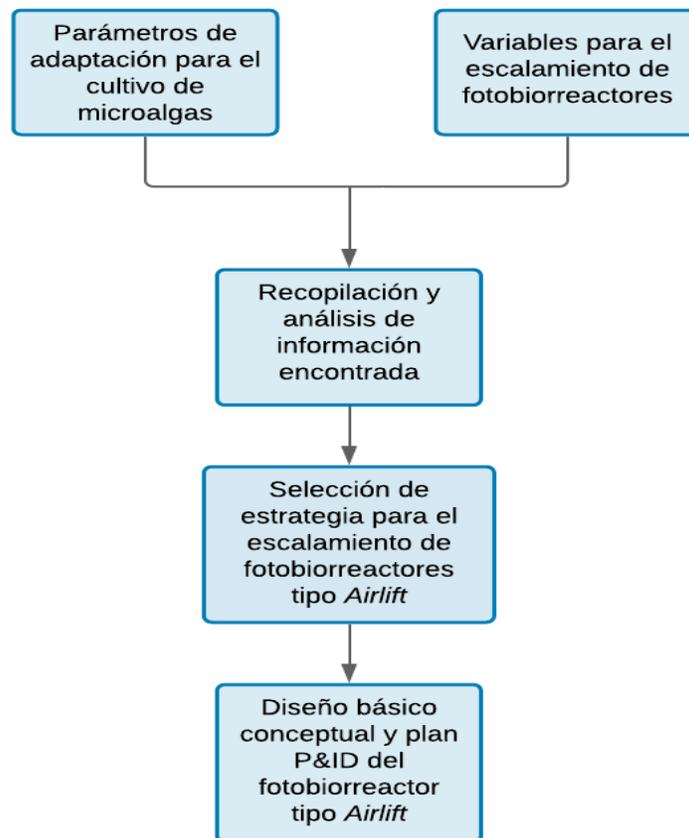
En cuanto a los medios de cultivo estos tienen una relación directa con los nutrientes, por lo que la correcta formulación de los nutrientes tendrá un impacto tanto en relación con el crecimiento de los microorganismos como económicamente. Los medios de cultivos se clasifican en: totalmente sintéticos, aguas naturales enriquecidas (dulce o mar) y aguas residuales. [22]

2. METODOLOGIA

Para el desarrollo del presente trabajo de grado se efectuó una revisión bibliográfica en donde se utilizaron diversas fuentes de búsqueda como Science direct, Google académico, Scopus y Lumieres: Repositorio digital institucional (publicaciones académicas) con el fin de filtrar y recopilar información necesaria para dar solución a los objetivos propuestos. Se dará inicio con dos revisiones bibliográficas independientes como se observa en la **figura 7** con el fin de seleccionar una estrategia para el escalamiento de fotobiorreactores tipo *airlift* y proporcionar un diseño básico conceptual del mismo.

Figura 7.

Esquema de la metodología.



Nota: En el diagrama de flujo se observa el proceso que se seguirá para el desarrollo del estudio.

3. PARÁMETROS DE ADAPTACIÓN PARA EL CULTIVO DE MICROALGAS EN UN FOTOBIORREACTOR

Para dar cumplimiento al primer objetivo propuesto, se procede a una selección y análisis de información bibliográfica, en la cual se determinarán los parámetros que influyen en el crecimiento de las microalgas dentro de un fotobiorreactor. Para esta selección se tendrá en cuenta los parámetros indispensables como la temperatura, pH, intensidad lumínica y agitación.

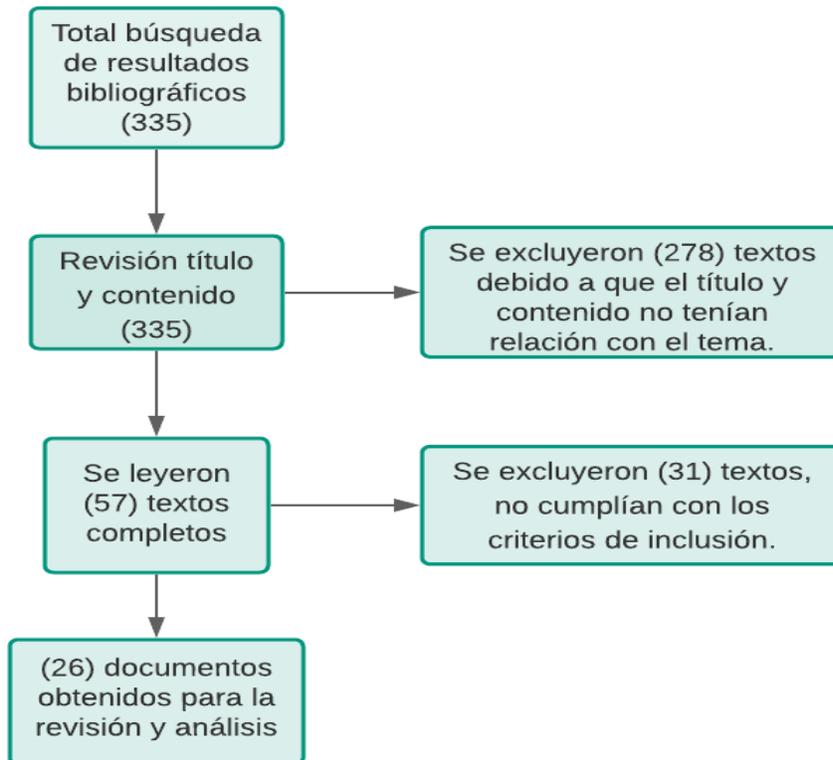
3.1. Selección de estudios

Con base en lo anterior, se da inicio a la revisión bibliográfica en donde se clasificarán los estudios por medio del título y resumen del contenido, ya que como se sabe muchos de los artículos no tienen información relevante frente al tema de estudio, por lo tanto, estos artículos serán excluidos. Seguido a esta rápida clasificación, se plantearán criterios de inclusión para obtener una mejor selección de la información y proceder a su análisis.

En la **figura 8** se observan los criterios de inclusión y exclusión realizados de los textos encontrados de las bases de datos.

Figura 8.

Diagrama de flujo revisión bibliográfica.



Nota. En la figura 8. Se observa el proceso que se llevó a cabo para el desarrollo de la revisión bibliográfica y su posterior análisis.

Con relación a los criterios de inclusión que se tuvieron en cuenta para llegar a una clasificación correcta de los textos, fueron aquellos en donde se hablara de los siguientes temas:

- Tipos de cultivo.
- Medios de cultivo: (sintéticos, aguas residuales y naturales).
- Condiciones de operación: (temperatura, pH, intensidad lumínica y agitación).

Se hizo uso de la herramienta Scopus en donde se empleó el operador AND y OR para una selección adecuada de los textos con respecto al tema que se estaba buscando, se usó "Microalgae Cultivation AND Conditions"; "Microalgae AND Temperature OR pH OR Light"; para otras fuentes se emplearon palabras claves como "Tipos de cultivo";

"Aguas Residuales"; "Agitación". Dando como resultado un total de 335 documentos. Cabe resaltar que no se tuvo en cuenta el año de publicación, debido a que se encontró información elemental para corroborar los datos publicados en publicaciones recientes.

Tabla 3.

Documentos bibliográficos para su respectivo análisis.

DOCUMENTOS	AUTORES	AÑO
1	J. Abalde et al.	1995
2	M. D. Vázquez.	2019
3	L. Torrentera-Blanco y Albert G. J. Tacon.	1988
4	L. J. Rendon, M. E. Ramirez y Y. Velez.	2015
5	K. Robles.	2007
6	B. O Arredondo y D. Voltolina.	2007
7	J. C. Tovar y J. P. Ruiz.	2016
8	R. Camacho et al.	2012
9	M. C. Pedraza-Cuesta y M. C. Prada-Garavito.	2018
10	A. Hernandez-Perez y J. I. Labbe.	2014
11	Q. Huang.	2017
12	J. Plasencia-Alvarez.	2012
13	B. B. Torres-Gómez y F. N. Cerón-Lopez.	2020
14	Cajamar.	2016
15	J. L. Doncel-Núñez y H. L. Moreno-Saboya.	2017
16	I. G. Manrique-Ruiz y R. J. Corso-Piñeros.	2019
17	C. C. Flores et al.	2003
18	L. M. G. Luna.	2007
19	M. M. Helm, N. Bourne y A. Lovatelli.	2006
20	J. M. Pacheco-Vega.	2003
21	J. M. Fernandez-sevilla.	2014
22	L. G. Ramirez-Merida, E. J. Lopes y L. Queiroz-Zepka.	2013
23	N. Aburai, R. Kunishima, F. Lijima y K. Fujii.	2020
24	C. C. Garcia-Gozalbes.	2015
25	J. Garcia-Romeral et al.	2017
26	C. Quevedo, S. P. Morales y A. Acosta.	2008

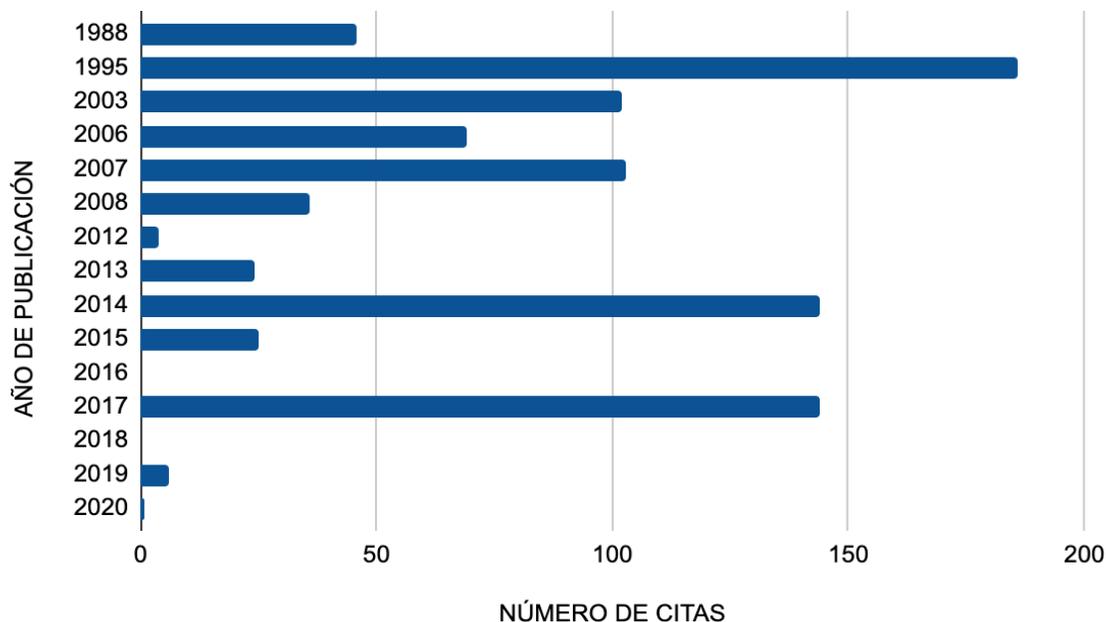
Nota. *En la tabla 3. Se logra observar los autores y año de publicación de los (26) textos seleccionados para el análisis.*

En la **figura 9** se tiene una relación entre la fecha de publicación del texto y el número de citas que tienen, se evidencia que las publicaciones con mayor impacto con relación a la búsqueda y los textos seleccionados se encuentran en un rango de 1988 a 2020; en donde los años (1995, 2014 y 2017); cada uno con un número de citas de (186,144 y 144) respectivamente. Al observar los resultados son los documentos que cuentan con más citas y proporcionan información

relevante al tema de investigación, como se mencionó anteriormente no se tuvo en cuenta un rango específico en cuanto al año de publicación. Por otra parte, los documentos fueron extraídos de las herramientas Google académico, Scopus y Lumieres repositorio digital institucional (publicaciones académicas).

Figura 9.

Gráfico correspondiente al número de citas por año de publicación.



Nota. La figura 9. Representa la cantidad de citas con respecto al año de publicación.

Adicionalmente, luego de la verificación de los textos con mayor número de citas también se ve reflejado el impacto que tuvo el autor en su publicación, en los siguientes documentos:

1. Microalgas: Cultivo y Aplicaciones. Por J. Abalde et al., [22]
2. La producción de alimento vivo y su importancia en la acuicultura una diagnosis. Por L. Torrentera-Blanco y A. Tacon. [26]
3. Métodos y Herramientas Analíticas En La Evaluación De La Biomasa Microalgas. Por B.O. Arredondo-Vega y D. Voltolina-Lobina.[29]
4. Microalgas, Cultivo y Beneficios. Por A. Hernández-Pérez y J.I. Labbé. [23]

5. Design of Photobioreactors for Mass Cultivation of Photosynthetic Organisms. Por Q. Huang et al., [32]

3.2 Análisis de parámetros de cultivo

3.2.1 Tipo de cultivo

Con base en la revisión bibliográfica de la publicación del autor J. Abalde [22], se logra evidenciar que los cultivos de microalgas se pueden clasificar también con respecto a su población, los cuales son axénico, unialgal y mixto. De acuerdo con la información correspondiente de las poblaciones, se identifica que la opción más adecuada para el *"cultivo de microalgas es el cultivo unialgal, ya que en este cultivo se va a tener un porcentaje de bacterias el cual es bueno para el proceso, porque se logran aprovechar las vitaminas que son excretadas de las bacterias y así utilizar estos nutrientes en el crecimiento de las microalgas."* [22]

3.2.2 Cultivo continuo

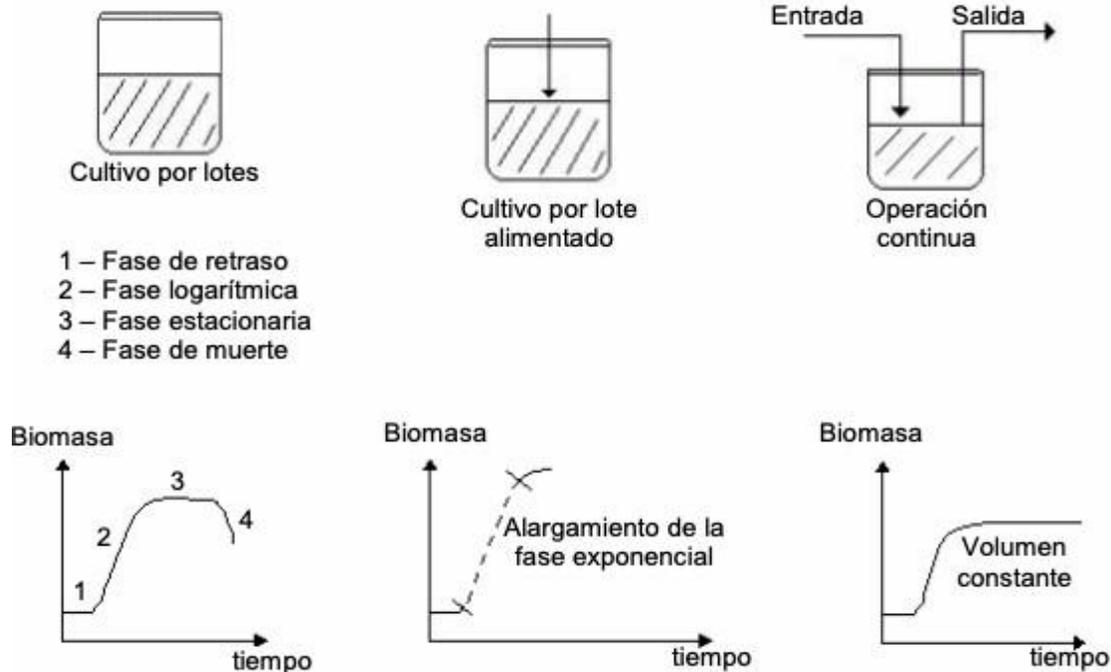
Al clasificar información sobre los tipos de cultivos se evidenció que se emplean tres tipos: los cultivos batch, semicontinuos y los continuos. Para el cultivo de microalgas debe tener en cuenta cuál es el propósito que se desea llevar a cabo con el proceso, ya sea la obtención de biomasa, obtención de lípidos o captación de CO₂, para así lograr la producción deseada. Se considera el cultivo continuo más apto para producciones de un volumen mayor, porque en este tipo de cultivo no es necesario detener el proceso, sin embargo, se deben mantener las condiciones fisicoquímicas estables en todo el proceso, para garantizar una buena calidad en el resultado. Unos de los factores importantes son la luz y la temperatura, ya que un ligero cambio en las variables se tendrá un cambio drástico en las producciones. Este cultivo siempre trabaja en fase exponencial lo cual permite ser más rentable que los otros tipos. [24]

En caso de que el cultivo continuo no se pueda realizar, también se considera apto el cultivo semicontinuo para índices de volúmenes grandes de producción, debido a que este tipo de cultivo permite alargar la fase exponencial. Lo que no hace tan rentable este tipo de cultivo, es al momento de hacer la reincorporación del medio fresco se producen

pérdidas, por lo tanto, para tener una producción comercial rentable se considera el cultivo continuo como mejor opción. [25]

Figura 10.

Tipos de cultivos.



Nota. Tipos de cultivos. (a). Discontinuo o batch (izquierda). (b). Semicontinuo (centro). (c) Continuo (derecha). Tomado de: "Universidad tecnológica de la mixteca, *Modelado computacional de un fotobiorreactor en modo continuo mediante el elemento finito para el crecimiento de una microalga usada para generar biocombustible.*" [En línea]. Disponible: http://jupiter.utm.mx/~tesis_dig/13811.pdf

3.2.3 Medio de cultivo

En cuanto a la selección del medio de cultivo se debe tener en cuenta la importancia que este cumple con respecto al desarrollo de la microalga, dado que está influenciado por la composición iónica, productividad algal, actividad microbiana entre otros factores. Las microalgas presentan una composición específica de macronutrientes y micronutrientes que inciden en la velocidad de crecimiento [22]; los macronutrientes tienen mayor importancia que los micronutrientes, ya que son un factor limitante de crecimiento que

van en conjunto con el tamaño del inóculo, del tipo de microalga y de sus concentraciones. Los macronutrientes que están en mayor proporción son el Carbono (C), Nitrógeno (N) y el fósforo (P), con respecto a los micronutrientes se encuentran el Manganeseo (Mn), cobre (Cu) y el zinc (Zn), sin embargo, si hay un exceso de estos pueden ser tóxicos para el cultivo. [22], [26]

Tabla 4.

Composición química de varios tipos de microalgas

ESPECIE	PROTEINA	CARBOHIDRATOS	LIPIDOS
Scenedesmus obliquus	50-58	10-17	12-14
Scenedesmus dimorphus	08-18	21-52	16-40
Chlamydomonas reinhardii	48	17	21
Chorella vulgaris	51-58	12-17	14-22
Spirulina maxima	60-71	13-16	06-07
Dunaliella salina	57	32	9
Tetraselmis suecica	39	8	7
Isochrysis galbana	41	5	21

Nota. En esta tabla 4. Se muestran los porcentajes de las composiciones químicas de algunas microalgas. Tomado de: "Universidad Pontificia Bolivariana, *Microalgas para la industria alimenticia.*" [Enlínea].

Disponible: <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/2306>

Con respecto a la función de los macronutrientes se encuentra que el carbono le aporta al cultivo, la producción de biomasa y en el cual genera un burbujeo proporcionando un mezclado más homogéneo; el Nitrógeno "se encuentra como nitrato (NO_3) o como amonio (NH_4), ya que muchas de las microalgas no pueden utilizar el Nitrógeno como gas directamente" [27], en cuanto al aporte del fósforo

Tabla 5.

Nutrientes presentes en el medio de cultivo.

NUTRIENTES	INGREDIENTES PRINCIPALES	FUNCIÓN	RANGO CONVENIENTE
Fuente de Carbono	CO ₂ , HCO ₃ ⁻ , CO ₃ ²⁻	Proporcionar Carbono a la célula	1-10 g/L
Fuente de Nitrógeno	NO ₃ ⁻ , Urea, N ₂	Proporcionar Nitrógeno a la célula	10-2000 mg/L
Fosforo	Hidrofosfato y Fosfato	Proporcionar Fosforo a la célula	10-500 mg/L
Sulfuros	Sulfato	Proporcionar Azufre a las proteínas y las reacciones	1-200 mg/L
Sales inorgánicas	K, Ca, Na y Mg	Mantener la estructura y actividad celular	0.1-100 mg/L
Elementos trazas	Fe, Zn, Mn, Pb, Cd	Factores coenzima	0.01-10 mg/L
Vitaminas	B, C, E	Ayuda a la división celular	0.01-1000 g/L

Nota. En esta tabla 5 se muestran los nutrientes presentes en el medio de cultivo y los rangos convenientes. Tomado de: "Universidad Pontificia Bolivariana, Microalgas para la industria alimenticia. B[En línea].

Disponible: <https://repository.upb.edu.co/handle/20.500.11912/2306>

Teniendo en cuenta los nutrientes que hacen parte del cultivo de las microalgas, con respecto la revisión bibliográfica para la formulación del medio de cultivo se encuentran 3 categorías que están divididas en aguas naturales ya sean dulces o demar, estas aguas están enriquecidas con suplementos minerales; estos medios resultan ser económicos y bastante eficientes, si se proporciona una formulación química adecuada, generalmente se utilizan fertilizantes con una relación de Nitrato/fosfato. Luego se encuentran los sintéticos los cuales están compuestos por agua destilada y componentes naturales del agua de mar o de agua dulce [29], una de las limitaciones de este medio de cultivo es la manera en cómo se conservan, y muchas de las microalgas no se desarrollan adecuadamente en este medio de cultivo. Por último, está el uso de aguas residuales las cuales también proporcionan una alternativa económica para el cultivo de microalgas en producciones grandes [22], [26]

Los medios de cultivo que generalmente se usan para el cultivo de microalgas son. Ver **tabla 6.**

Tabla 6.

Medios de cultivo.

MEDIO DE CULTIVO	COMPUESTO	SOL. STOCK	CANTIDAD
Medio f/2. Guillard y Ryther (1962); Guillard (1975). 950 mL agua de mar filtrada.	NaNO ₃ NaH ₂ PO ₄ · 2H ₂ O Sol. Metales traza Sol. Vitaminas	75 g/L H ₂ O Dest. 5 g/L H ₂ O Dest.	1 mL 1 mL 1 mL 0.5 mL
Solución de Metales de traza. 950 mL de agua destilada.	Na ₂ -EDTA · 2H ₂ O FeCl ₃ · 6H ₂ O CuSO ₄ · 5H ₂ O ZnSO ₄ · 7H ₂ O CoCl ₂ · 6H ₂ O MnCl ₂ · 4H ₂ O Na ₂ MoO ₄ · 7H ₂ O	9.8 g/L 22 g/L 10 g/L 180 g/L 6.3 g/L	4.36 g 3.15 g 1 mL 1 mL 1 mL 1 mL 1 mL
Solución de Vitaminas. 950 mL de agua destilada.	Vitamina B12 Biotina Tiamina-HCl	1 g/L H ₂ O Dest. 0.1 g/L 200 mg	1 mL 10 mL
Medio K Keller <i>et al.</i> , (1987). 950 mL agua de mar.	NaNO ₃ NH ₄ Cl b-glicerofosfato H ₂ SeO ₃ Sol. Metales traza Sol. Vitaminas f/2	75 g/L H ₂ O Dest. 2.68 g/L H ₂ O Dest. 2.16 g/L H ₂ O Dest. 1.29 mg/mL H ₂ O Dest.	1 mL 1 mL 1 mL 1 mL 1 mL 0.5 mL
Solución de Metales de traza. 900 mL de agua destilada.	Na ₂ -EDTA · 2H ₂ O FeCl ₃ · 6H ₂ O Na ₂ MoO ₄ · 2H ₂ O ZnSO ₄ · 7H ₂ O CoCl ₂ · 6H ₂ O MnCl ₂ · 4H ₂ O CuSO ₄ · 5H ₂ O	6.3 g/L H ₂ O Dest. 22 g/L H ₂ O Dest. 10 g/L H ₂ O Dest. 180 g/L H ₂ O Dest. 9.8 g/L H ₂ O Dest.	41.6 g 3.15 g 1 mL 1 mL 1 mL 1 mL 0.5 mL

<p>Medio ES (e.g. ESAW). D'Agostino y Provasoli, (1968); Harrison et al., (1980) Consiste en Agua de mar enriquecida, medio de agua de mar artificial (se recomienda especies que provengan de ambientes oceánicos. 100 mL de agua destilada.</p>	<p>NaNO₃ Glicerofosfato Sol. Férrica Sol. PII</p>	<p>10 mL/L 10 mL/L</p>	<p>700 mg 100 mg 5 mL/L 5 mL/L</p>
--	--	----------------------------	--

Tabla 6. (Continuación)

MEDIO DE CULTIVO	COMPUESTO	Sol. STOCK	CANTIDAD
<p>Solución Férrica. 500 mL de agua destilada.</p>	<p>Fe (NH₄)₂(SO₄)₂·6H₂O Na₂-EDTA</p>		<p>350 mg 330 mg</p>
<p>Solución PII. 500 mL de agua destilada.</p>	<p>FeCl₃· 6H₂O Na₂-EDTA H₃BO₃ MnSO₄ ZnSO₄· 7H₂O CuSO₄· 7H₂O</p>		<p>25 mg 500 mg 570 mg 62 mg 1 mg 2.5 mg</p>
<p>Medio GP. Loeblich Smith (1968). 750 mL de agua de mar.</p>	<p>Sol. Stock nitratos Sol. Stock vitaminas Mezcla de metales PII Agua destilada</p>		<p>2 mL 1 mL 5 mL 250 mL</p>
<p>Solución Stock.</p>	<p>KNO₃ K₂HPO₄</p>		<p>100 g/L 34.8 g/L</p>

medio GP. 750 mL de agua de mar.	Agua destilada		250 mL
Medio L1. Guillard y Hargraves (1993). 950 mL de agua de mar filtrada.	Sol. Stock nitratos Sol. Stock fosfatos Sol. Stock silicatos Sol. De metales de traza Sol. Stock vitaminas		1 mL 1 mL 1 mL 1 mL 0.5 mL
Soluciones Stock.	NaNO ₃ NaH ₂ PO ₄ · H ₂ O Na ₂ SiO ₃ · 9H ₂ O		75 g/L 5 g/L 30 g/L
Solución de metales de traza. 950 mL de agua de ar.	FeCl ₃ · 6H ₂ O Na ₂ -EDTA· 2H ₂ O CuSO ₄ · 5H ₂ O Na ₂ MoO ₄ · H ₂ O ZnSO ₄ · 7H ₂ O CoCl ₂ · 6H ₂ O MnCl ₂ · 4H ₂ O H ₂ SeO ₃ NiSO ₄ · 6H ₂ O Na ₃ VO ₄ K ₂ CrO ₄	2.45 g/L 19.9 g/L 22 g/L 10 g/L 180 g/L 1.3 g/L 2.7 g/L 1.84 g/L 1.94 g/L	3.15 g 4.36 g 0.25 mL 3 mL 1 mL 1 mL 1 mL 1 mL 1 mL

Nota. En la tabla 6. Se muestran los medios de cultivos que usualmente se utilizan para el cultivo de microalgas. Tomado de: "*Métodos y herramientas analíticas en la evaluación de biomasa microalgal.*" [En línea].

Disponible:

<https://cibnor.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1001/539>.

3.3 Condiciones de operación

Como se ha mencionado en este capítulo el crecimiento de las microalgas va relacionado con varios requerimientos, los cuales se deben mantener en condiciones óptimas para que el cultivo no se vea afectado; al hacer la recopilación de información sobre las condiciones que tienen mayor importancia en el cultivo de microalgas se encontraron los siguientes parámetros: Temperatura, pH, intensidad lumínica y agitación.

3.3.1 La temperatura

Este es uno de los parámetros fundamentales, ya que la producción de biomasa va a estar relacionada con el incremento térmico dentro del cultivo, es decir la respiración celular [14], si se tiene una temperatura mayor a la óptima esta sería letal para el microorganismo, debido a que aumentará la respiración celular provocando así una baja en la productividad del proceso con relación a las temperaturas más bajas a la óptima también se tendrá como resultado un proceso mucho más lento lo cual no es conveniente [30]. La temperatura óptima para la mayoría de las especies de microalgas está dentro 18 °C a 27 °C, como mínima 16°C y como máxima 35 °C. [31]

3.3.2 El pH

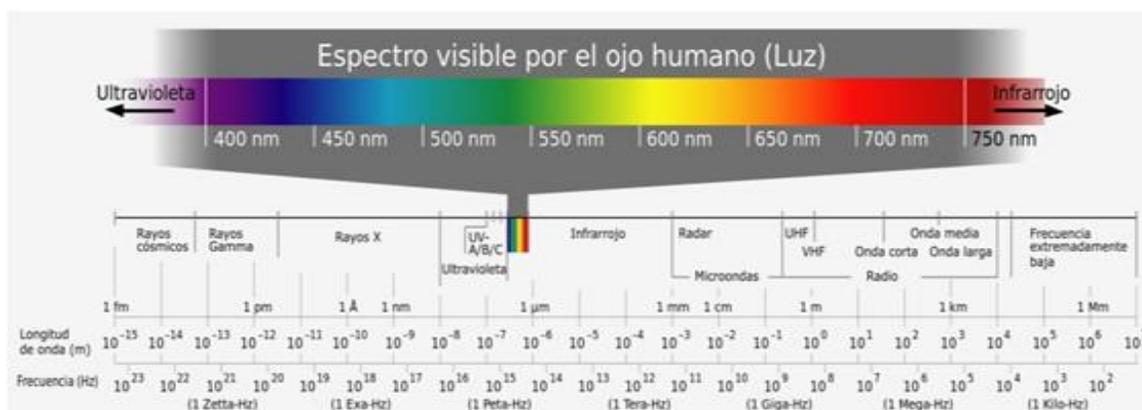
El efecto del pH sobre el cultivo de microalgas *"está influenciado por la actividad microbiana autotrófica y heterotrófica y la eficiencia de sistema de adición del CO₂"* [23]. Al no tener un pH en los rangos óptimos las microalgas no se lograrán desarrollar y se presentará una baja de la productividad, causando también una deficiencia en los nutrientes la mayoría de las especies de las microalgas están en un rango de 7 a 9 en donde el pH de 8,2 -8,7 es considerado el óptimo. [25], [28], [30]

3.3.3 Intensidad lumínica

Como se ha mencionado anteriormente la temperatura y la luz son uno de los factores con mayor influencia en el desarrollo de las microalgas, al ser las microalgas un microorganismo fotosintético, la disposición espectral de la luz se encuentra en un rango de 400 nm a 700 nm de radiación utilizable fotosintéticamente (PAR, por sus siglas en inglés); con relación a *"la luz esta representa la fuente de energía para la fotosíntesis, intensidad luminosa como la longitud de onda y el fotoperíodo"*[22]. Todo cultivo requiere de una intensidad lumínica adecuada que no sobrepase los límites de la capacidad fotosintética de cada especie, es decir el nivel de saturación de la luz porque al suceder esto se verá afectado el crecimiento y se tendrá una dificultad en la división celular gracias a la fotoinhibición. [32]

Figura 11.

Espectro electromagnético.



Nota. Espectro electromagnético de la radiación solar y detalle del espectro visible. Tomado de: "Escuela técnica superior de ingenieros agrónomos DPTO. Producción vegetal: Fitotecnia Universidad politécnica de Madrid, Cultivo de microalgas (*Chlorella sorokiniana*) con iluminación mediante LEDs (Light Emitting Diodes)." [En línea]. Disponible: <https://core.ac.uk/download/pdf/148667084.pdf>

Al trabajar con intensidades lumínicas bajas, la capacidad fotosintética de cada especie da paso a un proceso de crecimiento más lento. En este caso no se considera malo, como resultado se garantiza que el sistema va a ser más eficaz en cuanto a la captura de luz y en el incremento del contenido de clorofila. Por lo tanto, es aconsejable trabajar a intensidades lumínicas bajas. Sin embargo, no solo la intensidad de la luz interfiere en el crecimiento, también es importante los fotoperíodos o ciclos de luz/oscuridad en el cultivo, ya que la absorción de los nutrientes, la división celular y la bioluminiscencia se verán afectados por este factor. Generalmente se utilizan periodos 16:8 (16 horas de iluminación y 8 horas de oscuridad). [25]

Como recurso para determinar los rangos de intensidad de luz, más apropiados para el cultivo, se tiene como referencia la tesis "Cultivo de microalgas (*Chlorella sorokiniana*) con iluminación mediante LEDs (Light Emitting Diodes)" [33], en donde se evidencia que a nivel laboratorio se trabajan con intensidades de 200 a 400 $\mu\text{molm}^{-2} \text{s}^{-1}$ PPFD (densidad de flujo de fotones fotosintéticos), de modo que al convertir estos valores a lux (**anexo 1**) se observa, que trabajan en un rango aproximadamente de (13000 lux a 27000 lux),

no se va a tener una precisión absoluta, ya que se debe tener en cuenta la potencia espectral de la luz a utilizar para el cultivo. Algunos estudios trabajan en rangos de (1000 lux a 2000 lux) [34]. Recientemente también se está trabajando con rangos más altos entre 4000 a 8000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ hasta llegar a valores más grandes.[33]

3.3.4 Agitación

En relación con la agitación continua del cultivo, esta cumple con la función del intercambio gaseoso que necesita el microorganismo, evitando así la sedimentación dentro del fotobiorreactor y lograr proveer dentro del cultivo la homogeneización correcta de los nutrientes [28]. Para determinar la mejor potencia de agitación, esta dependerá de las características y la fragilidad de cada microalga; es necesario proporcionar una adecuada agitación, porque esta también permitirá que todas las microalgas tengan el acceso a la luz, como resultado también evitará el daño de estas. Por lo general se utilizan distintos tipos de difusores de burbujeo, en donde se debe tener en cuenta el tamaño de la burbuja. Comúnmente en los fotobiorreactores *airlift* se utiliza un diámetro de burbuja entre 2-10 mm.[35]

Por otra parte, para elegir el sistema de agitación para el cultivo de microalgas, se tiene una relación con el volumen y la geometría del fotobiorreactor; teniendo en cuenta esta relación permitirá obtener una buena transferencia de masa y suministro eficaz de CO_2 al cultivo [35]. Generalmente la tasa de aireación usada para generar burbujeo esta entre 0,1 a 0,3 vvm (flujo de volumen de gas por unidad de volumen de líquido por minuto), cabe decir que si se trabaja a una tasa de aireación elevada puede generar estrés hidrodinámico y por ende una disminución en el crecimiento. [36]

4. VARIABLES PARA EL ESCALAMIENTO DE FOTOBIORREACTORES

4.1 Diseño conceptual de los fotobiorreactores *airlift*

En este capítulo se llevó a cabo la misma metodología del anterior, en donde se procedió a la recopilación y selección de información. Esta parte del estudio tiene como fin entender las variables de diseño y de operación, además cómo estas variables influyen en el escalamiento de fotobiorreactores *airlift*, con la finalidad de sugerir la estrategia más adecuada.

4.2 Selección de estudios

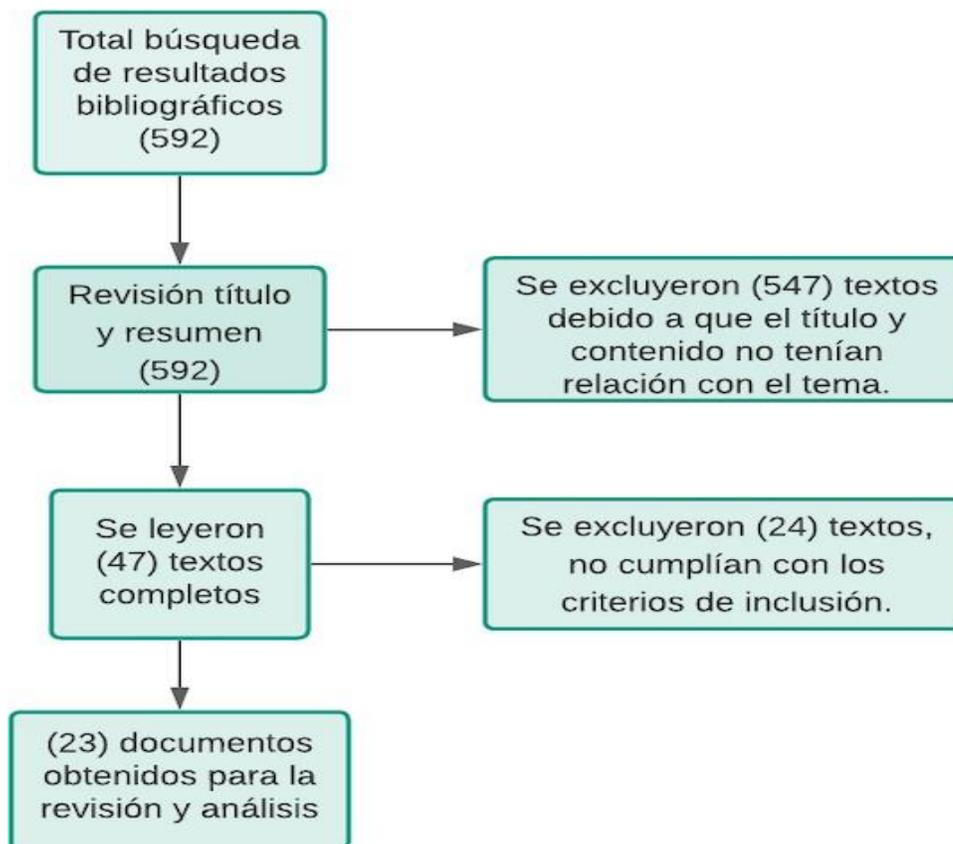
Para la clasificación y selección de información se utilizaron las herramientas de búsqueda Science direct, Google académico, Scopus y Lumieres: Repositorio digital institucional (publicaciones académicas); ya que estas proporcionan información confiable para el desarrollo de este estudio.

La búsqueda de información en este capítulo se centró en la revisión de temas como el diseño conceptual de los fotobiorreactores, las ecuaciones de escalamiento, las variables de operación y las variables de respuesta. Sin embargo, al ser éste un tema extenso en cuanto a las variables de operación, se decidió enfocar el estudio hacia el fenómeno de transferencia de masa y las ecuaciones de transferencia de luz, debido a que la gran mayoría de las literaturas se enfocan en estos fenómenos.

En la **figura 12** se presentan los criterios de inclusión y exclusión para de los textos encontrados de las bases de datos.

Figura 12.

Diagrama de flujo revisión bibliográfica de las variables para el escalamiento



Nota. En la figura 12. Se observa el proceso que se llevó a cabo para el desarrollo de la revisión bibliográfica y su posterior análisis.

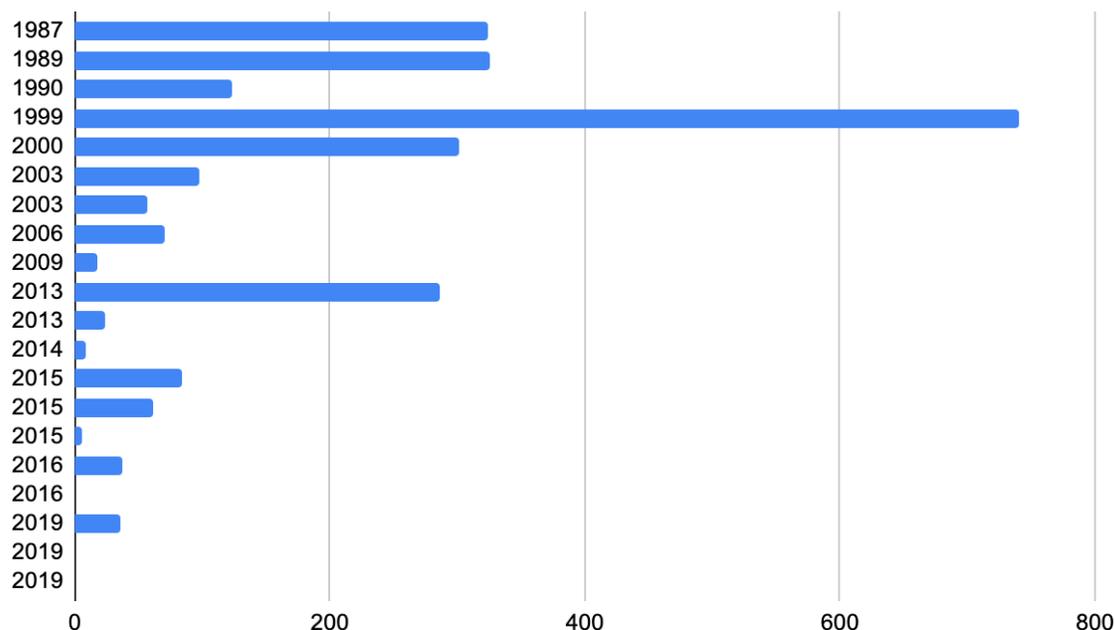
Con relación a los criterios de inclusión que se tuvieron en cuenta para llegar a una clasificación correcta de los textos, en la herramienta de Scopus se empleó el operador booleano AND para así obtener una mejor clasificación con respecto al tema que se estaba buscando, se usó "photobioreactor AND *Airlift* AND scale up"; "*Airlift* AND Desing Variables"; "*Airlift* AND Sparger"; para otras fuentes se emplearon palabras claves como "*Airlift*", "Productividad", "Transferencia de masa", "Geometrías"; "Transferencia de luz". Dando como resultado un total de 592 documentos. Cabe resaltar que no se tuvo en cuenta el año de publicación, como se expresó en el anterior capítulo, debido a que se encontró información elemental para corroborar los datos publicados más recientemente.

Como en el capítulo anterior, se procedió a hacer un análisis en cuanto al número de citas de los 23 textos seleccionados, con el fin de detallar el impacto del autor sobre

los trabajos publicados. Se busca que los artículos seleccionados cumplan con una alta calidad y confiabilidad para un adecuado desarrollo del estudio.

Figura 13.

Gráfico correspondiente al número de citas por año de publicación.



Nota. La figura 13. Representa la cantidad de citas con respecto al año de publicación.

La **figura 13** se evidencia que las publicaciones con mayor impacto, con relación a la búsqueda, están en los años 1987, 1989, 1990, 1999, 2000 y 2013; cada una con un número de citas de 324, 325, 123, 741, 301 y 287, respectivamente. Al observar los resultados de las publicaciones se decidió que con base en estos documentos se determinarán y compararan las variables con otros documentos para la selección de parámetros que están más presentes en el escalamiento de fotobiorreactores.

Con respecto a la **figura 13** los autores y literaturas que se tomarán como base principal son:

1. Airlift Reactors: Characteristics, Applications And Design Considerations. Por M.Y. Chisti y M. Moo-Young [47]
2. Airlift Bioreactors. Por M.Y. Chisti [45]

3. Bioreactors, Air-Lift Reactors. Por J.C. Merchuk [42]
4. Photobioreactors: Light regime, Mass transfer, and scale up. Por E. Molina-Grima et al., [38]
5. BubbleColumn and Airlift Photobioreactors for Algal Culture. Por A. Sánchez-Mirón et al., [52]
6. Photobioreactors for the production of microalgae. Por F.G. Acién-Fernández. [50]

Ya que conforme se iban revisando las literaturas, estas hacían alusión a los autores mencionados en el desarrollo tanto experimental como bibliográfico.

4.3 Variables de diseño

4.3.1 Volumen

En relación con el escalamiento de fotobiorreactores, se encuentra el volumen como una de las variables de diseño fundamentales para llevar a cabo el escalamiento adecuado de un fotobiorreactor, su importancia se debe a que al proporcionar un volumen demasiado grande sin tener en cuenta la productividad, tanto como la dinámica de fluidos del fotobiorreactor, esto llevaría a que se aumente el régimen de oscuridad y estrés hidrodinámico; lo que se pretende en el escalamiento es poder brindar un óptimo paso de luz para así lograr un alto rendimiento y llegar a la productividad estipulada. Con respecto a la literatura consultada para cultivos a gran escala, el mínimo volumen para los fotobiorreactores es de 50 L [37] Cabe considerar que la altura también es un factor a tener en cuenta, ya que no es recomendable hacer un fotobiorreactor muy alto, porque no proporcionaría un adecuado burbujeo al cultivo [37], por ende se provocaría un cambio en el pH y pérdidas de dióxido de carbono.[38], [40]

Por otra parte, se cuenta con otros factores para determinar el volumen del fotobiorreactor, que son con base en la trayectoria de la luz, relación superficie/volumen(S/V) y productividad volumétrica. En la **tabla 9** se muestra las ecuaciones de escalamiento con base en la geometría del fotobiorreactor, que en este caso es cilíndrica, conteniendo dos cilindros concéntricos (*riser* y *downcomer*) [37], [40], [41]

4.3.2 Productividad

La productividad del cultivo se ve influenciada directamente por el volumen de reactor. Hoy en día se han implementado nuevos modelos para el escalamiento, en donde se logre tener una productividad que sea rentable a nivel industrial. Usualmente se mide como "productividad por unidad de volumen de reactor (g de biomasa/ $m^3 \cdot día$), también se logra medir por medio de la productividad por unidad de área ocupada de reactor ($g/m^2 \cdot día$) y la productividad por área iluminada de reactor ($g/m^2 \cdot día$)".[41] Se evidenció que la más empleada en la literatura es "g de biomasa/ $m^3 \cdot día$ ".

4.3.3 Productividad volumétrica (Pv)

La productividad volumétrica en un cultivo continuo de acuerdo con el artículo "Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas." [41], "es proporcional a la velocidad específica de crecimiento y a la concentración celular" [41], en otras palabras, la productividad volumétrica mide la cantidad de biomasa generada en el fotobiorreactor y está expresada en la **ecuación 1**.

Ecuación 1.

Productividad volumétrica (Pv).

$$Pv = \mu * x$$

Nota. Se presenta la ecuación 1 correspondiente al cálculo de la productividad volumétrica (Pv). Tomado de: "Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas."

[En línea]. Disponible:

http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0378-18442003000800004&script=sci_arttext&tlng=pt

Donde:

μ : Velocidad de crecimiento.

x: Concentración celular.

Las unidades de Pv son cantidad de biomasa generada por unidad de volumen y tiempo ($g \cdot m^3 \cdot día^{-1}$).[39]

4.3.4 Relación superficie-volumen (S/V)

En cuanto a la relación superficie-volumen o relación área-volumen, esta variable tiene relación con la productividad volumétrica y con la geometría del fotobiorreactor; lo que se pretende con esta variable es proporcionar la mayor cantidad de luz, dado que de esta manera se aumentará la productividad por unidad de superficie iluminada del fotobiorreactor. [40]

La relación superficie-volumen (S/V) se expresa en la **ecuación 2.Ecuación 2.**

Relación superficie-volumen (S/V).

$$\frac{A_T}{V_T} = \frac{2 * \pi * r * d * (H + rd)}{H + \frac{\pi * D^2 * d}{4}}$$

Nota. Se presenta la ecuación 2 correspondiente al cálculo para hallar la relación superficie-volumen (S/V) de un fotobiorreactor concéntrico. Tomado de: "*Diseño de un fotobiorreactor b Airlift a escala banco.*" [En línea].

Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5085375>

Donde:

rd: Radio del downcomer.

A_T: Área total.

V_T: Volumen total.

H: Altura total del equipo.

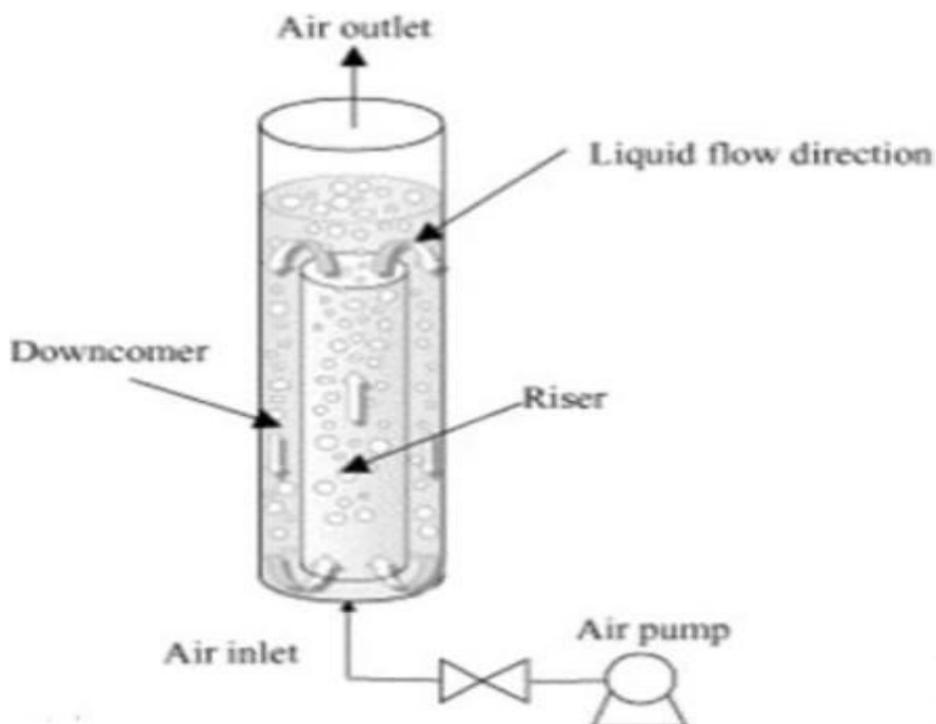
$\frac{\pi * D_d^2}{4}$: Área de la base.

4.3.5 Geometría de los fotobiorreactores Airlift

A partir de las literaturas, varios autores hacen mención a la diferencia que tienen los fotobiorreactores *airlift* con respecto a otros. Principalmente se compara con un fotobiorreactor de columnas de burbujas, ya que ambos cuentan con "agitación neumática, lo que los diferencia es el tipo de flujo del fluido, que depende de la geometría que se emplee para el sistema" [42]. De acuerdo con las configuraciones de los *airlift*, estos logran proporcionar al cultivo un sistema de mezclado rápido y eficiente, en donde permita la homogeneización y se reduzcan los daños de los microorganismos, favoreciendo su transferencia de masa; por lo tanto, su diseño influirá en el rendimiento y en la productividad del cultivo.[42] Esquema de un *airlift*, como es mostrado en la **figura 14**.

Figura 14.

Esquema de un fotobiorreactor Airlift.



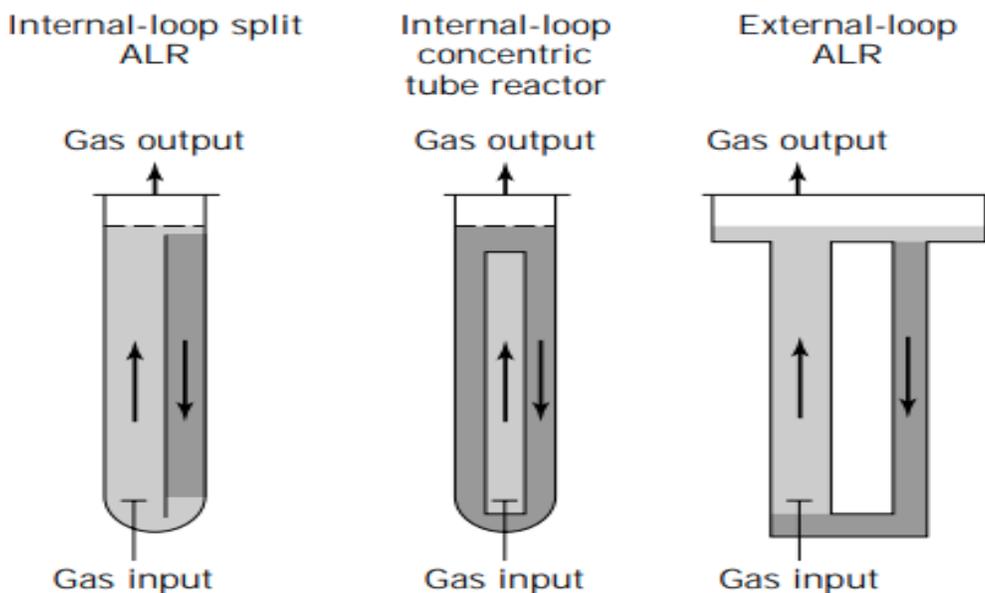
Nota. Esquema de un fotobiorreactor *Airlift*. Tomado de: "Diseño de un fotobiorreactor para la obtención de compuestos bioluminiscentes." [En línea]. Disponible: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/167711>

A partir de la **figura 14** los fotobiorreactores cuentan con diferentes zonas y regiones, las cuales se clasifican con respecto a su estructura para la circulación del fluido, estas zonas son aquellas que se les conocen como *riser* (ascenso), canal que permite el direccionamiento de la circulación de líquidos y gas, y una zona *downcomer* (descenso) canal por donde desciende el líquido [42]. Dentro de estas configuraciones se encuentran dos tipos de estructuras, estas se dividen en bucles internos, que buscan la modificación adecuada de los tubos que se encuentran dentro del fotobiorreactor, para brindarle al sistema una mejor circulación; "los bucles externos son aquellos donde el proceso de circulación del fluido se realiza por conductos separados y distintos." [43]

En la **figura 15** se muestran los tipos de configuraciones de los fotobiorreactores *airlift*.

Figura 15.

Tipos de configuraciones de los Fotobiorreactores Airlift.



Nota. La figura 15 representa los tipos de configuraciones de los fotobiorreactores *Airlift*. (a) Bucle interno de cilindro dividido (izquierda), (b) fotobiorreactor de tubos concéntricos de bucle interno (centro), (c) Bucle externo (derecha). Tomado de: "Bioreactors, Air-lift Reactors." [En línea]. Disponible: https://static1.squarespace.com/static/5f05026a76abbb66b08f5832/t/5f68e10c548f4d68794fc68a/1600708885742/Bioreactors_Air-Lift_Reactors_Merchuk%26Gluz.pdf

4.3.6 Fotobiorreactores Airlift de bucle interno

Las configuraciones de bucle interno cuentan con varias modificaciones con respecto a la ubicación de los tubos dentro del sistema; como la configuración de baffle plano. Esta modificación permite colocar el baffle en el centro del fotobiorreactor, en donde el *riser* y el *downcomer* tienen el mismo diámetro [44] También se puede ubicar el baffle con un diámetro diferente al centro del fotobiorreactor como se ve en la **figura 15 (a)**. De acuerdo a M.Y. Chisti [45], este tipo de configuración se basa en un fotobiorreactor de columna de burbujas que ha sido dividido. Por otra parte, se encuentra la configuración de tubos concéntricos. Esta variación de estructura determina el funcionamiento de la circulación del líquido, ya que en el tubo de ascenso (*riser*) se obtiene la mayor retención de gas, a lo que se refiere al contacto líquido-gas. Cabe resaltar que, para obtener una buena retención de gas, el tubo de ascenso (*riser*) depende directamente de la geometría del separador de gas [42]. Con respecto al tubo de descenso (*downcomer*), se obtiene una diferencia en la retención del gas que, a comparación del *riser*, es mucho más baja, lográndose evidenciar la diferencia de densidades [42], [44] como se observa en la **figura 15 (b)**.

4.3.7 Fotobiorreactores Airlift de bucle externo

Según J.C. Merchuk [42] dentro de esta configuración, se puede decir que el "*mecanismo de gas es más eficaz, debido a que la burbuja recorre un camino más corto*" [42], debido a que el tubo de ascenso (*riser*) y el tubo de descenso (*downcomer*) están separados **figura 15 (c)**, también como resultado de esta configuración se obtiene un aumento en la velocidad de circulación. Una de las desventajas de esta estructura en cuanto a operación, es la baja tasa de transferencia de masa que se tiene en comparación de los fotobiorreactores *airlift de bucle interno*. [44]

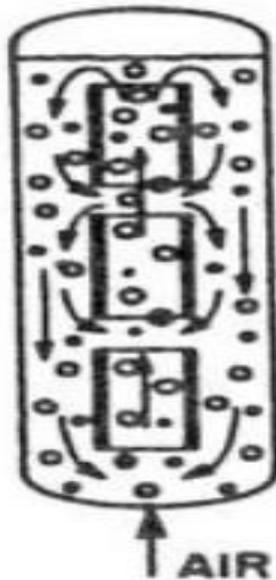
De acuerdo con estas estructuras de los *airlift*, se busca siempre el mejoramiento con referencia a la dinámica de fluidos y su transferencia de masa. Con respecto a las configuraciones presentadas en la **figura 15**, estas se pueden modificar siempre con el fin de optimizar las variables de operación. Una configuración que se ha estudiado es la de un fotobiorreactor dividido con múltiples tubos concéntricos de bucle interno,

configuración que permite el aumento de la comunicación entre el *riser* y el *downcomer*. [45]

Con base a los estudios del artículo "*Characteristics of local flow dynamics and macro mixing in Airlift column reactors for reliable design and scale-up*" [46], se evidencia que, gracias a este tipo de configuraciones, se le permite al sistema un incremento en la regeneración continua de burbujas en el fotobiorreactor, debido a su funcionamiento por etapas, de esta manera los autores reportan un aumento del 45% en la retención de gas. [46] **Figura 16.**

Figura 16.

*Esquema
fotobiorreactor airlift
dividido con múltiples
tubos concéntricos de
bucle interno*



Nota. Esquema de un fotobiorreactor dividido con múltiples tubos concéntricos de bucle interno. Tomado de: M.Y. Chisti Airlift Bioreactors pp.3

4.3.8 Difusores de gas

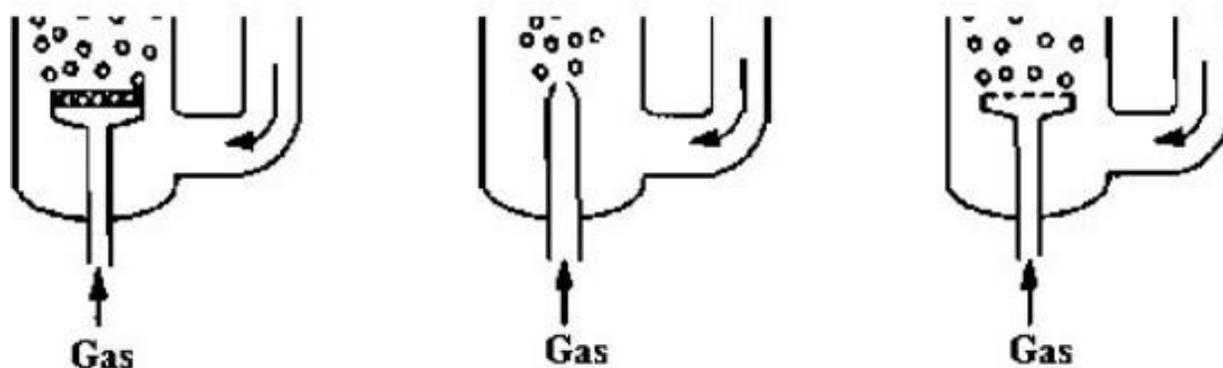
Los difusores de gas cumplen un papel importante dentro de las variables de diseño, en conjunto con factores como: velocidad del flujo de aire, tipos de difusores, posición del difusor y el tamaño de burbuja. Al brindar las características determinadas de los factores anteriormente mencionados, como resultado se tendrán altas tasas de transferencia de masa y un aumento en la eficiencia del mezclado.

4.3.9 Tipos de difusores

Los autores M.Y. Chisti y Moo-Young [47], para la elección del difusor cabe considerar que al momento de instalarlos al sistema estos deben ser fáciles de operar y de bajo costo. Los autores hacen referencia a los difusores estáticos y dinámicos; entre los estáticos se encuentran las placas perforadas, los platos porosos y los de un solo orificio. Se ha demostrado que los platos porosos tienen un costo mucho más alto que los platos perforados, y esto se debe a las caídas de presión que se presentan. Con respecto a los difusores dinámicos, en estos se encuentran las boquillas, en donde su "funcionamiento es debido a la energía cinética de un chorro líquido y aspersores anulares." [47]

Figura 17.

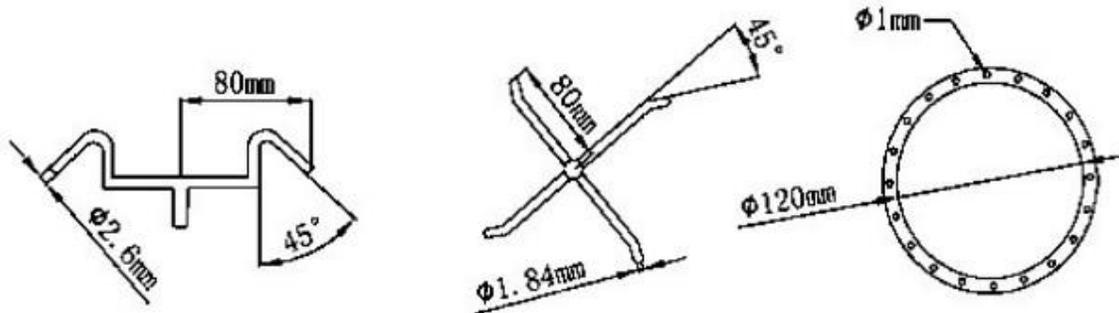
Difusores de gas estáticos.



Nota. La figura 17 representa los difusores estáticos: (a) plato poroso (izquierda), (b) Boquilla simple (centro), (c) Placa perforada o tubo perforado (derecha). Tomado de: "Diseño y construcción de un biorreactor "Airlift" y determinación de parámetros de operación óptimos para su aplicación en procesos fermentativos." [En línea]. Disponible: https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/10442/Huaman_gd.pdf?sequence=3&isAllowed=y

Figura 18.

Difusores Dinámicos.



Nota. La figura 18 representa los difusores Dinámicos: (a) Boquilla de dos orificios (izquierda), (b) Boquilla de cuatro orificios (centro), (c) Anulares (derecha). Tomado de: "Diseño y construcción de un biorreactor "Airlift" y determinación de parámetros de operación óptimos para su aplicación en procesos fermentativos." [En línea]. Disponible: https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/10442/Huaman_gd.pdf?sequence=3&isAllowed=y

De acuerdo con López-Hernández [48], «presenta un estudio endonde se implementó un fotobiorreactor *Airlift* de 17 L de vidrio, con una relación en las secciones *riser* y *downcomer* A_r / A_d de (0,41), las áreas del cilindro exterior eran de (0,18 m) y el interno de (0,17 m), para la producción de biomasa y lípidos. Para el desarrollo de este estudio, el autor implementó tres tipos de difusores (estrella cruz y un plato de vidrio poroso) a diferentes tasas de aireación, con el fin de identificar la

mejor productividad; con el difusor tipo estrella hecho de acero inoxidable y con perforaciones de (0,00 m) de diámetro, separados por (0,002 m) de diámetro, se obtuvo una mayor transferencia de masa, por lo cual presentó mejor productividad con respecto a la producción de biomasa a una tasa de aireación baja (9 L min^{-1}). En cuanto al difusor de cruz, que también fue hecho de acero inoxidable y con las mismas características de perforación, sin embargo el de cruz y el plato de vidrio poroso presentaron mejores productividades en cuanto a la producción de lípidos.»[48]

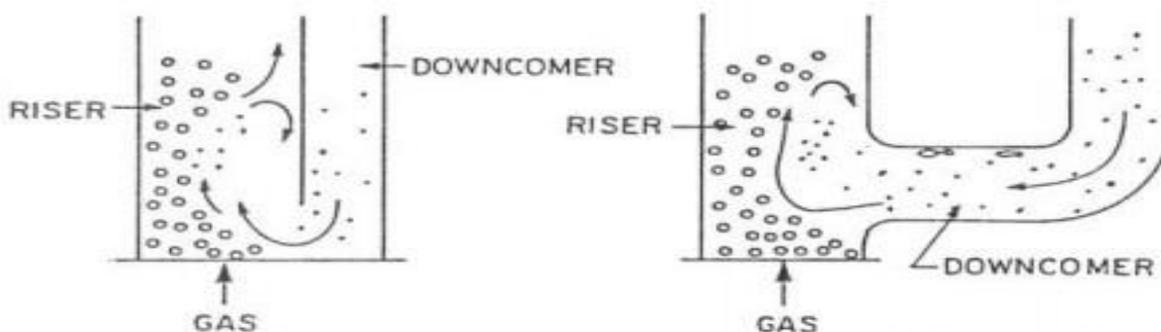
De acuerdo con el estudio anterior y a la literatura consultada, cabe decir que la selección del difusor para el cultivo de microalgas dependerá del propósito al que se quiera llegar con la producción [45]. Además, se deberán tener en cuenta características como el flujo de aire, el tamaño del difusor, el tamaño de los orificios y la cantidad, ya que estos factores tienen una gran influencia sobre la transferencia de masa y la retención de gas.[44]

4.3.10 Ubicación del difusor de gas

Como se ha expresado anteriormente, el difusor tiene una gran importancia dentro del cultivo de microalgas, su ubicación le proporciona al sistema una buena distribución del gas, en donde generalmente hay puntos muertos dentro del fotobiorreactor. Su ubicación le brindará a la zona de ascenso (*riser*) un mejor rendimiento [47]. Generalmente el difusor se coloca en la base de los fotobiorreactores como se observa en la **figura 19**. Sin embargo, esta posición no es la mejor, debido a que no le brinda al cultivo una distribución de gas uniforme [45] ocasionando así una caída de presión dinámica, lo cual resulta ser nociva para el cultivo. Por lo tanto, los estudios recomiendan que la mejor posición del difusor es ubicarlo dentro del fotobiorreactor por encima del flujo descendente, ya que de esta manera se introduce mejor el gas y evita la sedimentación de sólidos [45]. Como se observa en la **figura 20**.

Figura 19.

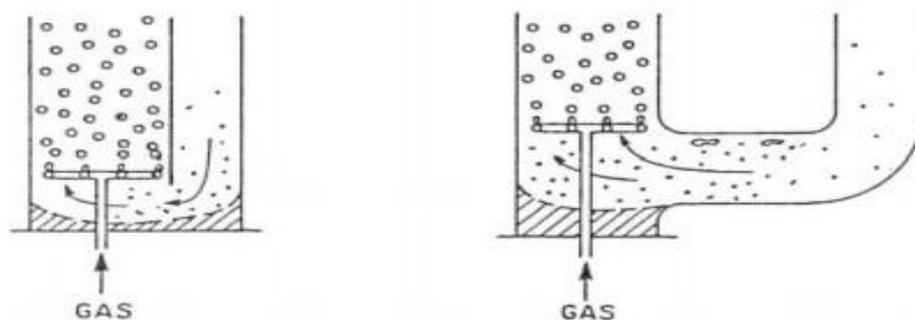
Ubicación del difusor de gas en la base del fotobiorreactor.



Nota. Representación gráfica de la ubicación del difusor de gas: (a) fotobiorreactor de bucle interno (izquierda), (b) fotobiorreactor de bucle externo (derecha) Tomado de: M.Y. Chisti *Airlift Bioreactors* pp.3

Figura 20.

Ubicación del difusor de gas dentro del fotobiorreactor.



Nota. Representación gráfica de la ubicación del difusor de gas: (a) fotobiorreactor de bucle interno (izquierda), (b) fotobiorreactor de bucle externo (derecha)

Tomado de: M.Y. Chisti *Airlift Bioreactors* pp.3

4.3.11 Tamaño de burbuja

El tamaño de burbuja tiene una relación estrecha con la hidrodinámica del fluido, ya que este influirá en cómo las burbujas ocuparán el área total y la interacción líquido-gas. La velocidad del fluido también influirá en la eficiencia de la mezcla [48]. De acuerdo con la literatura, los diámetros de burbuja son generalmente de (0,5 a 1 mm) [46]. El tamaño que se genera dependerá de los números de orificios y el diámetro que se escoja del difusor de gas. Si se generan burbujas grandes, estas dificultarán la acumulación de gas en él (*riser*), debido a que el gas recircularía menos, dando también como resultado una disminución de la velocidad del líquido [43]; en relación con las burbujas de menor tamaño de acuerdo al estudio "*Airlift bioreactor for biological applications with microbubble mediated transport processes*" [49], «la implementación de microburbujas en estudios de simulación, ha demostrado que logran aumentar el área de superficie/volumen, al mismo tiempo que aumenta la transferencia de oxígeno. Como resultado de una mayor velocidad de circulación del líquido, sin embargo también producen un aumento en la generación de espuma, lo cual no es conveniente para el cultivo; los diámetros de microburbujas que presenta el estudio fueron de (50, 70, 85, 100 y 140 μm). No obstante, los usos de burbujas con un diámetro muy pequeño no son aconsejables para todos los procesos debido al exceso de acumulación de gas, que estas pueden llegar a generar.» [49]

4.4 Variables de operación

4.4.1 Transferencia de masa

La transferencia de masa es uno de los fenómenos que tiene mayor influencia en el escalamiento de fotobiorreactores, ya que determina la productividad del cultivo. En otras palabras, el coeficiente de transferencia de masa (k_L) dentro del cultivo se identifica como la producción de oxígeno y la absorción de CO_2 [50]. De acuerdo con J.C. Merchuck [42], el coeficiente de transferencia de masa está ligado al área interfacial líquido-gas (k_{LaL}) y depende de factores como la densidad y la tensión de la superficie del líquido [42]. Por otro lado, controlar la producción de oxígeno es un reto, debido a que, si este sobrepasa los niveles de saturación, causaría la inhibición del cultivo.

4.4.2 Coeficiente volumétrico de transferencia de masa Gas-Líquido

La transferencia de masa gas-líquido en un cultivo de microalgas se relaciona con la manera en que la fase gaseosa (CO_2) se transfiere hacia los microorganismos y el modo en que se libera el O_2 en el cultivo y como este es transferido a las burbujas, esta transferencia se debe a la saturación de oxígeno disuelto en líquido [51]. Por otra parte para la medición del coeficiente volumétrico (k_{LaL}), se encuentran varios métodos empíricos. Los más empleados a nivel experimental son por medio de la dinámica del electrodo de oxígeno y por el método de oxidación de sulfito.[45]

4.4.3 Dinámica del electrodo de oxígeno

Este método permite la captación de oxígeno, en donde para su medición de las tasas de oxígeno disuelto, se toman muestras ya sea por gas de entrada

Ecuación 3.

Dinámica de electrodo de oxígeno.

$$\ln \left(\frac{C^* - C_0}{C^* - C} \right) = K_L a_L (t - t_0)$$

Nota. Se presenta la ecuación 3 correspondiente al cálculo de dinámica de electrodo de oxígeno. Tomado de: "*Bubble column and Airlift photobioreactors for algal culture.*" [En línea]. Disponible: <https://www.masse.y.ac.nz/~ychisti/AICHE.pdf>

Donde:

C*: Concentración de saturación de DO.

C₀: Concentración inicial de DO en el tiempo t.

C: concentración de DO en cualquier momento de t.

4.4.4 Método de oxidación de sulfito

La implementación de esta técnica de medición de oxígeno líquido, "*se basa en el consumo de oxígeno disuelto en el líquido para la oxidación de sulfito (SO²⁻) a sulfato (SO⁴⁻), con la ayuda de un catalizador*" [45], el tipo de catalizador que se implemente tendrá una alta influencia en la medición.

3.4.5 Retención de gas

Se caracteriza por determinar el tiempo de residencia del gas en el líquido, en otras palabras, la fracción de volumen de la fase gas-líquido en el sistema [45] Cabe resaltar que en los fotobiorreactores *airlift* el proceso de retención de gas se lleva a cabo de forma separada, por lo tanto, los valores que se obtengan en las zonas de ascenso (*riser*) y descenso (*downcomer*) serán diferentes [44]. Dicho esto, la retención de gas está directamente relacionada con la geometría del fotobiorreactor, ya que el tamaño determinará la cantidad máxima de retención de gas. De acuerdo con M.Y. Chisti [45], para la medición de esta variable se pueden emplear dos métodos: el método por expansión de volumen **ecuación 4** y la técnica manométrica. Como se observa en la

ecuación 5, un gran número de autores han utilizado estos métodos de medición, ya que se pueden implementar en cualquier tipo de fotobiorreactor y son métodos sencillos de aplicar. [45]

Ecuación 4.

Método de expansión de volumen.

$$\varepsilon = \frac{h_D - h_L}{h_D}$$

Nota. Se presenta la ecuación 4 correspondiente al cálculo de expansión volumétrica Tomado de: M.Y. Chisti Airlift Bioreactors pp.3

Donde:

ε : Retención total de gas.

h_L : Altura del líquido estático.

h_D : Altura de la dispersión gas-líquido.

Ecuación 5.

Técnica manométrica.

$$\varepsilon = \frac{\rho_M - \rho_L}{\rho_l - \rho_g} * \frac{dh_M}{d_2}$$

Nota. Se presenta la ecuación 5 correspondiente al cálculo de la técnica manométrica. Tomado de: M.Y. Chisti Airlift Bioreactors pp.3

Donde:

ε : Retención total de gas

ρ_M : Densidad del fluido del manómetro

ρ_L : Densidad del líquido

ρ_G : densidad del gas

dh_M : Lectura del manómetro

d_z : Distancia vertical

En un estudio presentado por el autor E.R. Gouveia [53], se analiza el «efecto de las relaciones geométricas en cuanto a la retención de gas en un fotobiorreactor de tubos concéntricos, con las relaciones entre las áreas (A_r/A_d), relaciones en el espacio libre superior y en el espacio libre inferior. En donde demostró que la retención de gas en ambas zonas aumenta debido a la disminución de la zona libre inferior del fotobiorreactor, sin embargo comenta que el mayor cambio en la retención de gas es debido a la zona libre superior del fotobiorreactor.»[53]

Además, el autor J.C. Merchuk [42], de igual forma manifiesta que las velocidades superficiales del líquido y gas en el *riser* dependen directamente de las relaciones geométricas del separador gas-líquido y el nivel de agua en el separador.[42]

Cabe decir que al momento de escalar un fotobiorreactor *airlift*, no solamente se debe tener en cuenta las variables volumen y altura, sino también tener muy presente las relaciones del espacio libre inferior y el espacio libre superior, ya que estas tendrán una gran influencia en la operación del fotobiorreactor.

4.4.6 Velocidad de circulación del líquido

La zona libre superior tiene una gran influencia en la retención de gas, dado que al tener un aumento en el tamaño de esta zona se obtendrá una mayor retención. Bajo este mismo criterio se encuentra la velocidad de circulación del líquido y el tiempo de mezclado; por lo tanto, si la zona superior libre tiene un aumento, se conseguirá un aumento en la velocidad de circulación del líquido [51]. Este fenómeno se debe a la diferencia en las presiones hidrostáticas que se ejercen en las zonas de ascenso (*riser*) y descenso (*downcomer*). Con base en la literatura consultada se han desarrollado varios métodos empíricos para la medición de la velocidad de circulación del líquido, sin embargo, la técnica más empleada por su simplicidad es el uso de un trazador con

medición de la conductividad y el pH en diferentes tiempos; esta se basa en sondas que son conectadas por sensores y un microprocesador dentro del *riser* y el *downcomer*. El trazador que se recomienda y es el más usado según las literaturas es una solución saturada de NaCl. [46]

4.4.7 Tiempo de mezclado

El tiempo de mezclado, la retención de gas y la velocidad del líquido de circulación tienen una estrecha relación, debido a que cuando se tiene una alta velocidad en la circulación del líquido se tendrá como resultado un tiempo más corto en el mezclado [46]. Según un estudio del autor Xin Guo [51], el tiempo de mezclado le permite al cultivo una mejor captación de luz, en otras palabras, está relacionado con los ciclos luz/oscuridad. [51] Cabe mencionar que la rapidez de circulación también dependerá de las propiedades del líquido con el que se esté trabajando ya sea con una alta viscosidad o baja. [46]

En la **ecuación 6**. Se puede observar la manera más sencilla de medir el tiempo de mezclado.

Ecuación 6.

Medición del tiempo de mezcla en fotobiorreactores.

$$I = \frac{C - C_m}{C_m}$$

Nota. Se presenta la ecuación correspondiente al cálculo de medición del tiempo de mezcla. Tomado de: "Bioreactors, air-lift reactors." [En línea]. Disponible: https://static1.squarespace.com/static/5f05026a76abbb66b08f5832/t/5f68e10c548f4d68794fc68a/1600708885742/Bioreactors_Air-Lift_Reactors_Merchuk%26Gluz.pdf

Donde:

I: Grado de homogeneidad.

C: Concentración máxima local.

Cm: Concentración media del marcador en la mezcla completa.

4.4.8 Fotoperiodo

Como se mencionó en el capítulo anterior, la luz es un factor indispensable para el crecimiento de las microalgas, ya que le permite al microorganismo la absorción adecuada de CO₂ y la producción de biomasa [12]. Con relación a esta variable, los autores P.Nirguna Babu [54] y L. López-rosales [55], entre otros autores, cultivaron diferentes especies de microalgas bajo un ciclo de luz/oscuridad (12:12 h), en donde se encontraron mejores rendimientos en cuanto a biomasa y cinéticas de crecimiento. Por lo expresado anteriormente se determina que el ciclo luz/oscuridad (12:12 h) es más conveniente para el cultivo de microalgas que la implementación del ciclo luz/oscuridad (16:8 h), sin embargo, se debe tener en cuenta el tipo de luz y su intensidad [54], [55]

4.5 Ecuaciones de escalamiento con base en la transferencia de luz

Uno de los factores que se encuentran presentes para el escalamiento de fotobiorreactores es la transferencia de luz dentro de ambientes líquidos, de esta manera se encuentran aspectos como la absorción por los pigmentos celulares y la dispersión provocada por la biomasa [14]. Por consiguiente, se han desarrollado ecuaciones con el fin de brindar un modelo matemático en donde se logre proporcionar un adecuado escalamiento [56]. La ecuación de Lambert-Beer se usa para determinar la absorción celular y la hipótesis de Schuster muestra la manera en que la luz se distribuye de modo isotrópico.

Los fenómenos de dispersión y absorción son expresados por las constantes E_s y E_a , siendo independientes entre sí.[57]

Tabla 7.
Descripción de ecuaciones de escalamiento

ECUACIÓN		DESCRIPCIÓN
Ecuaciones a la hipótesis de Schuster		
$\frac{drF_r^+}{dr} = -E_a C_x r F_r^+ + \frac{1}{2} E_s C_x r (F_r^- - F_r^+)$	<i>Balance de energía</i>	Fr es el flujo radiante, se divide en dos flujos opuestos (Fr+ y Fr-); generando balance de energía que llega a cada célula que absorbe y dispersa
$F_r = F_r^+ + F_r^-$	<i>Flujo de energía radiante</i>	Para obtener el flujo radiante es necesario sumar vectorialmente los flujos directos e inversos.
$J_r = \frac{1}{4\pi} (F_r^+ - F_r^-)$	<i>Intensidad media de luz.</i>	La intensidad media de luz se relaciona con el flujo de energía radiante.
$\frac{4\pi J_r}{F_r} = \frac{1}{Z} \frac{2 \cosh(\delta z)}{\cosh(\delta) + \alpha \sinh(\delta)}$	<i>Energía radiante.</i>	Ecuación a partir de la energía radiante y flujo de energía radiante, superficies externas.
$Z = \frac{r}{R}$	<i>Abscisa al eje R</i>	Relación entre la distancia radial, con el radio del reactor R Adimensional.
$\alpha = \sqrt{\frac{E_a}{E_a + E_s}}$	<i>Relación Ea y Es</i>	Relación de dispersión de luz (Es) y coeficiente de absorción(Ea).

$\delta = (E_a + E_s) * \alpha * C_x * R$	<i>Relación α con características de operación</i>	Alfa es proporcional a la concentración de biomasa, al espesor y condiciones de dispersión.
$\frac{\langle A \rangle}{\left(\frac{2F_r}{R}\right)} = 1 - \frac{F_r^+}{F_R} - \frac{F_r^+}{F_R}$ $\frac{\langle A \rangle}{\left(\frac{2F_r}{R}\right)} = \frac{2\alpha \sinh(\delta)}{\cosh(\delta) + \alpha \sinh(\delta)}$	<i>Balance de energía absorbida</i>	Velocidad volumétrica de energía promedio A, lo que quiere decir que será la energía absorbida dentro del reactor
	<i>Energía absorbida</i>	
$\frac{E_b}{F_R} = \frac{1}{Z_b} \frac{1}{\cosh(\delta) + \alpha \sinh(\delta)} [\pi I_0(\delta Z_b)]$ $Z_b = \frac{r_b}{R}$	<i>Energía disponible en el centro del reactor</i>	Las ecuaciones permiten cuantificar y conocer el flujo radiante y la cantidad de energía que llega a la pared del reactor
	<i>Abscisa centro del reactor</i>	
$I_0(\delta Z_b) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{\delta Z_b}{2}\right)^{2k}}{k! \Gamma(k+1)}$	<i>Relación radio de la esfera al radio del reactor</i>	Es una función de orden cero de Bessel.

$\frac{E_b}{F_R} = \frac{1}{Z_b} \frac{1}{\cosh(\delta) + \alpha \sinh(\delta)} \left[1 + \left(\frac{\delta Z_b}{2} \right)^2 \right]$	<i>Simplificación energía en el centro del reactor</i>	Relación radió de la esfera al radio del reactor.
$\langle r_x \rangle = \frac{1}{V} \int_V \mu_M C_x \frac{4\pi J}{K_j + 4\pi J} dV$	<i>Velocidad de crecimiento volumétrico</i>	Relación entre el crecimiento volumétrico y energía radiante.
$\langle u' \rangle = \frac{1}{V} \left(\int u'_M C_x \frac{4\pi J}{K_j + 4\pi J} dV \right) V$	<i>Crecimiento en un sistema cilíndrico</i>	Intensidad media de luz
$\langle u' \rangle \approx \frac{1}{\pi(R^2 - R_2^2)} \int_{R_2}^R 2\pi u'_M \frac{4\pi J_r}{K_j + 4\pi J_r} r dr$	<i>geometría cilíndrica</i>	Ecuación usada para reactores cilíndricos.
$\frac{1}{Z_2} * \frac{2 \cosh(\delta Z_2)}{\cosh(\delta) + \alpha \sinh(\delta)} - \frac{C_p}{F_R} = 0$	<i>Radio de trabajo iluminado</i>	Esta ecuación brinda dos respuestas dando una mayor y una menor, las cuales son el extremo del reactor y radio cerca del centro.
$Z_2 = \frac{R_2}{R} * y * Z'_2 = \frac{R'_2}{R}$	<i>Respuestas de trabajo</i>	Fracción iluminada
$\gamma = \frac{R_2'^2}{R^2} + \frac{R^2 - R_2^2}{R^2}$	<i>Fracción iluminada del reactor</i>	Para el conocimiento del máximo crecimiento, en geometrías cilíndricas.

$\langle R \rangle = \langle \mu' \rangle * \gamma * C_{fc}$	<i>Crecimiento volumétrico promedio</i>	Luego de tener conocimiento de la fracción iluminada
Ecuaciones beer-lambert en la transferencia de luz		
$dF_r = -E_{ar} * C_x * F_r * d_r$	<i>Balance de energía sin integrar</i>	
$F_r = F_0 * e^{(-E_{ar} * C_x * r)}$	<i>Balance de energía</i>	Principalmente esta ley utiliza de una manera simple el campo de luz paralelo y la dispersión de partículas sólidas Balance de energía en área transversal

Nota. En la tabla 7. Se muestran algunas de las ecuaciones principales de escalamiento con base a la transferencia de luz. Tomado de: "Escalamiento de un fotobiorreactor a nivel piloto para la producción de biomasa" Y "Propuesta de escalamiento de un fotobiorreactor para la microalga *chlorella vulgaris* a nivel piloto." [En línea] disponible:<https://revistas.uamerica.edu.co/index.php/rinv/article/view/66>;<https://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/825/1/6102537-2016-2-IQ.pdf>

4.5.1 Dimensiones y relaciones de los fotobiorreactores Airlift

Como se ha venido expresando para las variables de operación y las variables de diseño, estas tienen una gran relevancia en el escalamiento, debido a que si se obtiene una uniformidad de estas variables, se logra proporcionar un fotobiorreactor rentable para el comercio de procesos biológicos. Los fotobiorreactores *airlift*, como ya se ha mencionado, consisten de 4 secciones: zona de ascenso (*riser*), zona de descenso (*downcomer*), base (zona inferior) y separador de gas (zona de degasificación). Las relaciones más utilizadas para la configuración de la zona de ascenso y descenso son entre 4.8:1 a 10.3:1 y 0.4 a 0.8, respectivamente.[44]

En la **tabla 8** se muestran las relaciones de los parámetros de la geometría del fotobiorreactor *airlift* y los valores típicos para su construcción.

Tabla 8.

Relaciones de los parámetros de geometría

Descripción	Relación	Valores típicos
Diámetro del riser en relación con el diámetro del downcomer	D_r / D_d	0,3 - 0,6
Altura total del equipo en relación con el diámetro del downcomer	H / D_d	3 - 6
Volumen de operación en relación con el volumen total del equipo	V_{op} / V_T	0,7 - 0,9

Nota. Se presenta las relaciones de los parámetros con la geometría del fotobiorreactor *airlift*. Tomado de: "Diseño de un fotobiorreactor para la obtención de compuestos bioluminiscentes." [En línea]. Disponible:

<https://upcommons.upc.edu/handle/2117/167711>

Para la determinación de los valores en el escalamiento de fotobiorreactores *airlift*, se emplean las siguientes ecuaciones **tabla 9**.

Tabla 9.

Ecuaciones de dimensionamiento de fotobiorreactores airlift.

DESCRIPCIÓN	ECUACIÓN
Diámetro del downcomer	$D_r = [0,3 \text{ a } 0,6] D_d$
Altura total del equipo	$H = [3 \text{ a } 6] D_d$
Volumen total del downcomer	$V_{Td} = \frac{\pi * H * D_d^2}{4}$
Volumen del equipo	$V_T = V_{Td} + V_t$
Volumen de operación	$V_{op} \approx [0,7 \text{ a } 0,9] V_T$
Relación área de transferencia	$\frac{A_r}{A_d} = \frac{\pi * D_r^2}{\frac{\pi * D_d^2}{4}}$
Relación área superficie	$\frac{A_T}{V_T} = \frac{2 * \pi * rd * (H + rd)}{H * \frac{\pi * D_d^2}{4}}$

Nota. Se presentan las ecuaciones para determinar el dimensionamiento de fotobiorreactores *airlift*. Tomado de: "Diseño de un fotobiorreactor airlift a escala banco." [Enlínea]. Disponible: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5085375>

5. SELECCIÓN DE LA ESTRATEGIA PARA EL ESCALAMIENTO DE UN FOTOBIORREACTOR TIPO *AIRLIFT*

En este capítulo se presentará la estrategia que se considera más adecuada para el escalamiento de un fotobiorreactor tipo *airlift*. Para el desarrollo de la estrategia se plantearon unos criterios, en donde se tuvieron en cuenta algunos factores que son fáciles de evaluar con un concepto teórico, como también el resultado de la implementación de estos en experimentos a nivel piloto. De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada en los capítulos anteriores, se determinó que la estrategia para el escalamiento del fotobiorreactor se llevará a cabo de manera fenomenológica, ya que no se realizó ninguna prueba experimental para este trabajo de grado. Por lo tanto se basará solamente en la información recopilada.

5.1 Proceso para la elaboración de los criterios de calificación

Al hacer una revisión detallada de la literatura, se determinó que los aspectos que están más presentes para el escalamiento son: transferencia de luz, transferencia de masa, sistemas hidrodinámicos y geometría del fotobiorreactor. Actualmente se han implementado estudios en diferentes simuladores donde permiten estudiar y evaluar el comportamiento de la dinámica de fluidos en los fotobiorreactores; aportando una visibilidad a los cambios que se generan al modificar las variables de diseño y operación. Estos estudios permiten considerar si el diseño es óptimo tanto operacional como económicamente a nivel industrial. A continuación, se presentarán los criterios de clasificación en cuanto a las variables de escalamiento que se tendrán en cuenta para la selección de la estrategia.

1. **Disponibilidad de información:** en este criterio se calificará con respecto a la frecuencia encontrada del criterio en la literatura; con énfasis en la aplicación de los parámetros para el escalamiento como: la transferencia de la luz, transferencia de masa, sistemas hidrodinámicos y geometría.
2. **Viabilidad en la selección de la variable a escalar:** se tendrá en cuenta el desarrollo de los parámetros físicos y químicos, dado que tienen un gran impacto en el

escalamiento, por lo tanto, se tendrá presente las recomendaciones de los autores mencionados en el capítulo anterior.

3. **Desarrollo del escalamiento:** en este criterio se tendrá en cuenta los fundamentos teóricos de los modelos para el mejoramiento del diseño, en cuanto al desarrollo teórico de estos.

En la siguiente **tabla 10** se recopilaron las principales características que tienen influencia en cada variable.

Tabla 10.

Características de las variables para el escalamiento.

Variables	Características
Transferencia de Luz	<ul style="list-style-type: none"> -Estrecha relación con los periodos luz/oscuridad. -Al tener una mayor intensidad de luz, el nivel de saturación aumentara influyendo en la cinética de crecimiento. -No se recomienda el aumento de la trayectoria de luz en los fotobiorreactores porque implicaría una reducción del volumen y disminuye los periodos luz/oscuridad. -Algunos modelos para escalar son demasiado extensos y cuenta con una complejidad alta. -Tener un control de esta variable es mas compleja que otras. -Modelos basados en la absorción y dispersión de la luz generada por las células.
Transferencia de Masa	<ul style="list-style-type: none"> -Opción adecuada para el escalamiento ya que factores como el CO₂ y O₂ no limitan el escalado, son mas sencillos de controlar que la luz. -Alta relación con el tamaño de la burbuja. -Factores como la retención de gas (dinámica del movimiento de las burbujas) mejoran la transferencia de masa. -No se recomienda trabajar con presiones mayores a la atmosférica. -Depende de las propiedades estáticas y dinámicas de los líquidos. -No se obtienen altas tasas de transferencia de masa en fotobiorreactores muy altos.
Sistemas Hidrodinámicos	<ul style="list-style-type: none"> -Fluidos newtonianos y No-newtonianos. -Predicen la velocidad de circulación del liquido. -Se determina el régimen de flujo (laminar, turbulento). -Velocidad superficial del gas. -Estrecha relación con la transferencia de masa. -La velocidad del liquido influye en la retención de gas y el tiempo de mezcla. -La diferencia de densidades permite la circulación del liquido.

Tabla 10. (continuación)

Geometría	<ul style="list-style-type: none"> -Influye directamente a la velocidad superficial y a la circulación del líquido. -Geometría del área transversal (A_r/A_d) controla el flujo. -Diseño de la zona inferior y superior del fotobiorreactor influye directamente en la retención de gas y en la hidrodinámica del fluido.
	<p>Rectangular</p> <ul style="list-style-type: none"> -Baja velocidad de circulación del líquido. -Mayor espacio libre inferior. -Turbulencia en el downcomer es menor. -La relación del área transversal (A_r/A_d) no tiene efecto en el coeficiente global de transferencia de masa.
	<p>Internos</p> <ul style="list-style-type: none"> -Reducción en la retención de gas al ser muy altos los fotobiorreactores. -Se obtiene un mejor mezclado. -Mayor transferencia de masa.
	<p>Externos</p> <ul style="list-style-type: none"> -No es demasiado apto para fermentaciones altamente aeróbicas a grandes escalas. -Contribuyen poco a la transferencia de masa. -Poca retención de gas. -Cambios en la sección transversal genera una disminución en la velocidad de circulación del líquido. -Alta velocidad superficial del líquido en el Riser.

Nota. La tabla 10. Presenta las características principales de cada variable de escalamiento. Tomado de: "M.Y. Chisti *Airlift Bioreactors pp.3*"; "*Bioreactors, Air-Lift Reactors*" [En Línea].

Disponible: https://static1.squarespace.com/static/5f05026a76abbb66b08f5832/t/5f68e10c548f4d68794fc68a/1600708885742/Bioreactors_Air-Lift_Reactors_Merchuk%26Gluz.pdf

Con respecto a lo mencionado en la **tabla 10** sobre las características de las variables que generalmente se usan para el escalamiento de fotobiorreactores *airlift*, también de acuerdo con la recopilación de información presentada en los capítulos anteriores, se prosigue a hacer una rúbrica en donde se usa una escala con las siguientes características: **MUCHO MEJOR** (1 a 0,8), **MEJOR** (0,7 a 0,5) e **IGUAL** (0,4 a 0,1). Las investigadoras del estudio bajo criterios propios y basándose en los conceptos adquiridos a partir de la información recopilada, se proseguirá a dar una valoración a las variables, en donde permitirá priorizar el método que se consideraramás adecuado para el escalamiento, los criterios para esta calificación son la: disponibilidad de información, viabilidad en la selección y desarrollo del escalamiento, para así lograr brindar una estrategia adecuada para el escalamiento de fotobiorreactores *airlift*.

Tabla 11.

Matriz selección estrategia de escalamiento.

Criterio	Transferencia de luz	Transferencia de masa	Sistemas Hidrodinámicos	Geometría
Disponibilidad de información	0,75	0,85	0,94	0,3
Viabilidad variable	0,82	0,8	0,9	0,25
Desarrollo del diseño	0,82	0,9	0,92	0,6
Puntaje	2,39	2,55	2,76	1,15

Nota. Se muestra en la tabla 11 los criterios para la selección de la estrategia de escalamiento de un fotobiorreactor *airlift*.

En relación con los valores obtenidos de la **tabla 11**, se logra evidenciar que en los tres criterios propuestos para la selección de la variable para el escalamiento, los sistemas hidrodinámicos tiene la valoración más alta, como también la variable de transferencia de masa; por lo tanto se considera como buena estrategia el escalamiento de fotobiorreactores *airlift* a partir de sistemas hidrodinámicos, ya que muestra una amplia predicción del comportamiento en el interior del fotobiorreactor [45]; también se puede considerar otra estrategia con base en la transferencia de masa, por lo que tanto la transferencia de masa como los sistemas hidrodinámicos tienen una relación amplia en variables operacionales y algunas dependen de otras [42]. Las variables como la transferencia de luz y geometría; en cuanto a la transferencia de luz se considera que está menos estandarizada y presenta modelos más extensos, por lo tanto, no se consideró como una estrategia principal para el escalamiento. Con respecto a la geometría se encontró que simplemente aumentar las dimensiones sin tener en cuenta variables de operación no es recomendable, sin embargo se evidenció en las literaturas que todas las variables tienen una relación con los sistemas hidrodinámicos y una correcta implementación se puede llegar a tener buenos resultados.

5.2 Selección del material para la construcción

En cuanto a la selección del material para se deben tener en cuenta una variedad de características como: la transparencia, durabilidad, flexibilidad, resistencia y su bajo costo [15]. Uno de las características que se consideran importantes para la selección

del material es la transparencia, ya que permitirá el máximo paso de luz; como bien se sabe la fuente de luz es fundamental para los cultivos de microorganismos fotosintéticos, por lo tanto, se descartan materiales oscuros y metálicos.[15]

Con respecto a la revisión bibliográfica se logró identificar que los materiales amorfos y no cristalinos son los que mejor cumplen con la característica de transparencia, entre los materiales amorfos se encuentra el vidrio y los polímeros no cristalinos, estos presentan la característica que necesitan enfriarse de una manera más rápida, ya que así se previene que las moléculas se acomoden de manera organizada.[15]

En la **tabla 12** se presentan las características de los principales materiales para la construcción de fotobiorreactores *airlift*.

Tabla 12.

Especificación de los materiales.

Nombre	Características
Vidrio	Es muy estable aunque su peso es bastante alto (2,2 g/cm ³). Es muy quebradizo y puede reciclarse varias veces
Tereftalato de polietileno (PET)	Muy buenas propiedades mecánicas, su costo es económico, liviano. No es bueno cuando se somete a altas temperaturas además de que no soporta la humedad como máximo de 0,005 %. Es liviano, tiene gran resistencia a los ácidos, maneja una barrera de CO ₂ .
Polietileno de alta densidad (PEAD)	Es un polímero simple, su resistencia al impacto es alta y su resistencia a temperaturas es baja. Es impermeable y tiene baja reactividad. Su densidad es baja a comparación de otros materiales.
Etileno-tetrafluoretileno (ETFE)	Resistencia química y mecánica, gran estabilidad a cambios de temperatura hasta 170 °C, gran resistencia al calor, corrosión y rayos UV. Transmisión de la luz del 90%
Metacrilato (PMMA)	Tiene una transparencia al rededor del 93%. Alta resistencia al impacto, resistente a los rayos UV. Buen aislante térmico, gran facilidad de mecanización, tiene una buena resistencia a diferentes compuestos.

Nota. En la tabla 12 muestra las características de los materiales para la construcción de un fotobiorreactor *airlift*. Tomado de: "Diseño, montaje y caracterización de fotobiorreactores *airlift* para el cultivo de la microalga *Chlorella*"; "Arquimaterial"; Características del PET"; ETFE: el plástico que surge como alternativa ecológica al vidrio en edificios"; "Usos del vidrio".[en línea].

Disponible: <https://arquimaterials.wordpress.com/2012/05/07/polimetilmetacrilato-caracteristicas-y-propiedades/>

Tabla 13.*Propiedades de los materiales.*

PROPIEDAD	Vidrio	Tereftalato de polietileno (PET)	Poliétileno de alta densidad (PEAD)	Etileno-tetrafluoretileno (ETFE)	Metacrilato (PMMA)
Densidad (Kg/m ³)	2500	1380	953	1520	1180
Conductividad termica (W/m*K)	1	0,24	0,29	0,24	0,18
Calor especifico (J/Kg*K)	750	1000	2940	1900	1470
transmision de luz (%)	90	89	80	90	93

Nota. En la tabla 13 se muestra una comparación de propiedades de los materiales. Tomado de: "*Diseño de un fotobiorreactor airlift a escala banco.*" [en línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/278020462_Diseño_de_un_fotobiorreactor_Airlift_a_escala_banco

A continuación, se presentarán los criterios de clasificación para la selección del material más adecuado para la construcción del fotobiorreactor *airlift*.

1. **Transparencia:** Este criterio se calificará de acuerdo con el mayor porcentaje que el material cuente permitiendo el máximo paso de la luz en el fotobiorreactor.
2. **Costo del material:** factor importante a la hora de implementar un material, ya que su elección debe ser rentable para el proceso.
3. **Resistencia:** De acuerdo con este criterio al trabajar con varios componentes químicos, altas temperaturas y rayos ultra violeta, se requiere de un material que presente algunas características, ya que de él dependerá la durabilidad del equipo para los procesos correspondientes.
4. **Flexibilidad:** Características como resistencia al impacto, ya que así se evitarán posibles fragmentaciones y fugas, en donde se coloque en riesgo a los investigadores y al cultivo.

Se realizará el mismo procedimiento de selección que se utilizó anteriormente, teniendo en cuenta como parámetro el uso de los materiales para la elaboración de los fotobiorreactores *airlift*. En este caso para la rúbrica se presentará un cambio en las escalas, se manejarán de la siguiente forma: **MUCHO MEJOR** (1 a 0,8), **MEJOR**(0,7 a 0,5) y **NO RECOMENDABLE** (0,4 a 0,1), en donde las investigadoras del estudio bajo criterios propios y basándose en los conceptos adquiridos por la información recopilada, se proseguirá a dar una valoración para la selección del material más adecuado para la construcción.

Tabla 14.

Matriz selección material.

Criterio	Vidrio	Tereftalato de Polietileno (PET)	Polietileno de alta densidad (PEAD)	Etileno-tetrafluoretileno (ETFE)	Metacrilato (PMMA)
Transparencia	0,9	0,89	0,8	0,9	0,93
Costo material	0,4	0,9	0,3	0,8	0,8
Resistencia	0,3	0,5	0,7	0,85	0,85
Flexibilidad	0,1	0,75	0,75	0,8	0,9
Puntaje	1,7	3,04	2,55	3,35	3,48

Nota. Se muestra en la tabla 14 los criterios para la selección del material para la construcción de un fotobiorreactor *airlift*.

En relación con los valores observados en la **tabla 14** se logra evidenciar que en los cuatro criterios propuestos para la selección del material para la construcción, el metacrilato (PMMA) tiene la valoración más alta, como también el etileno tetrafluoretileno (ETFE); por lo tanto se considera como mejor opción para la construcción del fotobiorreactor *airlift*, el metacrilato (PMMA) ya que presenta el valor más alto en cuanto a la transparencia, siendo esta una característica fundamental para los cultivos de microorganismos fotosintéticos; de acuerdo con el criterio de flexibilidad se observa nuevamente que tiene el mayor porcentaje, siendo así un material en el cual no se presentarán fragmentaciones en el equipo fácilmente, logrando así evitar que se presenten accidentes durante el proceso.[15]

5.3 Análisis de la estrategia seleccionada

Al seleccionar la estrategia de escalamiento, se tuvo presente el modelo predictivo de M.Y. Chisti [45], ya que en su investigación colocan en marcha diferentes geometrías de fotobiorreactores *airlift*, en donde expone detalladamente las características de los sistemas hidrodinámicos [45]. Como también la investigación de J.C. Merchuk [42], en donde el autor indica que el movimiento del fluido del fotobiorreactor, determina su comportamiento en general, por lo tanto considera los sistemas hidrodinámicos adecuados para el escalamiento [42], como también indica que variables como la velocidad del líquido cumplen un gran papel dentro del sistema, ya que esta variable tiene un alto impacto en la retención de gas, tiempo de mezcla y transferencia de masa [42]; en igual forma lo expresa M.Y. Chisti [45], ya que en su investigación presenta un modelo basado en balances de energía, que permiten predecir la velocidad del líquido en diferentes características de los fluidos ya sean newtonianos y no newtonianos, indicando también que su modelo es apto para cualquier tipo de fotobiorreactor *airlift* [45]. Cabe señalar que ambos autores también se refieren a la importancia del tipo de flujo que se presente (turbulento o laminar), siendo el más apto el flujo turbulento, ya que este evita sedimentaciones en las paredes del fotobiorreactor, como también brinda un mezclado homogéneo en donde le permite al medio de cultivo una exposición adecuada de los rayos de luz y a los nutrientes.[42], [45]

En cuanto a la selección del material para la construcción del fotobiorreactor *airlift* se logró evidenciar que el Metacrilato (PMMA), con respecto a los demás materiales, cuenta con el mayor porcentaje de transparencia, lo cual hace que sea más apto, ya que al trabajar con microorganismos fotosintéticos, la luz es considerada una característica fundamental para su correcto crecimiento dentro del fotobiorreactor, aparte presenta una alta resistencia permitiéndole un buen desempeño al fotobiorreactor.

6. DISEÑO BÁSICO CONCEPTUAL Y PLAN P&ID PARA UN FOTOBIORREACTOR TIPO AIRLIFT

6.1 implementación de normativas de instrumentación ISA S5.1

Como último objetivo y desarrollo de las actividades finales se realizó una revisión bibliográfica para este proyecto de grado en donde *“se emplea un sistema especial de símbolos con el objetivo de transmitir de una forma más fácil y específica la información. Esto es indispensable en el diseño, selección, operación y mantenimiento de los sistemas de control.”* [58] en las normativas como lo es la Norma ISA (Sociedad de Instrumentistas de América) S 5.1. Es una de las más empleadas en el campo de la ingeniería de diseño de plantas químicas en la realización de planos y documentos, así mismo para el monitoreo y control del proceso, puesto que en él se pueden identificar los instrumentos o dispositivos, así como su representación gráfica. [59]

De esta manera para la elaboración del diagrama P&ID y haciendo uso de la información de la Norma ISA 5.1 se presenta el diagrama en el **Anexo 3**.

En la **tabla 15** se presentan los significados de las letras y sus funciones.[14], [59]

Tabla 15.

Conceptos de las letras de identificación.

Variable	Medida o inicio de información	Letra modificante	Función de lectura pasiva	Función de salida	Letra modificante
A	Análisis		Alarma		
B	Flama o quemador		Libre	Libre	Libre
C	Conductividad (eléctrica)			Control	
D	Densidad o peso específico	Diferencial			
E	Voltaje		Elemento primario(sensor)		
F	Flujo	Razón, fracción			
G	Calibre (espesor)		Visor		
H	Manual				Alto
I	Corriente		Indicación		
J	Potencia	Exploración (scan)			
K	Tiempo			Estación control	
L	Nivel		Luz piloto		Bajo
N	Libre		Libre	Libre	Libre
O	Libre		Orificio/ restricción		
P	Presión o vacío		Punto de prueba		
Q	Cantidad	Integrar o totalizar			
R	Radiactividad		Registrar		

Tabla 15. (continuación)

S	Velocidad o frecuencia	Seguridad		Interruptor	
T	Temperatura			Transmisor	
U	Multivariable		Multifunción	Multifunción	Multifunción
V	Viscosidad			Válvula	
W	Peso o fuerza		Termopozo(RTD, termocupla, ETC)		
X	Sin clasificar		Sin clasificar	Sin clasificar	Sin clasificar
Y	Libre			(12 relé, conversor, computador)	
Z	Posición			Actuar, operar o elemento final de control	

Nota. En la tabla 15. Se muestra los conceptos de las Norma ISA (Instrument Society of America) S 5.1. Tomado de: "*Instrumentación.*" [en línea]. Disponible: <https://topicoselectronica.files.wordpress.com/2014/02/instrumentacion-normas-y-simbologia.pdf>

6.2 Especificación de la nomenclatura asociada al sistema de monitoreo y control de procesos

Basado en la Norma ISA (Sociedad de Instrumentistas de América) S 5.1. se muestra en la **tabla 16** el significado de cada símbolo e instrumento con la finalidad de entender el sistema de monitoreo y control sugerido para el fotobiorreactor *airlift*.

Tabla 16.

Nomenclatura instrumentos.

SIMBOLOGIA	INSTRUMENTO
NT	Transmisor de intensidad lumínica
NIC 100	Controlador de intensidad lumínica con indicador
TT 101	Transmisor de temperatura
TIC 101	Controlador indicador de temperatura
TV 101	Válvula de temperatura
AIR 102	Analizador químico de pH con indicador y registrador
AIR 102	Analizador químico de salinidad con indicador y registrador
LG 103	Indicador de nivel
LIT 103	Transmisor de nivel con indicador
LAH 103	Nivel con alarma alta
LAL 103	Nivel con alarma baja
PT 104	Transmisor de presión
PDC 104	Controlador de presión
PY 104	Convertidor de presión
PDI 104	Indicador de presión
PCV-104	Válvula de control de presión
V-5	Válvula de seguridad
C-1	Compresor de suministro de aire
1	Salida a la atmósfera
AS	Alimentación de aire

Nota. Se presenta en la tabla 16 el significado de cada símbolo y/o instrumento puesto en el diagrama P&ID de: "instalación de instrumentos industriales simbología y diagramas de instrumentación normas ISA" [En línea]. Disponible: <https://www.slideshare.net/LaureanoZantedeschi/simbologia-en-instrumentacion>

6.3 Descripción de los sistemas de monitoreo y control del fotobiorreactor planteados a través del Diagrama P&ID

Para el monitoreo y control del fotobiorreactor *airlift*, se tuvieron en cuenta tres variables: la presión, la temperatura y la iluminación con el fin de establecer un ciclo de información en el proceso. Para el manejo de la iluminación se sugiere dos alarmas de nivel alto y nivel bajo, que permiten monitorear el comportamiento y tener un control del fotobiorreactor. [40]

Así mismo como se mencionó anteriormente se planteó un lazo de control para la presión con la finalidad de que este se pueda regular de acuerdo a la cantidad de aire que se suministre. Las dos válvulas de alivio aseguran al sistema seguridad en todo el proceso, por último, se encuentran los indicadores de pH y salinidad, para así proporcionar condiciones óptimas al cultivo. [14]

6.4 Descripción de los cálculos para el fotobiorreactor

Con base en la revisión bibliográfica del artículo "*Diseño de un fotobiorreactor tipo airlift a escala banco.*" [40] se tuvieron en cuenta las ecuaciones mencionadas para la construcción del fotobiorreactor *airlift* en donde se calcularon diferentes parámetros para el desarrollo de este, ver la **tabla 9**. Para el flujo de salida se revisó el trabajo de grado "*Propuesta de diseño de un sistema continuo para un fotobiorreactor air-lift a escala laboratorio.*" [43] Donde se tuvieron presentes las velocidades que se presentan en la **tabla 17**, en este caso no se calculó la velocidad específica. [43]

Tabla 17.

Velocidad de crecimiento específica.

Velocidad de crecimiento (s⁻¹)
4,3 E-07
1,1 E-06
6,1 E-07
6,6 E-07

Nota. En la tabla 17 se muestran las velocidades de crecimiento específicas. Tomado de: " *Propuesta de diseño de un sistema continuo para un fotobiorreactor air-lift a escala laboratorio.*" [En línea].

Disponible:

https://www.researchgate.net/publication/325409943_Propuesta_de_diseno_de_un_sistema_continuo_para_un_fotobiorreactor_airlift_a_escala_laboratorio

De acuerdo con los artículos *Development and validation of a minimal growth medium for recycling Chlorella vulgaris culture.*" [60] y "*Propuesta de diseño de un sistema continuo para un fotobiorreactor air-lift a escala laboratorio.*"[43] se seleccionó la ecuación de velocidad específica **ecuación 7**, en donde relacionan el tiempo de retención con la velocidad de crecimiento específico.[43], [60]

Para determinar el volumen se tuvo presente la tesis "*Diseño de un fotobiorreactor para la obtención de compuestos bioluminiscentes.*"[39] en donde se propuso que el fotobiorreactor tuviese un volumen de operación de 40 L, dicho volumen se desarrolla para un fotobiorreactor en planta piloto.[39]

Ecuación 7.

Velocidad específica

$$D = \frac{1}{\tau} = \mu$$

$$D = \frac{1}{2,31 \text{ días}} * \frac{1 \text{ día}}{86400 \text{ s}} = 5,010 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$$

Ecuación 8.

Flujo de salida

$$F_{out} = \mu \times V_{op}$$

$$40L \times \frac{1m^3}{1000L} = 0,04 m^3$$

$$F_{out} = 4,3 \times 10^{-7} \text{ s}^{-1} \times 0,04 m^3 = 1,72 \times 10^{-8} \frac{m^3}{s}$$

Por medio del estudio del trabajo “Propuesta de diseño de un sistema continuo para un fotobiorreactor air-lift a escala laboratorio” [43] se estableció la densidad 1000,176 (kg/m^3), ya que este trabajo de grado es basado en documentos experimentales con el fin de calcular el flujo de entrada con la **ecuación 9** [43], también se estableció la densidad del medio de cultivo basado en la **tabla 6**, el cual se escogió el medio de cultivo f/2. Guillard y Ryther (1962); Guillard (1975), agua de mar filtrada con una densidad de 1025.97 (kg/m^3). [61]

Ecuación 9.

Flujo de entrada

$$F_{in} = \frac{\rho_{out} \times F_{out}}{\rho_{in}}$$

$$F_{in} = \frac{1000,176 \frac{kg}{m^3} \times 1,72 \times 10^{-8} \frac{m^3}{s}}{1025,97 \frac{kg}{m^3}} = 1,67 \times 10^{-8} \frac{m^3}{s}$$

Cálculo de los tanques

Como se mencionó anteriormente, el volumen operacional es primordial para calcular el volumen total, además de también seleccionar el valor típico de 0,7 de acuerdo a las relaciones de los parámetros de geometría que se presentan en la **tabla 8**. En cuanto a la geometría se decidió cilíndrica, conteniendo el *riser* y el *downcomer*, en donde se tendrá en la parte superior una tapa, y en la parte inferior de igual manera otra tapa.[14], [39]

Para calcular la altura y el radio de acuerdo con las **ecuaciones 11** y **12** se tuvo en cuenta el volumen total.

Ecuación 10.

Volumen total

$$V_{total} = \frac{V_{op}}{0,7}$$

$$V_{total} = \frac{0,04 \text{ m}^3}{0,7} = 0,0571 \text{ m}^3$$

Ecuación 11.

Radio

$$R = \sqrt[3]{\frac{V_{total}}{2k\pi}}$$

$$R = \sqrt[3]{\frac{0,0571 \text{ m}^3}{2 \times 3 \times \pi}} = 0,144 \text{ m}$$

Ecuación 12.

Altura

$$H = 3 * 2 * R$$

$$H = 3 * 2 * 0,144 \text{ m} = 0,87 \text{ m}$$

Ecuación 13.

Altura de operación

$$H_{operación} = \frac{V_{op}}{R^2 \times \pi}$$

$$H_{operación} = \frac{0,04 \text{ m}^3}{0,144 \text{ m}^2 \times \pi} = 0,614 \text{ m}$$

Ecuación 14.

Diámetro downcomer

$$D_d = \frac{H}{6} = \frac{0,87 \text{ m}}{6} = 0,145 \text{ m}$$

Ecuación 15.

Diámetro riser

$$D_r = 0.35 * 0,145 \text{ m} = 0.049 \text{ m} \cong 0,05 \text{ m}$$

Ecuación 16

Área del riser

$$A_r = \frac{\pi * D_r^2}{4}$$

$$A_r = \frac{\pi * 0,05 \text{ m}^2}{4} = 0.039 \text{ m}^2 \cong 0,04 \text{ m}^2$$

Por otra parte de acuerdo con los cálculos realizados, estos permitieron realizar los planos del fotobiorreactor *airlift*, recordemos que cada uno fue calculado con parámetros ya descritos en el trabajo ver la **tabla 9**.

6.5 Descripción vista planos fotobiorreactor

Se puede observar en el **anexo B**. Las correspondientes dimensiones del equipo y los cálculos realizados en la **tabla 18** se presentan los resultados obtenidos para la elaboración de los planos del fotobiorreactor *airlift*.

Tabla 18.

Parámetros diseño fotobiorreactor.

Parámetro	Símbolo	Datos
Altura	H	0,87 m
Altura operación	Vop	0,614 m
Volumen operación	Vc	0,04 m ³
Volumen total	VT	0,057 m ³
Diámetro riser	Dr	0,05 m
Diámetro downcomer	Dd	0,145 m

Nota. Se presentan la tabla 18 con los resultados de los cálculos realizados para el diseño del fotobiorreactor *airlif*

7. CONCLUSIONES

De acuerdo con la revisión bibliográfica realizada en los capítulos anteriores, se identifican los parámetros y rangos que influyen en los cultivos de microalgas dentro de un fotobiorreactor *airlift*, aquellos parámetros identificados fueron la temperatura en un rango de 27 °C a 35 °C, el pH de 8,2 a 8,7, intensidad lumínica 130000 lux a 270000 lux, agitación 0,1 a 0,3 vvm, tipo de cultivo continuo como el más apto.

En cuanto a las variables de diseño y operación el estudio se basó en los sistemas hidrodinámicos, geometría, transferencia de masa, las ecuaciones de transferencia de luz de Lambert-Beer y la hipótesis de Schuster. Con base en la revisión bibliográfica se determinó que los sistemas hidrodinámicos y la transferencia de masa como la estrategia adecuada de escalamiento, ya que estas variables están más estandarizadas que las variables de transferencia de luz y geometría, sin embargo, estas no se desprecian totalmente, porque cumplen un papel elemental para el escalamiento de un fotobiorreactor *airlift*.

A partir de la investigación se seleccionó el Metacrilato (PMMA) como material para la construcción del fotobiorreactor *airlift*, ya que cuenta con características favorables para el cultivo de microalgas; este material cuenta con una alta transparencia el cual permite el mayor paso de los rayos de luz al cultivo, dando como resultado un crecimiento más óptimo del microorganismo.

Con base en los resultados adquiridos de los cálculos para el diseño, se obtuvo el volumen total del fotobiorreactor de 0,0571 m³, el fotobiorreactor contará con las dimensiones de 0.145 m y 0.05 m del *downcomer* y el *riser* respectivamente. Se determinó que la velocidad de crecimiento de la microalga variará con respecto al tiempo y las condiciones como lo son las velocidades de crecimiento. Con respecto a la normativa ISA (Sociedad de Instrumentistas de América) S 5.1 se propuso un diagrama P&ID con las variables de diseño que se deben tener en cuenta para un sistema de un fotobiorreactor *airlift*.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Anonymous (Dic,2016)."Ofrecen cultivos de algas una amplia gama de aplicaciones en beneficio del ser humano y el medio ambiente." *Boletines UAM*.Available: <http://www.comunicacionsocial.uam.mx/boletinesuam/545-16.html>.
- [2] S.Montesinos-gonzález *et al*, 2017. "Revista de la Ingeniería Industrial," *Academia Journals*, vol. 11, pp. 15-21.
- [3] *Transformación genética de microalgas para su aplicación biotecnológica* (Nov 15,). Available: <http://www.cienciamx.com/index.php/sociedad/politica-cientifica/11464-transformacion-genetica-de-%20microalgas-para-su-aplicacion-biotecnologica>.
- [4] A. Anaya-Durand and H. Pedroza-Flores, (Jun,2008)."Escalamiento, el arte de la ingeniería química: Plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina." *Tecnología, Ciencia, Educación*.Available: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=48223105>.
- [5] R. Acuña, "Dimensionamiento y escalamiento de bioprocesos," -08-14T16:03:41+00:00, 2008.
- [6] *Unidad 2. Biorreactores y su aplicación - Bioingeniería*. Available: <https://sites.google.com/site/bioingenieriauv15/unidad-2-biorreactores-y-su-aplicacion>.
- [7] H.Scott-Fogler, *Elements of Chemical Reaction Engineering*. (4th ed.) Prentice Hall Professional Technical Reference, 2006.
- [8] *Introducción - Reactor de lecho empacado*. Available: <https://sites.google.com/site/reactordelechoempacadocinetica/resumen>.
- [9] D.M. Florez-Cortés and J. Posada-Noreña, .2007."Diseño Conceptual De Un Reactor De Lecho Fluidizado a Escala Laboratorio Para El Tratamiento De Aguas Residuales." Universidad EAFIT.
- [10] F.F. Cortés-Conde, E.M. Gómez-Espinosa and D. Rubio-Fernández,

- (Jul,2013)."Análisis comparativo de modelos hidrodinámicos y cinéticos para fotobiorreactores airlift." *Iteckne*. Available: <http://revistas.ustabuca.edu.co/index.php/ITECKNE/article/view/180/217>.
- [11] *Ingeniería de procesos aplicada a la biotecnología de microalgas*. Available: <https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/tema-1---generalidades/1-7-fotobiorreactores.html>.
- [12] L.G. Ramírez-Mérida, L. Queiroz-Zepka and E. Jacob-Lopes, (Jul 01,2013)."Fotobiorreactor: Herramienta para el cultivo de cianobacterias." *Ciencia Y Tecnología (Quevedo, Ecuador)*. Available: <https://search.proquest.com/docview/1696718146>.
- [13] J.L. Ramírez-Duque, (Dic,2017)."Viabilidad en la producción de biomasa microalgal a partir de fotobiorreactores solares en el Valle del Cauca, Colombia." *Revista De Investigación Agraria Y Ambiental*. Available: <https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/2039/2292>.
- [14] J.C. Tovar-Salamanca and J.P. Ruíz-Díaz, .2016."Propuesta De Escalamiento De Un Fotobiorreactor Para La Microalga Chlorella Vulgaris a Nivel Piloto." Fundación Universidad de América.
- [15] M. Fernández-Ángel, .2013."Diseño, Montaje Y Caracterización De Fotobiorreactores Airlift Para El Cultivo De La Microalga Chlorella Sorokiniana." Universidad EAFIT.
- [16] D. Huamán-Gastelú and E.H. León-Flores, .2019."Diseño Y Construcción De Un Biorreactor Airlift Y Determinación De Parámetros De Operación Óptimos." Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- [17] *Microalgas-Definición y Características*. Available: <https://w3.ual.es/~jfernand/ProcMicro70801207/tema-1---generalidades/1-1-microalgas.html>.
- [18] F.J. Choix-Ley, .2014."Evaluación De La Acumulación De Carbohidratos En La

Microalga *Chlorella* Spp. Asociada Con La Bacteria *Azospirillum* Brasilense." Centro de investigaciones biológicas del noroeste, S.C.

- [19] A. González-Céspedes, (Oct,2015). "¿Qué son las microalgas? Interés y uso." *Cajamar Caja Rural*. Available: <https://www.cajamar.es/storage/documents/microalgas-1444391623-ca345.pdf>.
- [20] R.O. Pérez-García, .2009. "Eliminación De Nutrientes Para El Tratamiento Biológico De Agua Residual Usando Un Sistema Inmovilizado Microalga-Bacteria En Crecimiento Autotrófico, Heterotrófico Y Mixotrófico." Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste S.C.
- [21] A.M. Santos, Y. González-Arechavala and C. Martín-Sastre, (Feb,2014). "Uso y aplicaciones potenciales de las microalgas." *Anales De Mecánica Y Electricidad*. Available: https://www.iit.comillas.edu/documentacion/IIT-14027A/Uso_y_aplicaciones_potenciales_de_las_microalgas.pdf.
- [22] J. Abalde *et al*, *Microalgas: Cultivo Y Aplicaciones*. Universidade da Coruña, Servicio de Publicacións, 1995.
- [23] A. Hernández-Pérez and J.I. Labbé, (Aug 01,2014). "Microalgas, cultivo y beneficios." *Revista De Biología Marina Y Oceanografía*. Available: https://explore.openaire.eu/search/publication?articleId=&od_____3056::cc0d3aa14e0eabf36019cc88354c81d8. DOI: 10.4067/S0718-19572014000200001.
- [24] J. García-Romeral *et al*, (Feb 6,2017). "Principios de Biotecnología y Bioingeniería en el cultivo de microalgas: Importancia, Problemas tecnológicos, Tipos y Sistemas de cultivos, Crecimiento, Factores limitantes, Selección, Aislamiento, Escalado y Caracterización bioquímica."
- [25] M.D. Vazquez-Raymundo, .2019. "Modelado Computacional De Un Fotobiorreactor En Modo Continuo Mediante Elemento Finito Para El Crecimiento De Una Microalga Usada Para Generar Biocombustible." Universidad Tecnológica de la Mixteca.
- [26] L. Torrentera-Blanco and A.G.J. Tacon, "La producción de alimento vivo y su

- importancia en acuicultura una diagnosis." Available:
<http://www.fao.org/3/ab473s/AB473S02.htm>.
- [27] K. Robles-Figueroa, .2007."Consumo De Nitratos De Tetraselmis Chuii En Diferentes Medios De Cultivo a Tres Temperaturas." Universidad de Sonora, México.
- [28] L.J. Rendón Castrillón, M.E. Ramírez Carmona and Y. Vélez Salazar, *Microalgas Para La Industria Alimenticia*. Medellín, Colombia: Universidad Pontificia Bolivariana, 2015.
- [29] D. Voltolina-Lobina, *Métodos Y Herramientas Analíticas En La Evaluación De La Biomasa Microalgal*. México: centro de investigaciones biológicas del noroeste, s. c. Fecha de publicación: 2007.
- [30] *Cultivo y Elaboración de un producto comestible de Chlorella vulgaris*. Available: <https://www.feriadelasciencias.unam.mx/antiores/feria17/21.pdf>.
- [31] M.C. Pedraza-Cuesta and M.C. Prada-Garavito, .2018."Evaluación De La Biofijación De CO₂ Y Producción De Biomasa a Partir De Las Microalgas Bajo Condiciones De Fotobiorreactor a Escala Laboratorio." Fundación Universidad de América.
- [32] Q. Huang *et al*, (2017)."Design of Photobioreactors for Mass Cultivation of Photosynthetic Organisms." *Engineering (Beijing, China)*. Available: <http://lib.cqvip.com/qk/87553B/201703/672708865.html>. DOI: 10.1016/J.ENG.2017.03.020.
- [33] J. Plasencia-Álvarez, .2012."Cultivo De Microalgas (Chlorella Sorokiniana) Con Iluminación Mediante LEDs (Light Emitting Diodes)." Universidad Politécnica de Madrid.
- [34] B.B. Torres-Gómez and F.N. Cerón-López, .2020."Evaluación De La Captura De CO₂ Para La Mejora Del Biogás. Mediante Un Cultivo De La Microalga Chlorella Vulgaris En Un Sistema De Biorreactores a Nivel Laboratorio." Fundación Universidad de América.

- [35] J.L. Doncel-Nuñez and H.L. Moreno-Saboya, .2017."Evaluación De La Influencia De La Agitación Para La Producción De Biomasa Microalgal En Un FBR Panel Plano a Escala Laboratorio." Fundación Universidad de América.
- [36] V. Gossain and R. Mirro, "Linear Scale-Up of Cell Cultures," Dec 1, 2010.
- [37] M.M. Helm, N.Bourne and A. Lovatelli, (2006)."Funcionamiento del criadero: cultivo de algas." *Cultivo De Bivalvos En Criadero.Un Manual Práctico*.Available: <http://www.fao.org/3/y5720s/y5720s07.htm>.
- [38] E. Molina-Grima *et al*, (1999)."Photobioreactors: light regime, mass transfer, and scale-up." *Progress in Industrial Microbiology*.Available: [http://dx.doi.org/10.1016/S0079-6352\(99\)80118-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0079-6352(99)80118-0). DOI: 10.1016/S0079-6352(99)80118-0.
- [39] V.F. Sanz-Martínez, .2019."Diseño De Un Fotobiorreactor Para La Obtención De Compuestos Bioluminiscentes ." Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona.
- [40] D. Rubio-Fernández *et al*, (2014). "Diseño de un fotobiorreactor Airlift a escala banco," vol. 4, pp. 123-143,
- [41] J.M. Peña-Castro, L.B. Flores-Cotera and R.O. Cañizares-Villanueva, (08/2003)."Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas." *Interciencia*.Available: http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0378-18442003000800004&lng=es&nrm=iso&tlng=pt.
- [42] J.C. Merchuk and M. Gluz, (1990)."Bioreactors, Air-Lift Reactors." Available: https://static1.squarespace.com/static/5f05026a76abbb66b08f5832/t/5f68e10c548f4d68794fc68a/1600708885742/Bioreactors_Air-Lift_Reactors_Merchuk%26Gluz.pdf.
- [43] C.M.Gutiérrez-Cuervo and D.K. Guzman-Silva, .2016."Propuesta De Diseño De Un Sistema Continúo Para Un Fotobiorreactor Air-Lift a Escala Laboratorio." Fundación Universidad de América.

- [44] D. Huamán-Gastelú, .2019."Diseño Y Construcción De Un Biorreactor Airlift Y Determinación De Parámetros De Operación Óptimos Para Su Aplicación En Procesos Fermentativos." Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- [45] M.Y. Chisti, *Airlift Bioreactors*. Elsevier applied science, 1989.
- [46] F. Gumery, F. Ein-Mozaffari and Y.Dahman, (2009)."Characteristics of Local Flow Dynamics and Macro-Mixing in Airlift Column Reactors for Reliable Design and Scale-Up." *International Journal of Chemical Reactor Engineering*.
- [47] M.Y. Chisti and M. Moo-Young, *Airlift Reactors: Characteristics, Applications and Design Considerations*. (60th ed.) Gordon and Breach Science Publishers S.A, 1987.
- [48] Y. López-Hernández *et al*, (2019)."Influence of Sparger Type and Regime of Fluid on Biomass and Lipid Productivity of *Chlorella vulgaris* Culture in a Pilot Airlift Photobioreactor." *Chemical and Biochemical Engineering Quarterly*. Available: <https://hrcak.srce.hr/218886>. DOI: 10.15255/CABEQ.2018.1403.
- [49] M.K.H. Al-Mashhadani, S.J. Wilkinson and W.B. Zimmerman, (Dec 1,2015)."Airlift bioreactor for biological applications with microbubble mediated transport processes." *Chemical Engineering Science*. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2015.06.032>. DOI: 10.1016/j.ces.2015.06.032.
- [50] F. G. Acien-Fernández, J.M. Fernández-Sevilla and E. Molina Grima, 2013. "Photobioreactors for the production of microalgae," *Rev Environ Sci Biotechnol*, vol. 12, pp. 131-151,
- [51] X. Guo, L. Yao and Q. Huang, (abr 28,2015)."Aeration and mass transfer optimization in a rectangular airlift loop photobioreactor for the production of microalgae." *Bioresource Technology*. Available: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25958141>. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.04.077.
- [52] A. Sánchez-Mirón *et al*, (2000)."Bubble-column and airlift photobioreactors for algal culture." *AIChE Journal*. Available: <https://api.istex.fr/ark:/67375/WNG-5NTRZTSR->

K/fulltext.pdf. DOI: 10.1002/aic.690460915.

- [53] E.R. Gouveia, C.O. Hokka and A.C. Badino-Jr, 2003). "The effects of geometry and operational conditions on gas holdup, liquid circulation and mass transfer in an airlift reactor." *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. Available: https://explore.openaire.eu/search/publication?articleId=dedup_wf_001::c627a181bc149287c1c3375c29171d47. DOI: 10.1590/S0104-66322003000400004.
- [54] P. Nirgura-Babu and P. Binnal, 2014. "Lipid productivity of microalgae *Chlorella vulgaris* and *Nannochloropsis oculata* in externally illuminated lab scale photobioreactor," *International Journal of ChemTech Research CODEN*, vol. 7, pp. 2217-2221,
- [55] L. López-Rosales *et al*, 2016). "Pilot-scale bubble column photobioreactor culture of a marine dinoflagellate microalga illuminated with light emission diodes." *Bioresource Technology*. Available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.027>. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.06.027.
- [56] D. Rubio-Fernández *et al*, (01/012017). "Escalamiento de un fotobiorreactor a nivel piloto para la producción de biomasa." Available: <https://revistas.uamerica.edu.co/index.php/rinv/article/view/66>. DOI: 10.29097/2011-639X.66.
- [57] J.F. Cornet, C.G. Dussap and G. Dubertret, *A Structured Model for Simulation of Cultures of the Cyanobacterium Spirulina Platensis in Photobioreactors: I Identification of Kinetic Parameters Under Light and Mineral Limitations*. 1992.
- [58] *Instalación de instrumentos industriales* (Mar 5,). Available: <https://es.slideshare.net/LaureanoZantedeschi/simbologia-en-instrumentacion>.
- [59] *Importancia y Utilización del Estándar ANSI/ISA S5.1*(May 21,). . Available: <https://www.isamex.org/intechmx/index.php/2019/05/21/importancia-y-utilizacion-del-estandar-ansi-isa-s5-1/>.
- [60] F. Hadj-Romdhane *et al*, (Ago2012). "Development and validation of a minimal

growth medium for recycling *Chlorella vulgaris* culture." *Bioresource Technology*. Available: <https://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2012.07.085>. DOI: 10.1016/j.biortech.2012.07.085.

[61] *Photosynthetic rates derived from satellite-based chlorophyll concentration*. Available: http://oceanografia-gral-fis.at.fcen.uba.ar/4_Propiedades.pdf.

[62] Manual Estructuración del Trabajo de Grado. Fundación Universidad de América, 2021 [PDF].

ANEXOS

**ANEXO 1.
CONVERSION**

Tabla 19.

Conversión de PPFD a Lux

PPFD ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) to Lux

Light Source	Conversion Factor
Sunlight	54
Cool White Fluorescent Lamps	74
Mogul Base High Pressure Sodium Lamps	82
Dual-Ended High Pressure Sodium (DEHPS): ePapillion 1000 W	77
Metal Halide	71
Ceramic Metal Halide (CMH942): standard 4200 K color temperature	65
Ceramic Metal Halide (CMH930-Agro): 3100 K color temperature, spectrum shifted to red wavelengths	59
Multiply the PPFD by the conversion factor to get Lux. For example, full sunlight is $2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ or 108,000 Lux ($2000 * 54$).	

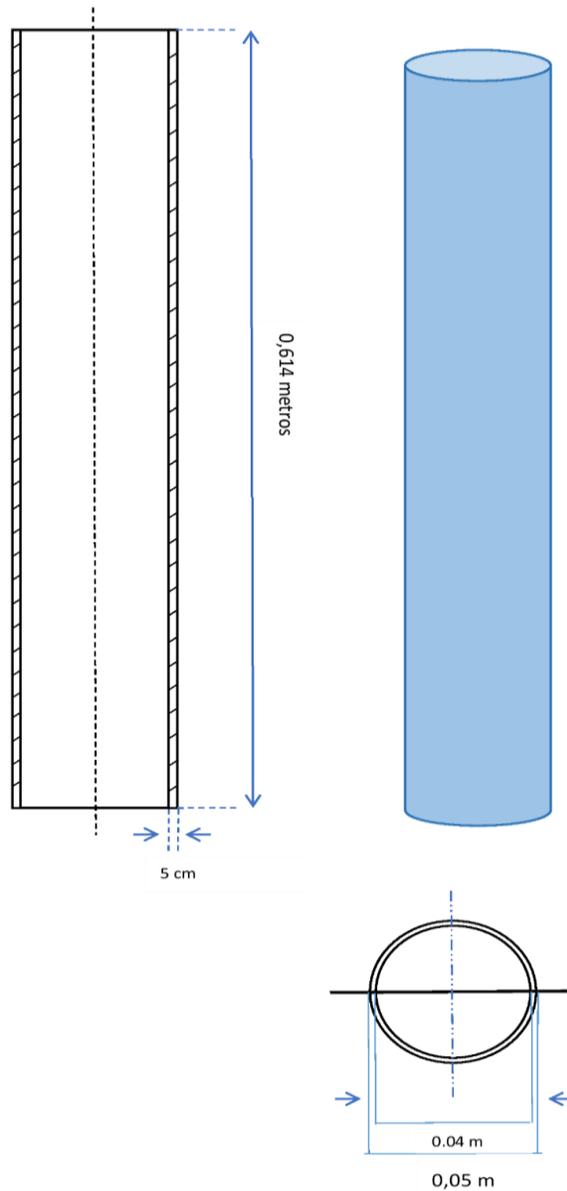
Nota. En la tabla 18. Se muestran algunas de las conversiones para la intensidad lumínica Tomado de: "Apogee Instruments" [En línea]. Disponible: <https://www.apogeeinstruments.com/conversion-ppfd-to-lux/>

ANEXO 2

DISEÑO DEL FOTOBIORREACTOR AIRLIFT

Figura 21.

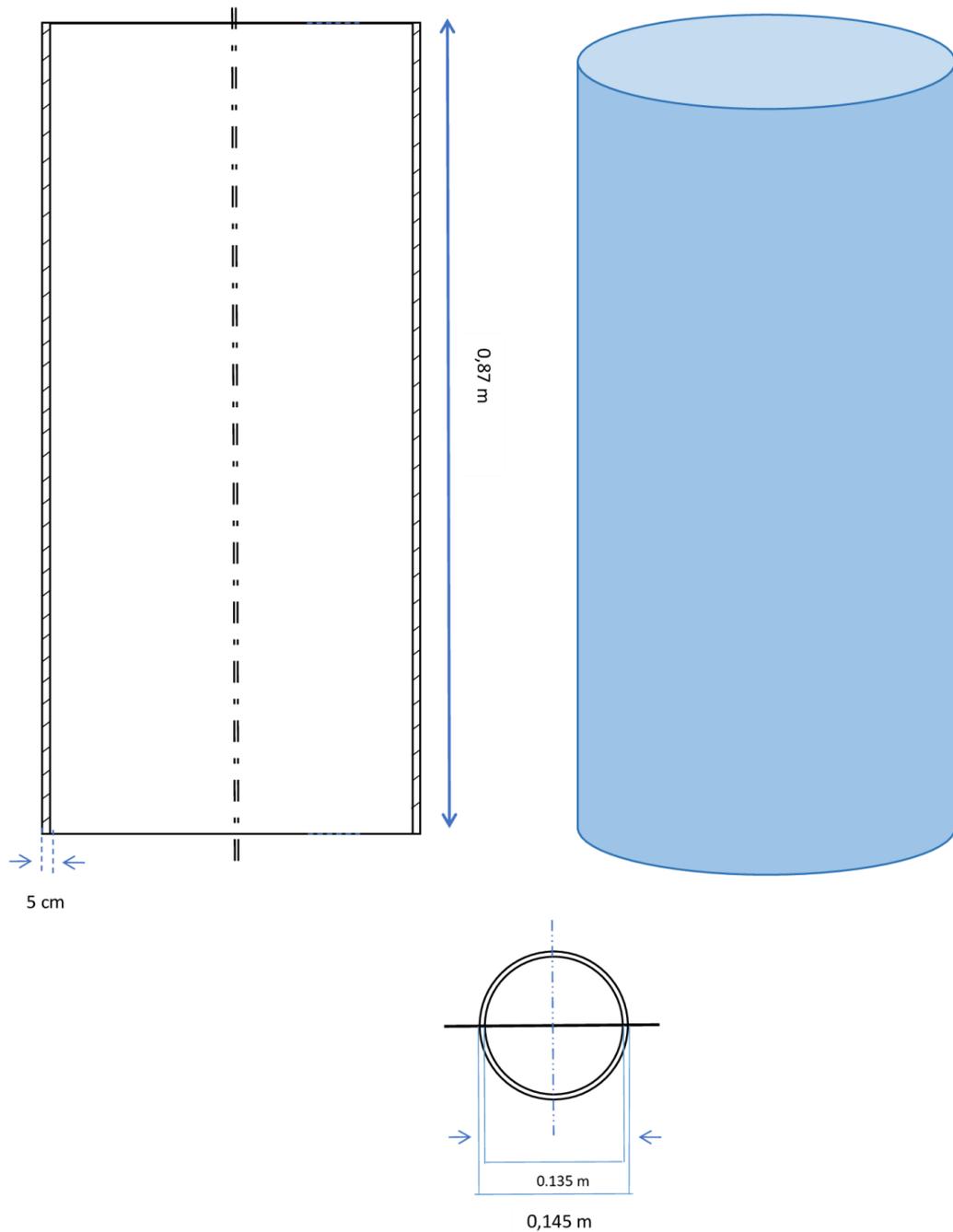
Vista del riser lateral



Nota. Se muestra en la figura 21 la vista lateral del *riser* parte del fotobiorreactor *airlift*.

Figura 22.

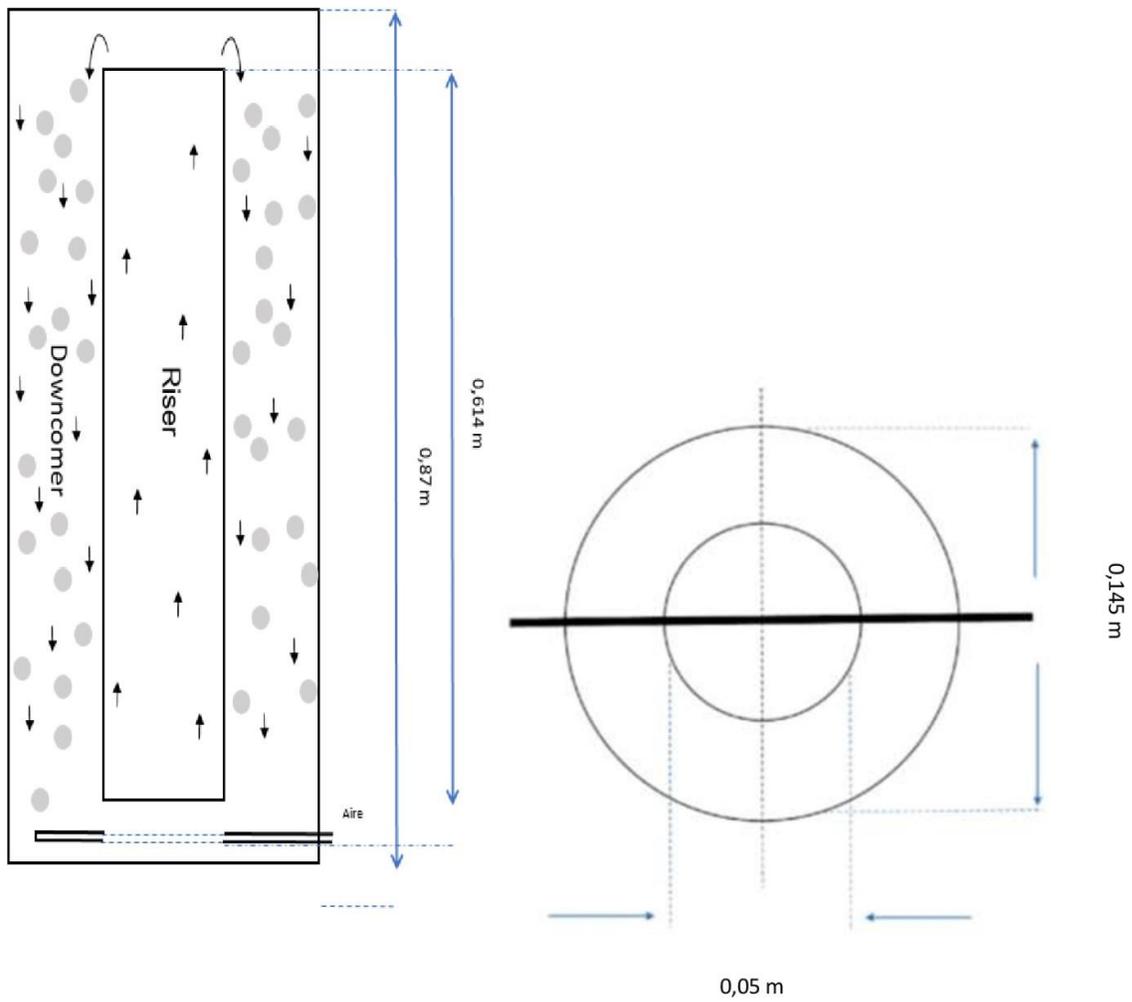
Vista del downcomer



Nota. Se muestra en la figura 22 la vista lateral del downcomer parte del fotobiorreactor *airlift*.

Figura 23.

Vista superior y lateral del riser, downcomer



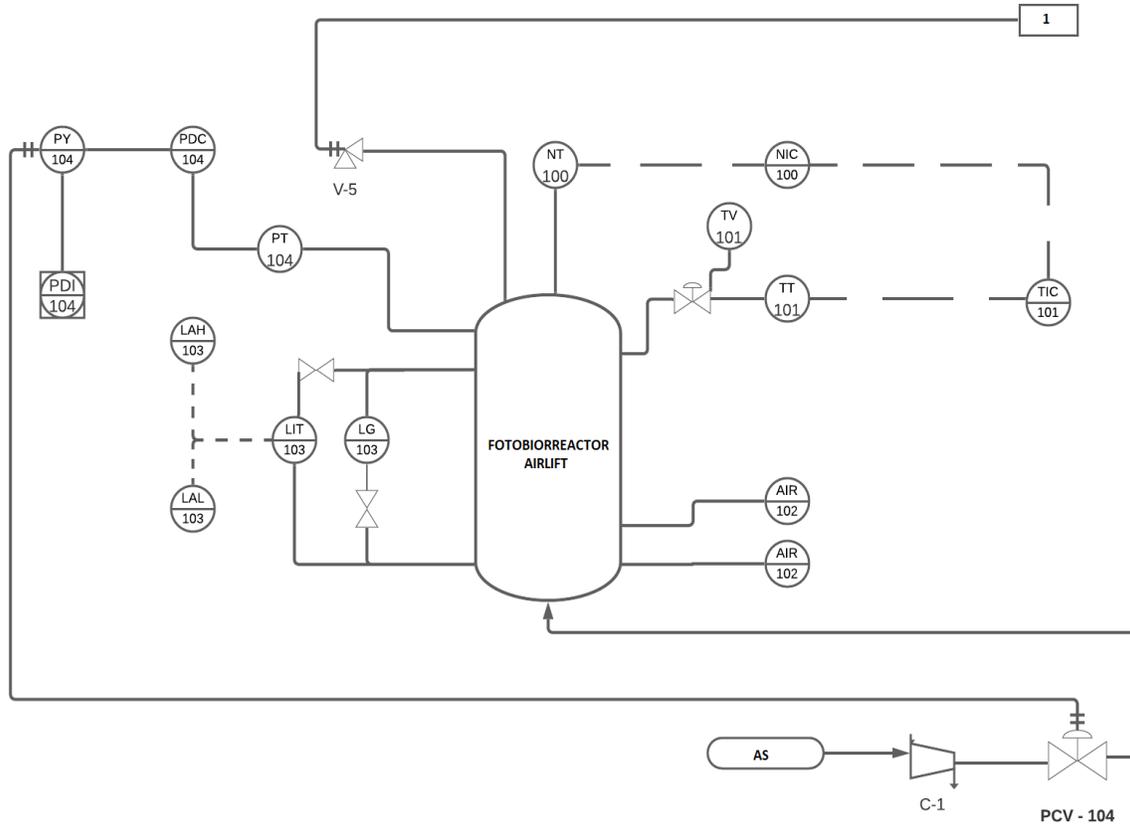
Nota. Se muestra en la figura 23 la vista superior y lateral del *downcomer* y el *riser* del fotobiorreactor *airlift*.

ANEXO 3

SISTEMA DE MONITOREO Y CONTROL PARA EL FOTOBIORREACTOR

Figura 24.

Diagrama De Tuberías E Instrumentación (P&ID)



Nota. Se muestra en la figura 24 el diagrama de tuberías e instrumentación P&ID para un fotobiorreactor *airlif*

