



**Construcción de un biorreactor a escala de laboratorio de 20L para el cultivo de microalgas, que permita la fijación de CO<sub>2</sub>, empleando materiales de bajo costo y fácil acceso, para el aprovechamiento de biogás en zonas rurales de Colombia**

Lady Valentina Riveros Pérez

11231717018

**Universidad Antonio Nariño**

Programa Ingeniería ambiental

Facultad de Ingeniería Ambiental e ingeniería civil

Bogotá D.C., Colombia

2021

**Construcción de un biorreactor a escala de laboratorio de 20L para el cultivo de microalgas, que permita la fijación de CO<sub>2</sub>, empleando materiales de bajo costo y fácil acceso, para el aprovechamiento de biogás en zonas rurales de Colombia**

**Lady Valentina Riveros Pérez**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Ingeniera Ambiental**

Directores:

Juan Daniel Valderrama Rincón Ph.D.

Iván Alejandro Ávila León Ph.D

Línea de Investigación:

Ingeniería de bioprocesos, Proyecto UAN-TGI fase II

Grupo de Investigación GRESIA

**Universidad Antonio Nariño**

Programa Ingeniería Ambiental

Facultad de Ingeniería Ambiental e ingeniería civil

Bogotá D.C., Colombia

2021

**NOTA DE ACEPTACIÓN**

El trabajo de grado titulado  
\_\_\_\_\_, Cumple  
con los requisitos para optar  
Al título de \_\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_  
Firma del Tutor

\_\_\_\_\_  
Firma Jurado

\_\_\_\_\_  
Firma Jurado

Ciudad, Día Mes Año.

## Contenido

Resumen.....	15
Abstract.....	16
Introducción.....	17
Objetivos .....	22
Objetivo general .....	22
Objetivo Específicos.....	22
Marco teórico .....	23
Aguas residuales (AR) como sustrato de procesos biológicos anaerobios.....	23
Biogás como alternativa energética.....	26
Métodos para la eliminación CO <sub>2</sub> en la purificación del biogás .....	27
Métodos Físicos, químicos y físico-químicos.....	27
Métodos Biológicos.....	30
Micro algas, campos de aplicación y su relación con la limpieza del biogás .....	30
Biofijación de CO <sub>2</sub> mediante micro algas.....	32
Sistemas para la eliminación de nutrientes y acumulación de biomasa microalgal en el tratamiento de AR .....	35
Estanque de algas de alta tasa (HRA) .....	35
Estanque alga bacteria de alta tasa (HRAP) .....	36
Estanques de canalización abierta .....	36

Estanques abiertos de maduración/oxidación .....	37
Fotobiorreactores (FBR).....	39
FBR de tanque vertical .....	39
FBR Horizontales.....	42
FBR en espiral .....	43
Bolsas de polietileno.....	45
Uso de microalgas en la refinera del biogás y su contribución en la economía circular .....	46
Estado del conocimiento.....	47
Evaluación de la tasa de biofijación máxima de CO <sub>2</sub> por <i>Chlorella vulgaris</i> a condiciones variables de aireación y CO <sub>2</sub> .....	47
Remoción de CO <sub>2</sub> del biogás con <i>N. gaditana</i> : Estudio de atmósferas inhibitorias con CH <sub>4</sub> y CO <sub>2</sub> variable, cultivo en FBR continuo y conjunto FBR continuo-UTM.....	50
Cultivo de <i>Chlorella sp</i> con longitud de onda de luz, intensidad luminosa y fotoperiodo variable para la remoción de CO <sub>2</sub> del biogás, aprovechando simultáneamente lodos de un reactor anaerobio como fuente de nutrientes .....	55
Efectos de la alcalinidad y relación líquido/gas variable en la remoción de CO <sub>2</sub> del biogás mediante el cultivo de un consorcio alga-bacteria en un FBR tubular horizontal semi-cerrado .....	59
Respuesta de una estrategia de control automatizada basada en el caudal de reciclaje del líquido para la mejora del biogás ante pHs y afluentes gaseosos de composición variable, evaluada en un FBR tipo HRAP + Columna de absorción .....	63
Metodología .....	68
Estructura de soporte del FBR.....	69

Suministro de luz.....	75
Preparación del inóculo.....	75
Sistema de salida del gas .....	77
Sellos de entrada y salida del gas y del líquido .....	79
Generación de CO <sub>2</sub> .....	85
Montaje del reactor en Batch .....	90
Montaje y operación del reactor en continuo .....	92
Resultados y discusión de resultados .....	100
Diseño y construcción.....	100
Análisis de muestras .....	106
Conclusiones.....	120
Recomendaciones .....	122
Referencias.....	125
Anexos .....	135
Anexo 1: Plano estructura de soporte .....	135
Anexo 2: Código de programación del arduino UNO para el control de las bombas de dosificación de líquido y gas .....	137
Anexo 3: Presupuesto.....	138
Anexo 4: Artículo científico .....	140

## Lista de figuras

Figura 1. Modelo simplificado del mecanismo de concentración de CO <sub>2</sub> (MCC) en cianobacterias y micro algas.....	33
Figura 2. Principales procesos en estanques de estabilización de AR.....	38
Figura 3. Esquema de un FBR tubular casi horizontal.....	43
Figura 4. Esquema de un FBR tubular en espiral.....	44
Figura 5. Parámetros de diseño y operación investigación Anjos y colaboradores ( 2013).....	48
Figura 6. Parámetros de operación etapa 1 y 2 investigación Rivas & Jeison (2014).....	52
Figura 7. Parámetros de operación etapa 3 investigación Rivas & Jeison (2014).....	53
Figura 8. Parámetros de operación etapa uno y dos, investigación Yan y colaboradores (2016).....	57
Figura 9. Parámetros de operación del FBR Marín y colaboradores (2019).....	61
Figura 10. Parámetros operativos de la investigación Rodero y colaboradores (2020).....	65
Figura 11. Primer modelo de la estructura de soporte del FBR.....	70
Figura 12. Segundo modelo de la estructura de soporte del FBR .....	71
Figura 13. Segundo modelo de la estructura de soporte, bolsa de polipropileno y primer sello de suministro de gas.....	72

Figura 14. Modificaciones finales en las curvas del modelo dos de la estructura de soporte del FBR y primeros modelos de sellos de suministro y salida de gas.....	73
Figura 15. Configuración final de la estructura de soporte del FBR.....	74
Figura 16. Estructura de soporte final e instalación preliminar del FBR.....	74
Figura 17. Configuración del suministro de luz del FBR.....	75
Figura 18. FBR tipo airlift de 2.2L para la preparación del inóculo.....	76
Figura 19. Primer modelo del sistema de salida de gas.....	77
Figura 20. Modificación del primer modelo del sistema de salida de gas.....	78
Figura 21. Modelo final del sistema de salida de gas del FBR.....	79
Figura 22. Segundo modelo de sello.....	80
Figura 23. Tercer modelo de sello.....	81
Figura 24. Configuración final del sello de suministro de gas.....	82
Figura 25. Configuración final de los sellos de suministro de líquido y salida de gas.....	83
Figura 26. Configuración final del sello de salida del líquido.....	84
Figura 27. Etapa uno y dos del sistema sifón.....	85
Figura 28. Jeringa de muestreo de CO <sub>2</sub> .....	87
Figura 29. Medidor volumétrico de CO <sub>2</sub> .....	88
Figura 30. Ajuste preliminar a la toma de muestras de CO <sub>2</sub> en el medidor volumétrico.....	89
Figura 31. Protocolo para muestras líquidas.....	90
Figura 32. Montaje inicial de FBR en Batch.....	91



Figura 33. Montaje final del FBR en Batch.....	92
Figura 34. Módulo electrónico y componentes externos.....	93
Figura 35. Instrumentos de medición de volumen durante las pruebas de las bombas peristálticas.....	94
Figura 36. Ensayo uno y dos del montaje para suministro de CO <sub>2</sub> del sistema continuo.....	96
Figura 37. Conexiones hidráulicas del sistema operado en continuo.....	97
Figura 38. Recipiente de almacenamiento del líquido de salida del sistema continuo.....	98
Figura 39. Montaje final del FBR operado en continuo.....	99
Figura 40. Relación pH vs Tiempo (d).....	108
Figura 41. Cambio de la absorbancia vs Tiempo (d).....	111
Figura 42. Operación FBR en Batch.....	113
Figura 43. Comportamiento volumen de CO <sub>2</sub> en la muestra (mL) vs Tiempo (d) durante la operación en Bach.....	114
Figura 44. Monitoreo visual del FBR durante la operación en Batch.....	115
Figura 45. Operación FBR en continuo.....	116
Figura 46. Comparación volumen de CO <sub>2</sub> en la muestra (mL) vs Tiempo (d) durante la operación en continuo.....	117
Figura 47. Monitoreo visual del FBR durante la operación en continuo.....	119

### Lista de tablas

Tabla 1. Registro de proyectos de generación de biogás a mayor escala en Colombia.....	18
Tabla 2. Investigaciones para la generación de biogás en Colombia 2014 -2020.....	19
Tabla 3. Parámetros de diseño investigación Rivas & Jeison (2014).....	51
Tabla 4. Parámetros de diseño etapa uno y dos, investigación Yan y colaboradores (2016)....	56
Tabla 5. Parámetros de diseño general del FBR Marín y colaboradores (2019).....	60
Tabla 6. Parámetros de diseño general investigación Rodero y colaboradores (2020).....	64
Tabla 7. Materiales generales en la construcción de los diferentes componentes del FBR.....	68
Tabla 8. Análisis de la temperatura (°C) durante la operación del FBR.....	106

### Lista de símbolos y abreviaturas

AC: Anhidrasa Carbónica

AGV: Ácidos Grasos Volátiles

AR: Agua residual

CI: Carbono inorgánico

CID: Carbono Inorgánico Disuelto

DBO: Demanda Biológica de Oxígeno

DQO: Demanda Química de Oxígeno

FBR: Fotobiorreactor

FNCE: Fuente no convencional de energía

GEI: Gases Efecto Invernadero

G/L: Relación Gas/ Líquido

HRA: Estanque de Alga de Alta Tasa

HRAP: Estanque Alga-Bacteria de Alta Tasa

L/G: Relación Líquido/ Gas

MCC: Mecanismo de concentración de CO<sub>2</sub>

MO: Materia orgánica

N-NH<sub>3</sub>: Nitrógeno amoniacal

NT: Nitrógeno Total

OD: Oxígeno Disuelto

PH: Potencial de hidrógeno

ppm: partes por millón

PT: Fósforo Total

Q: Caudal

SSV: Sólidos Suspendidos Volátiles

TRH: Tiempo de Retención Hidráulico

UTM: Unidad de Transferencia de Masa

*Este proyecto de investigación representa el fundamento por el cual tomé la decisión de estudiar ingeniería ambiental, pues reúne mi amor por la ciencia y una forma, por mínima que parezca, de dignificación social.*

*Por estos motivos dedico mi compromiso y esfuerzo a Dios, por darme capacidad para pensar, sistemas para entender y por renovar mis fuerzas para seguir a diario. A mis padres, mis abuelos y mi hermano, por su amor, compromiso y paciencia con mi formación personal, académica y profesional.*

## **Agradecimientos**

Agradezco a la Universidad Antonio Nariño por abrir sus puertas y acompañar mi formación profesional como ingeniera ambiental, así como a cada uno de mis docentes, por darme las herramientas para desarrollar este proyecto de investigación. A mis tutores Juan Daniel Valderrama Rincón e Iván Alejandro Ávila León por su paciencia, experiencia, enseñanza y en general su presencia en la totalidad de este proyecto. Al profesor Andrés Julián Martínez Rojas por su orientación en procesos estructurales, de muestreo y montaje; y finalmente a mis compañeros de la línea de investigación Ingeniería de bioprocesos, Nixón Darío Alfonso Pachón, Edgar David Africano Camargo y Jhersson Dulvier Castaño Rodríguez por su apoyo y disposición al compartir sus conocimientos en las áreas de química y mecatrónica.

## Resumen

Actualmente en Colombia gran parte del desabastecimiento del servicio domiciliario de gas natural se concentra en el sector rural, por lo que el uso de leña, carbón o residuos agrícolas para cocción es una práctica habitual que cada vez ocasiona mayores afectaciones ambientales y enfermedades respiratorias; el uso de biocombustibles como el biogás es una alternativa de aprovisionamiento para el sector, partiendo de su vocación agraria y generación de residuos agrícolas, así como la viabilidad energética y económica del biogás. El objetivo principal de este proyecto fue construir un fotobiorreactor a escala de laboratorio de 20L para el cultivo de microalgas, que permita la fijación de CO<sub>2</sub>, empleando materiales de bajo costo y fácil acceso, esto con la finalidad de proponer tecnologías alternativas para la limpieza y aprovechamiento de este biocombustible en zonas rurales de Colombia. El proceso de diseño, construcción, delimitación de materiales e incluso la toma de muestras tuvo un enfoque iterativo, con el propósito de identificar las condiciones finales idóneas del sistema. De ahí, se elaboró, operó y evaluó un fotobiorreactor tubular horizontal con una ligera pendiente entre niveles provista por las curvas de conexión y distribución volumétrica 50% mezcla de aire-CO<sub>2</sub> y 50% medio de cultivo líquido; Durante su puesta en marcha final, el fotobiorreactor demostró una tendencia de crecimiento celular en el tiempo y remoción periódica de CO<sub>2</sub>, sin embargo presentó condiciones de mezcla deficientes, lo que limitó el aprovechamiento del CO<sub>2</sub> por parte de las microalgas, además una fuga que impidió la cuantificación exacta de remoción de CO<sub>2</sub>.

## Abstract

Currently in Colombia, much of the shortage of natural gas domestic service is concentrated in the rural sector, so the use of firewood, coal or agricultural waste for cooking is a common practice that increasingly causes greater environmental impacts and respiratory diseases; the use of biofuels such as biogas is an alternative supply for the sector, based on its agricultural vocation and agricultural waste generation, as well as energy and economic workable of biogas. The main objective of this project was to construct a 20L laboratory-scale photobioreactor for the cultivation of microalgae, which allows the fixation of CO<sub>2</sub>, using low-cost and easily accessible materials, with the purpose of proposing alternative technologies for the cleaning and use of this biofuel in rural areas of Colombia. The process of design, construction, material delimitation and even sampling had an iterative approach, with the aim of delimiting the ideal end conditions of the system. A horizontal tubular photobioreactor with a slight slope between levels provided by the connection curves and volume distribution of 50% air-CO<sub>2</sub> mixture and 50% liquid culture medium was developed, operated and evaluated; During its final start up, the photobioreactor showed a trend of cellular growth over time and periodic removal of CO<sub>2</sub>, however, it presented poor mixing conditions, which limited the utilization of CO<sub>2</sub> by the microalgae, as well as a leakage that prevented the exact quantification of CO<sub>2</sub> removal.



## Introducción

El objetivo de desarrollo sostenible 7: Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna presenta en la actualidad varios retos para su cumplimiento. Estimaciones refieren que la generación de energía es el sector de mayor contribución en la emisión de gases efecto invernadero, del mismo modo 13% del total de la población aún no tiene acceso a servicios modernos de electricidad, 3000 millones de personas emplean madera, carbón o residuos agrícolas para cocinar y calentar la comida y tan solo el 17.5% del consumo final de energía mundial fue provista por fuentes renovables en 2015 (ONU, 2021). Por tanto, son contundentes dos aspectos: suministro descentralizado, en especial para abastecer comunidades en condición de vulnerabilidad y una transición al uso mayoritario de fuentes no convencionales de energía (FNCE) (Pabuena & Pasqualino, 2014).

Entre 1990 y 2009 el uso de FNCE representó tan solo el 21.38% de la oferta total, distribuyéndose de la siguiente manera: 9.46% hidroeléctrica, 7.10% madera, 4.59% pulpa de caña de azúcar, 0.013% energía eólica, 0.08% biodiesel y 0.14% bioetanol (Pabuena & Pasqualino, 2014). De lo anterior se identificó una participación significativa de la madera y la ausencia de biogás en la distribución porcentual.

La situación actual del biocombustible en Colombia fue descrita por Pabuena & Pasqualino (2014) quienes indican que la generación de biogás se ha limitado principalmente a la implementación de biodigestores domésticos en el sector rural, los cuales se han desarrollado de manera gradual, por iniciativa de los usuarios en su mayoría y con deficiente

apoyo institucional. No obstante, el reciente progreso del cultivo de palma y el tratamiento de sus aguas residuales industriales ha impulsado la implementación a mayor escala de estos proyectos; la tabla 1 presenta un compilado de algunos de ellos a nivel nacional, aclarando que tan solo tres se han reportado dentro de los Mecanismos de desarrollo limpio.

**Tabla 1**

*Registro de proyectos de generación de biogás a mayor escala en Colombia*

Proyecto nombre o localización	Descripción	Referencias
Palmeras del llano	Planta de extracción de aceite de palma. Biodigestor hormigón, 750 m3 de capacidad. Aplicación biogás para la generación de electricidad. Instalado en 1987.	Conil, 2009
Palmar Santa Helena	Planta de extracción de aceite de palma. Biodigestor hormigón, 500 m3 de capacidad. Aplicación biogás para la generación de electricidad. Instalado en 1991.	Conil, 2010
Palmeiras	Planta de extracción de aceite de palma. Carpa cubierta laguna, 7000 m3 de capacidad. Aplicación del biogás para la generación de electricidad. Instalado en 1999.	Conil, 2011
Cali	Proyecto MDL: Autogeneración de biogás como energía renovable en la planta de tratamiento de aguas residuales de Cañaveralaje de EMCALI.	*MDL, UNFCCC, 2009
Cali	Proyecto MDL: Recuperación y combustión de metano en el tratamiento de lodos existente sistema de la planta de tratamiento de aguas residuales de Cañaveralaje de EMCALI.	*MDL, UNFCCC, 2009
Pasto	Proyecto MDL: Construcción, operación y mantenimiento de sistemas de colección y quema de biogás en el relleno sanitario Antanas	*MDL, UNFCCC, 2009
Puerto Leguizamo (Putumayo)	Planta piloto de biogás para generación de energía	MME, 2010
San Carlo De Guaroa (Meta)	Aceites manuelita, 2 biodigestores de 19.000 m3 de capacidad, procesa 300.000 Ton/año de material, aplicación en la planta de biodiesel	Biotec, 2013
Sabana de Torres (Santander)	Oro Rojo, Grupo Indupalma, biodigestores de 16.000 m3 de capacidad, procesa 150.000 Ton/año de material, sin aplicación (tea).	Biotec, 2013

*Nota.* \*MDL: mecanismo de desarrollo limpio; UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change. Tomado de “*Potencial de Uso de Biogás en Colombia Potential Uses of Biogas in Colombia*” (p. 29), por M. A. Pabuena & J. Pasqualino, (2014), Teknos.

Por otra parte, la investigación ha sido un contribuyente análogo del sector; La tabla 2 agrupa algunas de las más recientes producciones académicas orientadas a la generación de biogás en Colombia durante el periodo 2014-2020.

**Tabla 2***Investigaciones para la generación de biogás en Colombia 2014 -2020*

Localización	Título y/o descripción	Referencias
Bucaramanga, Finca Tosoly	Producción de biogás a partir de estiércol porcino a escala piloto: caso de estudio biorreactor continuo tabular de plástico (BCTP)	(Bayona Paez & Steek, 2015)
Manizales	Biodigestores que emplean residuos de poda para la producción de metano a bajo costo, desarrollado por investigadores de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.	(González, 2016)
Tibana (Boyacá)	Implementación de un biodigestor para el aprovechamiento de los residuos de las granjas porcinas en el municipio de Tibana	(López et al., 2017)
Bogotá	Proyecto realizado por la Universidad Nacional de Colombia; consiste en el diseño y construcción de un biodigestor para la producción de biogás a partir de heces caninas.	(Rodríguez Pachón & García Cepeda, 2017)
Bucaramanga	Investigación desarrollada por la universidad de Santander; consistió en la generación y aprovechamiento energético de biogás a partir de residuos de una granja ganadero – avícola	(Mantilla Suárez, 2017)
Vereda Santa Bárbara, Íquira-Huila	Proyecto realizado por la Universidad del Bosque en la Finca "las delicias"; consistió en la construcción de un biodigestor para estimación del potencial energético a partir de bovinaza.	(Cedeño, 2019)
Bogotá	Evaluación del potencial energético que tendría la fracción orgánica de los residuos sólidos orgánicos (Forsu) -como los desechos domésticos de alimentos y los residuos de la cosecha de banano y plátano- para producir biogás y metano	(Hernández, 2020)

El biogás es una fuente renovable de energía a un precio asequible y su viabilidad se incrementa al aplicarlo en áreas rurales, debido a su vocación agraria y generación de residuos biodegradables. Shah y col. (2021) mencionaron que 1 m<sup>3</sup> de biogás corresponde a 6 kW/h de energía, de los cuales 2kW/h se convierten en electricidad usando generadores y 4 kW/h se

recobran en forma de energía térmica durante la producción de electricidad; además, las plantas de biogás generan abono, un producto de interés comercial debido a sus propiedades en la fertilización del suelo.

El uso directo del biogás como biocombustible es ineficiente, lo que implica su conversión en biometano a partir de la eliminación de sus contaminantes, siendo el CO<sub>2</sub> el de mayor proporción. Actualmente se emplean múltiples tecnologías comerciales para eliminar el CO<sub>2</sub> del biogás, entre estas el lavado con agua, absorción/depuración de aminas, depuración/sorción de disolventes orgánicos, separación por membranas, entre otras., las cuales a pesar de su eficiencia, son costosas y contaminantes, por lo que la generación de métodos efectivos y sostenibles representa un desafío emergente (Zhou et al., 2017).

El uso de micro algas en los procesos de biorrefinería del biogás es una alternativa de interés para la remoción de CO<sub>2</sub> por fijación, debido a su acelerada tasa de crecimiento, facilidad de adaptación a condiciones medioambientales y cultivo a precios accesibles (Meier et al., 2015). Por esto el presente proyecto de investigación pretende diseñar, construir y evaluar un fotobiorreactor (FBR) para el cultivo de micro algas, que permita la fijación de CO<sub>2</sub>, empleando materiales de bajo costo y fácil acceso. Así mismo propone una alternativa de solución ante el desabastecimiento del servicio público domiciliario de gas natural en los sectores rurales del territorio nacional, el cual afecta alrededor de 1.600.000 hogares colombianos que aún emplean leña para cocinar, los cuales en múltiples ocasiones han presentado afectaciones pulmonares serias debido a exposiciones prolongadas a gases de combustión (Aristizábal Hernández, 2014).

El proyecto corresponde a la fase I del prototipo de un sistema de limpieza de biogás y hace parte del convenio UAN-TGI Fase II, por lo que una vez las fases se concluyan, se escalará y aplicará en un colegio veredal de Puerto Boyacá, lo que resulta de interés ya que Boyacá es el segundo departamento con mayor desabastecimiento de gas natural a nivel nacional (La república, 2020). Finalmente, además de los beneficios técnicos alusivos a la reducción en el consumo de combustibles fósiles y emisión de GEIs a la atmósfera, brinda un modelo sencillo y con materiales de fácil acceso para la intervención pedagógica con los miembros de la institución.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Construir un fotobiorreactor a escala de laboratorio de 20L para el cultivo de micro algas, que permita la fijación de CO<sub>2</sub>, empleando materiales de bajo costo y fácil acceso, esto con la finalidad de proponer tecnologías alternativas para el aprovechamiento de biogás en zonas rurales de Colombia.

### **Objetivo Específicos**

1. Diseñar un fotobiorreactor de 20 L empleando materiales de bajo costo y fácil acceso
2. Construir el fotobiorreactor diseñado.
3. Probar y evaluar la eficiencia de remoción de CO<sub>2</sub> del biorreactor construido.

## Marco teórico

### **Aguas residuales (AR) como sustrato de procesos biológicos anaerobios**

En la actualidad, la generación de aguas residuales (AR) deriva del desarrollo de diferentes actividades antropogénicas y de manera general se categorizan en industriales y municipales. Goswami y col. (2021) describen dicho residuo contemplando el sector agrícola, de base animal, industrial y municipal, tal como se enuncia a continuación.

- **AR del sector agrícola**

Son generadas tras la utilización del agua por irrigación y poseen un elevado contenido de sustancias químicas como fertilizantes, pesticidas, entre otras, usadas habitualmente como promotores de crecimiento vegetal. Análogamente dentro de la categoría de los pesticidas, se encuentran otros compuestos como: reguladores de crecimiento vegetal, herbicidas, nematicidas, insecticidas, rodenticidas y otro tipo de antibióticos para la protección contra patógenos. En efecto la presencia de pesticidas en suelos y aguas, genera impactos ambientales altamente nocivos, puesto que tiene efectos inhibitorios para el crecimiento y buen desarrollo de fauna y flora.

Referente a las AR de base animal, consideraron la industria láctea, porcina y acuícola, contemplando la siguiente descripción.

- **AR de la industria láctea**

Se considera un sector emergente a nivel mundial, sin embargo durante su cadena productiva demanda altas cantidades de agua con diversos propósitos. Estudios sugieren que para el año 2010 se produjeron alrededor de 110 millones de toneladas de leche y 275 millones de toneladas de aguas residuales anualmente. Se compone por diferentes fuentes de carbono, grasas sólidas, proteínas, detergentes, agentes sanitizantes, NT y PT; además tiene DQO y DBO de rango de (85-95000 ppm) y (40-48000 ppm), respectivamente.

- **AR de la cría porcina**

Es la segunda industria cárnica emergente luego de la avicultura. De ahí, estadísticas indican que para 2018 se produjeron 118.8 millones de toneladas de puerco mundialmente, lo que generó una importante demanda de agua para limpieza y consumo, y por ende altas tasas de producción de AR en dicha industria. Se compone principalmente de hormonas, antibióticos veterinarios, excrementos y orina. Tiene DBO de rango de (2000-30 000 ppm), DQO (3000 -15 000 ppm), NT (600 – 2100 ppm), NH<sub>3</sub>-N (400-1400 ppm) y PT (100-250 ppm). Finalmente, debido a sus elevados contenidos de amoníaco, pueden genera toxicidad grave para animales acuáticos y terrestres.

- **AR de la industria acuícola**

Cerca del 47% de la comida es provista por este sector a nivel mundial, por tanto la acuicultura demanda altas cantidades de agua para el cultivo de peces y produce elevadas cantidades de AR. Se compone por carbono orgánico, Sólidos suspendidos totales (7- 54 000



ppm), NH<sub>3</sub>-N (6 – 42 ppm), NT, PT, DQO y DBO (27-35 000 ppm), generado principalmente por alimentos restante, residuos metabólicos y fertilización de peces en estanques.

- **AR industriales**

Estas representan en gran manera el crecimiento económico global actual, por tanto, demandan elevadas cantidades de agua, principalmente con fines de enfriamiento, producción y limpieza; además, poseen altas cantidades de nutrientes y de compuestos tóxicos.

Regularmente, los procesos industriales de comida contienen altos niveles NT, PT, DQO y DBO. Mientras que las AR provenientes del lavado textil albergan elevados contenidos de color, salinidad, DQO y Sólidos disueltos totales; según estimativos, de 72 compuestos tóxicos que pueden albergar, 30 son de difícil remoción en procesos de tratamiento. La inadecuada gestión de las AR de esta industria, genera importantes impactos ambientales en humanos, animales terrestres y acuáticos. Además, la presencia de metales tóxicos puede generar alergias, irritación en la piel y efectos cancerígenos en humanos.

- **AR domésticas**

Son generadas por procesos de urbanización y en la actualidad, son las mayores productoras de AR mundialmente; además, albergan gran parte de las AR de las pequeñas industrias y las no estructuras. Se componen principalmente por fármacos, heces fecales, bacterias patógenas, fertilizantes, detergentes, residuos domésticos no tratados, sólidos gruesos, tejidos vegetales y animales, metales pesados, sales, entre otras. Por lo que su caracterización física, química y microbiológica puede variar.

De lo anterior, se identifica que las AR son ricas en compuestos orgánicos; por tanto, Xu y col. (2021) mencionan que en la gestión de las AR es posible emplear procesos biológicos de tipo anaerobio, en los cuales asociaciones simbióticas bacterianas en medios con ausencia de oxígeno generan biogás y biomasa a partir de la degradación de MO mediante cuatro etapas: hidrólisis, acidogénesis, acetogénesis y metanogénesis.

Durante la acidogénesis, las bacterias anaerobias facultativas convierten los metabolitos generados durante la hidrólisis en AGVs y análogamente producen gases como H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S y CO<sub>2</sub>. En la acetogénesis se transforman los productos intermedios en ácido acético, CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>. En la etapa concluyente de la metanogénesis, se puede generar metano bajo dos alternativas: primero, el H<sub>2</sub> y el CO<sub>2</sub> producen metano por la acción de los metanógenos hidrógeno trófico y la segunda, mediante metanógenos acético elásticos se genera metano a partir de ácido acético. Usualmente, cerca del 30% de los compuestos de metano del biogás se generan a través de la metanogénesis hidrógeno trófica, sin embargo dicha proporción puede incrementarse al 40-90% cuando hay una inyección directa de hidrógeno en el biorreactor (Xu et al., 2021).

### **Biogás como alternativa energética**

El uso de biogás como combustible ha capturado interés durante los últimos años principalmente por su contribución en la disminución de GEI, costo de remediación sustancial, obtención de beneficios económicos importantes, contenido energético elevado y explotación (Zhou et al., 2017). Además, es producto de tratamientos biológicos anaerobios de AR o el

desarrollo de actividades como compostaje, vertederos no controlados y digestión anaerobia de lodos de depuradoras, industrias agroalimentarias, estiércol, etc., todos procesos en la gestión de residuos. Su composición varía de acuerdo a su actividad de origen, sin embargo posee de 45 a 70% de CH<sub>4</sub>, 20 a 55% de CO<sub>2</sub> y otros gases, siendo del 0 al 3% N<sub>2</sub>, 0 al 1% O<sub>2</sub>, 1 al 10% vapor de agua, 0 a 10 000 ppm H<sub>2</sub>S, de 0 a 100 ppm amoníaco, así como trazas de hidrocarburos, siloxanos y cloro (Bose et al., 2019).

### **Métodos para la eliminación CO<sub>2</sub> en la purificación del biogás**

Uno de los contaminantes presentes en mayor proporción en el biogás es el CO<sub>2</sub>, por lo que su refinación implica la extracción del mismo; a continuación se describen en detalle.

#### ***Métodos Físicos, químicos y físico-químicos***

Según Bose y col. (2019) los métodos químicos incluyen la absorción con disolventes o carbonatación natural, mientras que las técnicas físicas el uso de membranas, adsorción por cambio de presión, separación criogénica, entre otras alternativas. Pese a que la mayor parte de estas tecnologías se usan comercialmente, continúan sufriendo una penalización energética (3-6% del contenido energético del biogás) y costos elevados (hasta el 30% del costo total del biogás limpio).

Zhou y col. (2017) refieren algunas de las tecnologías documentadas basadas en procesos de sorción y separación para la mejora del biogás, las mismas se describen a continuación:

- **Lavado de agua:** el biogás crudo se introduce por el fondo de la torre de adsorción a 6-10 bares y alrededor de 40°C, capturando así el CO<sub>2</sub> en el fluido líquido.
- **Absorción/depuración de aminas:** usa precisamente aminas para la absorción de gas ácido, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, etc., es la tecnología de absorción actual de mayor uso, empleando medios líquidos.
- **Depuración/sorción de disolventes orgánicos:** es similar al proceso de depuración con agua, con la diferencia de que la solubilidad del CO<sub>2</sub> en el disolvente orgánico es superior que en el agua alrededor de cinco veces.
- **Separación por membranas:** se emplean filtros de membrana densos, los cuales logran capturar el metano y permiten que el CO<sub>2</sub> los atraviese.
- **Solventes sólidos:** el sólido retiene el CO<sub>2</sub> normalmente en su superficie lisa o porosa.

Finalmente, entre los principales materiales alternativos se encuentra el uso de alcohol amina líquida, alcohol amina sólida: adsorbente impregnado de amina y adsorbente injertado con amina, adsorbentes de zeolita, adsorbentes carbonosos: carbón activado y carbono mesoporoso ordenado, grafeno y nanotubos de carbono, adsorbentes de estructura metal-orgánico, estructuras de imidazolato zeolita, membranas: poliméricas, inorgánicas, de tamices moleculares de carbono y nanoporosas.

Abd y colabores (2021) mencionan dos tecnologías adicionales, separación criogénica y adsorción por oscilación de presión. La separación criogénica opera bajo el principio de que cada gas se licúa en rangos de presiones y temperaturas determinadas; básicamente el biogás se enfría y se comprime a temperaturas y presiones específicas para así licuar el CO<sub>2</sub>. Por otra parte, en la adsorción por oscilación de presión se logra la adsorción específica del CO<sub>2</sub> en la superficie adsorbente correspondiente a su química de superficie y tamiz molecular. Estudios demuestran que esta última, presenta una importante viabilidad económica y tecnológica en procesos de refinería de metano, comparado con los procesos alternativos de oscilación (adsorción por oscilación de temperatura y adsorción por oscilación eléctrica).

## **Métodos Biológicos**

La literatura menciona principalmente el uso de microorganismos fotosintéticos como cianobacterias y micro algas debido a su capacidad de biofijación otorgada por el mecanismo de concentración de CO<sub>2</sub> (MCC), algunos de estos ejemplares refieren a: uso de cianobacterias *Anabaena sp. ATCC 33047*, la cual alcanza una tasa máxima de fijación de CO<sub>2</sub> de 1,45 g CO<sub>2</sub>/ L día y tiene capacidad de aumento hasta de 3,0 g CO<sub>2</sub>/ L día al aire libre (González López et al., 2009), cultivo conjunto micro alga-bacteria endofítica, caso particular de aislamiento de bacterias S395-1 y S395-2 y *C. Vulgaris*, cuya eficiencia de remoción final fue de 88.29%, 88.31%, 88.21% y 68.13% en DQO, NT, PT y CO<sub>2</sub>, respectivamente (Xu et al., 2020), co-peletización de micro algas y hongos, tal es el caso de la mejora de las condiciones de granulación de *C. Vulgaris* con *G. lucidum* para el aumento en la eficiencia de purificación de biogás y lodos provenientes de un reactor anaerobio, logrando eficiencias de eliminación máximas de 92,17%, 89,83%, 90,31% y 74,26%, para DQO, TN, TP y CO<sub>2</sub>, respectivamente (Zhao et al., 2019).

### **Micro algas, campos de aplicación y su relación con la limpieza del biogás**

Las micro algas, debidos a su capacidad de fijación de CO<sub>2</sub> y a su eficiencia fotosintética representan una alternativa de alto interés en la purificación del biogás. Son microorganismos fotosintéticos eucariotas o procariotas, pueden crecer de manera acelerada y bajo condiciones difíciles debido a que poseen una estructura multicelular simple o en ocasiones unicelular (Martins et al., 2009). Actualmente se utilizan en campos como la

medicina, productos sanitarios, piensos, combustibles e incluso en el tratamiento de diferentes tipos de AR, debido a su facultad de bioacumulación, biodegradación y bioabsorción; básicamente emplean los nutrientes de las AR para la generación de nueva biomasa, lo que representa un importante reservorio de materia prima para la generación de energía y productos de alto valor agregado (Guo S., 2020).

Meier y col. (2015) enuncian que las microalgas tienen la cualidad de aprovechar la energía solar, elevadas tasas de crecimiento, facilidad de adaptación a diversas condiciones medioambientales y además pueden ser incorporadas al tratamiento de AR, debido a su capacidad para remoción de N y P. Por otra parte, son capaces de eliminar el CO<sub>2</sub> del biogás lo cual genera un incremento en su biomasa, siendo esto último un foco de interés para la producción de biocombustibles como biodiesel, bioetanol e inclusive biogás.

Finalmente, Nagarajan et al (2019) refiere que la integración de los procesos anaerobios en biodigestión y el cultivo de micro algas para la limpieza del biogás tras la captura del CO<sub>2</sub> trae consigo importantes beneficios, entre estos: una alternativa verde para la limpieza de este combustible, captura y uso eficiente de carbono in-situ, producción de biomasa microalgal rica en productos de valor agregado como antioxidantes, lípidos y ácidos grasos poliinsaturados y por último la propiedad del biogás de estar disponible a temperatura ambiente, lo que mitiga la necesidad de un mayor consumo energético durante el cultivo.

## **Biofijación de CO<sub>2</sub> mediante micro algas**

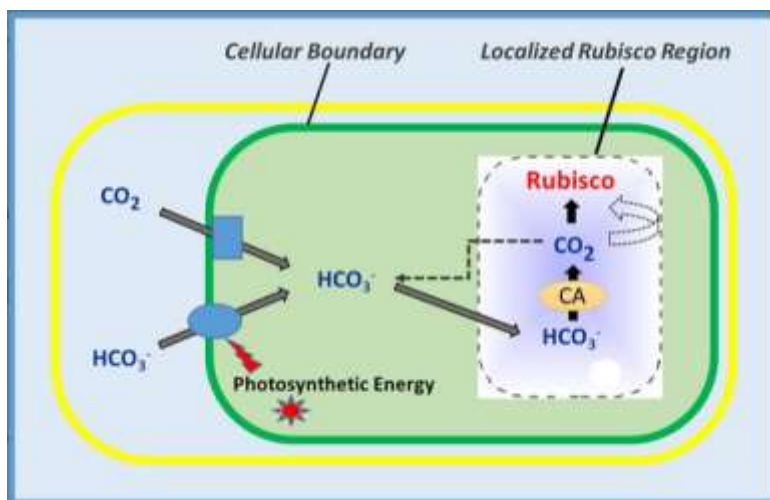
Kassim & Meng (2017) refieren que las micro algas poseen una fijación de emisiones de CO<sub>2</sub> mayor que la de las plantas terrestres, lo que se debe a la presencia de mecanismos de concentración de carbono (MCC) los cuales permiten utilizar y acumular carbón en diferentes concentraciones de CO<sub>2</sub>. De lo anterior se puede hipotetizar que el suministro de CO<sub>2</sub> en el cultivo de micro algas podría promover la fotosíntesis y paralelamente incrementar la tasa de crecimiento microalgal.

Wang y col. (2015) mencionan que el MCC es una estrategia que permite la supervivencia y crecimiento de cianobacterias y micro algas eucariotas aún bajo concentraciones de CO<sub>2</sub> escasas; presentan un modelo simplificado de su operación (ver figura 1) y una descripción de la misma seguido a esto.



Figura 1

Resumen operativo del mecanismo de concentración de CO<sub>2</sub> (MCC) en cianobacterias y micro algas



Nota. Cellular boundary: límite celular; Localized Rubisco Region: Región de localización de Rubisco; Photosynthetic Energy: energía fotosintética. Tomado de "The CO<sub>2</sub> concentrating mechanism and photosynthetic carbon assimilation in limiting CO<sub>2</sub>: How *Chlamydomonas* works against the gradient" (p. 430), por Y.Wang, D.J.Stessman & M. H. Spalding, (2015), *Plant Journal*.

El MCC es una ruta de enriquecimiento de CO<sub>2</sub> basada en una sola célula compuesta por varios sistemas de absorción de carbono inorgánico (CI) energizado. El funcionamiento de dichos sistemas forman CI intracelular en forma de  $HCO_3^-$ , el cual puede representar un aumento de la concentración de hasta 1000 veces en ambientes con limitación de CO<sub>2</sub>, quizás el sistema de captación de CI más eficiente hasta ahora.

A diferencia de la fotosíntesis C<sub>4</sub> en donde el CI entra a las células mayoritariamente por difusión de CO<sub>2</sub>, las microalgas eucariotas y cianobacterias poseen sistemas de captación

para  $\text{CO}_2$  y  $\text{HCO}_3^-$ , cualidad que ha permitido su supervivencia, considerando que estos microorganismos viven habitualmente en escenarios de poco equilibrio en las formas de CI y donde la difusión del  $\text{CO}_2$  es mucho más lenta que en los ambientes terrestres.

Debido a que Rubisco únicamente puede usar  $\text{CO}_2$  como sustrato para la carboxilación, una anhidrasa carbónica (AC) convierte el  $\text{HCO}_3^-$  almacenado en  $\text{CO}_2$ , cerca o en el sitio de Rubisco. Al mismo tiempo, la AC opera con los sistemas de captación de CI en los lugares intracelulares para lograr la conversión entre diferentes especies de CI y así su posterior almacenamiento.

Parte del éxito del sistema se debe a que Rubisco se ubica en un micro compartimiento especializado altamente localizado (carboxisomas en cianobacterias o pirenoides en micro algas eucariotas), el cual posibilita que la concentración de  $\text{CO}_2$  próxima a Rubisco aumente sustancialmente. Además, debido a que el  $\text{CO}_2$  puede liberarse con facilidad de Rubisco, un sistema de barrera de  $\text{CO}_2$  impide generalmente su fuga interna.

Por último, mientras que la fotosíntesis C4 se expresa normalmente de forma constitutiva, el MCC es habitualmente un mecanismo inducible. Allí un grupo de elementos reguladores moleculares cooperan en la detección de la disponibilidad del  $\text{CO}_2$ , así como en la ordenación de la expresión de la MCC en diferentes niveles.

## **Sistemas para la eliminación de nutrientes y acumulación de biomasa microalgal en el tratamiento de AR**

Se clasifican principalmente en: estanques (de algas de alta tasa (HRA), alga bacteria de alta tasa (HRAP), con canales abiertos y abiertos de maduración/ oxidación) y fotobiorreactores (FBR) (de tanque vertical, horizontal, en espiral y bolsas de polipropileno).

### ***Estanque de algas de alta tasa (HRA)***

El HRA puede ser de tipo facultativo o anaerobio, siendo estos últimos los más habituales para la estabilización de residuos. Los anaerobios poseen varios metros de profundidad, ausencia de OD y alta tasa de eliminación de DBO; mientras que los facultativos, presentan condiciones aerobias en la superficie debido a la producción de O<sub>2</sub> fotosintético y anaerobias en el fondo, siendo la configuración más común de los tanques de oxidación. Resultan ser los sistemas de mayor rentabilidad en el tratamiento de residuos líquidos, así como en la captura efectiva de la luz solar, además son pioneros en el tratamiento de las AR de la industria porcina. La generación de biocombustibles, el tratamiento de AR y la generación de biofertilizantes, es considerada como su principal aplicación a corto plazo (5-10 años) (Rawat et al., 2011) .

### ***Estanque alga bacteria de alta tasa (HRAP)***

El HRAP es un estanque de poca profundidad, en donde conviven microalgas fotosintéticas y bacterias heterótrofas en una relación de simbiosis, dicha coexistencia es la base principal de un sistema secundario/ terciario para el tratamiento de AR; cabe resaltar que debido a la liberación de O<sub>2</sub> fotosintético no es necesaria aireación mecánica elevada en los estanques, tan solo ruedas de paleta para agitación leve. Sin embargo, pese a su eficiencia en la eliminación de nutrientes y DBO, presenta dificultades con el equilibrio dinámico entre la emisión de O<sub>2</sub> fotosintético y la respiración bacteriana, atribuido al acceso limitado de luz por aglomeración de biomasa microalgal en la superficie, condiciones climáticas y mezcla inadecuada; por otra parte, la presencia de depredadores microalgales como zooplancton y protozoos, parasitismo fúngico, infección viral e incluso cambios en la estructura celular, como la reducción de clorofila, diversidad y sucesión microalgal son factores incidente en el descenso del crecimiento celular (Rawat et al., 2011). Pese a esto, El Hamouri et al (2003) y Picot et al (1992) mencionan que son sistemas sobresalientes comparados con los estanques facultativos aerobios, anaerobios y alternativos.

### ***Estanques de canalización abierta***

Rawat y col. (2011) mencionan que es un método rentable para el cultivo de microalgas y remoción de nutrientes de AR municipal; debe tener una profundidad máxima de 30 cm para lograr una penetración eficiente de la luz, un techo de invernadero, para maximizar el ingreso de la luz y evitar contaminación por escombros y lluvia y recomiendan inyectar gas de

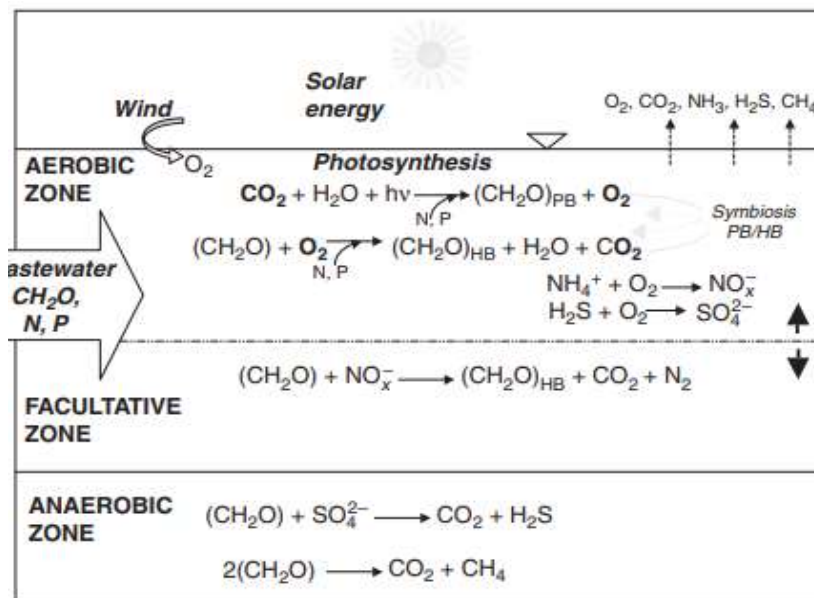
combustión o CO<sub>2</sub> puro, para acelerar la fotosíntesis. Su operación en campo es sencilla y económica, además el sistema en cascada suele ser más eficiente que el sistema de un solo canal debido al incremento en la mezcla y el TRH. La literatura reporta modelos a la venta capaces de producir hasta 0.5 g/L de biomasa en excedencia (Muñoz & Guieysse, 2006), (Grobbelaar, 2007), (Wijffels, 2008), sin embargo la concentración de biomasa continúa siendo baja debido a la deficiencia en la mezcla y a que no logra sostener una zona óptica oscura.

### ***Estanques abiertos de maduración/oxidación***

Brenner & Aharon Abeliovich (2013) mencionan que el modelo permite la degradación de la MO del AR en biomasa microbiana y productos metabólicos finales como H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, amonio, metano, etc. Sus parámetros de diseño son: suministro efectivo de energía, carga orgánica, profundidad del medio acuoso de crecimiento, fluctuaciones estacionales de radiación y temperatura, turbidez, especiación de las algas, depredadores, amoníaco, pH, etc.; se diferencia principalmente por su oxigenación, la cual depende de la fotosíntesis algal en lugar de aireación electromecánica. La figura 2 presenta algunos de sus procesos metabólicos, siendo la degradación de la MO y la nitrificación característica de la zona aerobia, mientras que las reacciones como la desnitrificación, fermentación y respiración anaerobia pueden ejecutarse en zonas no tóxicas.

Figura 2

Principales procesos en estanques de estabilización de AR



Nota. Las reacciones no están balanceadas.  $CH_2O$ : MO; PB: biomasa autótrofa; HB: biomasa heterótrofa. Tomado de "Water Purification: Algae in Wastewater Oxidation Ponds" (p. 596), por A. Brenner & A. Abeliovich, (2013), John Wiley & Sons.

A gran escala, se diseñan en series de dos o tres etapas. La primera es anaerobia, en donde se sedimentan los sólidos en suspensión en pozos profundos (2-4m), dichos sedimentos son degradados por actividad microbiana anaerobia. La segunda es facultativa, con estanques de profundidad (1-2m), prevaleciendo condiciones oxigénicas en el nivel superior y cargas orgánicas más bajas. La tercera, también conocida como estanque de maduración, aerobio, oxidación o de algas, tiene profundidad (< 1m) y una intensa actividad simbiótica de competencia entre algas y bacterias, logrando así la eliminación eficiente de contaminantes y patógenos, debido al calor solar, pH,  $O_2$  y toxinas de las algas; su coloración convencional es

verde, debido a la proliferación de algas y cianobacterias. Normalmente, esta tercera etapa emplea estanques de tierra cubiertos por membranas de plástico impermeables y TRH altos, con la finalidad de incrementar la eficiencia de su tratamiento (Brenner & Aharon Abeliovich, 2013).

### ***Fotobiorreactores (FBR)***

Es un sistema que posibilita el monocultivo de microalgas durante tiempos prolongados y una capacidad en la producción de biomasa elevada, comparado con los estanques de canales abiertos, los cuales son más propensos a fallos operacionales y contaminación por microflora. El FBR tubular es el diseño más común debido a que es un sistema continuo, además pueden ser de tipo horizontal, vertical y en espiral. En operaciones a pequeña escala, son capaces de reducir considerablemente la MO y los nutrientes del afluente con costos energéticos mínimos en FBR solares simples (Rawat et al., 2011) .

### ***FBR de tanque vertical***

SundarRajan y col. (2019) mencionan que existen dos configuraciones principales: columna de burbuja y transporte aéreo (airlift), ambas compuestas normalmente por tubos verticales transparentes los cuales favorecen la recepción de la luz durante la fotosíntesis. Poseen un burbujeo de aire en su base, el cual transforma el gas en una serie de burbujas de menor volumen y mayor cuantía, asegurando así la suspensión de las algas en el medio a partir de la mezcla, así como el aumento de la transferencia de masa gas-liquido, la absorción de CO<sub>2</sub> y liberación de O<sub>2</sub>. Pese a que tiene una relación superficie/volumen baja, logran una

retención del gas mayor comparada con los reactores horizontales, los cuales normalmente contiene caudales líquido gas mayores.

- **FBR vertical tipo columna de burbujas**

SundarRajan y col. (2019) explica que consiste en un recipiente cilíndrico sin ningún tipo de estructura interna, por lo que el movimiento del fluido es llevado a cabo por el burbujeo de la mezcla de gas con un rociador de aire ubicado en la base del sistema. Su configuración convencional es  $\emptyset = 2h$  y suministro de luz a partir de una fuente externa; además, su eficiencia fotosintética se relaciona directamente con la tasa de flujo de gas ( $\geq 0.05$  m/s). Básicamente el fluido se mueve desde la zona oscura central hacia la zona iluminada exterior, generando fotoperiodos de luz: oscuridad menores. Finalmente, se considera que permite la efectiva eliminación de DQO, NT y PT al aplicarlo en el cultivo de microalgas en AR (Zhu et al., 2013), (Maroneze et al., 2014).

- **FBR vertical tipo airlift**

SundarRajan y col. (2019) indican que se puede considerar como la evolución de la columna de burbujas, puesto que simplemente dispone un deflector o tubo de aspiración de más, el cual divide dos zonas vinculadas (ascendente y descendente). En la zona de tubo ascendente, la mezcla de gas es burbujeada para impulsar el líquido hacia arriba asistido por la retención del gas del tubo ascendente, mientras que en la zona del tubo descendente, una parte del gas abandona el líquido y el gas sobrante no liberado es atrapado por el líquido, iluminado y reciclado de nuevo en la zona de tubo ascendente. Básicamente, la diferencia de densidad media entre el tubo descendente y ascendente ocasiona un gradiente de presión, el



cual actúa como fuerza motriz para que la recirculación ocurra. De lo anterior, cabe aclarar que según su morfología les hay de dos tipos:

a) Recipiente de bucle interno (deflectores), en los cuales el tubo ascendente se establece como un tubo concéntrico o cilíndrico dividido, burbujeando precisamente el aire en el interior de este, para que posteriormente se mueva por la zona exterior (zona de tubo descendente) y así, el ciclo del líquido vuelva a la zona ascendente de nuevo.

b) Vasos de bucle externo, en los cuales la circulación se lleva a cabo a través de conductos separados y distintos (es decir, el tubo descendente se coloca fuera del tubo vertical).

Por último, se destaca que el sistema posee una tasa de generación de biomasa en peso seco superior a los FBR tipo columna de burbuja (Sánchez Mirón et al., 2002). Además, que debido al aumento del tiempo de residencia del gas, posee un incremento en la transferencia de masa, calor, mezcla y turbulencia gas-líquido; así como un crecimiento de la eficiencia fotosintética ocasionada por el patrón de mezcla circular el cual genera un efecto de luz intermitente en las células microalgales, es decir una exposición continua a la fase lumínica y oscura (SundarRajan et al., 2019).

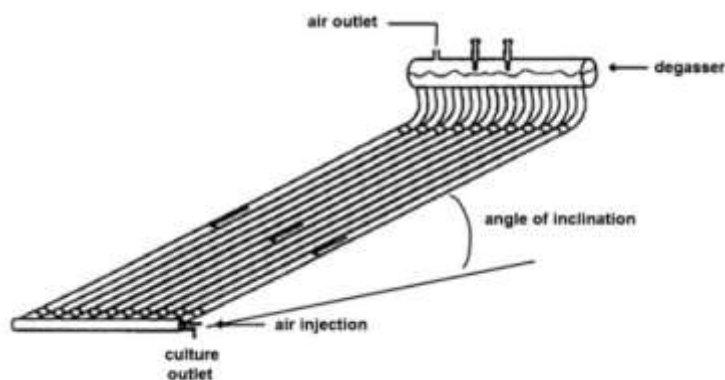
### ***FBR Horizontales***

Wang y col. (2012) lo definen como un sistema con una proporción mayor superficie-volumen comparado con los FBR verticales, debido a su capacidad para emplear diámetros superiores. Además, refieren que poseen una mayor eficiencia para la captura de luz, lo que es una ventaja en el cultivo de micro algas; pese a esto, el incremento del calor interno es una limitante en simultaneo técnica y económicamente, debido a la necesidad de acople de un sistema control de temperatura.

Por otra parte, indican también una mejora de este sistema denominada FBR tubular casi horizontal, la cual se compone por un conjunto de tubos delgados conectados en la parte más baja por un colector que suministra gas comprimido y en la parte más alta por un desgasificador. Básicamente los tubos se colocan en una estructura que mantiene un ángulo entre 6 y 12% (10% habitualmente), dicha configuración permite el incremento del coeficiente de transferencia de gas, TRH y una disminución del tiempo de mezcla. La figura 3 presenta un esquema del sistema.

**Figura 3**

*Esquema de un FBR tubular casi horizontal*



*Nota.* Air outlet: salida de gas, degasser: desgasificador; culture outlet: salida del cultivo; air inject: inyección de aire; angle of inclination: ángulo de inclinación. Tomado de “*Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses*” (p. 909), por B.Wang, C. Q. Lan & M.Horsman, (2012), *Biotechnology Advances*.

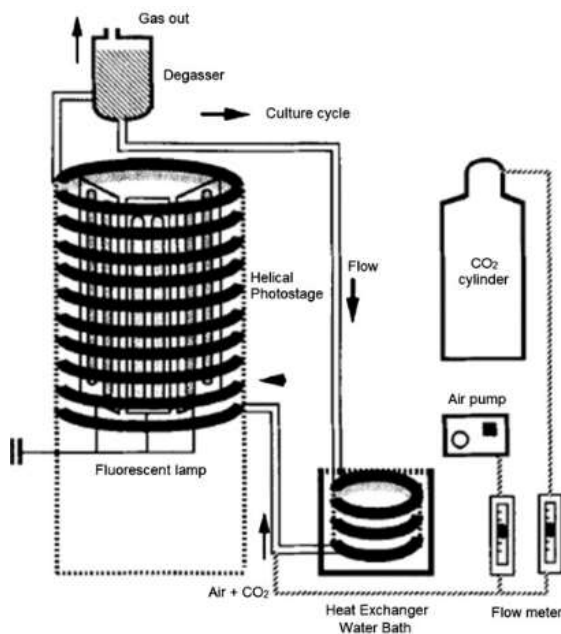
### ***FBR en espiral***

También conocido como FBR helicoidal, es un sistema híbrido del FBR vertical y horizontal (Wang et al., 2012). Wu y colaboradores (2010) mencionan que puesto que integra virtudes de ambos sistemas, se considera como uno de los PBR más promisorios para el cultivo masivo de micro algas debido a su eficiencia en la captura de luz, buenas condiciones de mezcla y productividad de biomasa normalmente alta. Pese a dichos atributos, aún sus aplicaciones industriales a gran escala son bajas, debido principalmente a que presenta

algunos problemas de fotoinhibición generado por altas intensidades de luz y fotolimitación, debido al auto sombreado de las células una vez el sistema se amplia.

**Figura 4**

*Esquema de un FBR tubular en espiral*



*Nota.* Gas out: salida de gas; degasser: degasificador; culture cycle: ciclo del cultivo; flow: flujo; heat exchanger water bath: intercambiador de calor por baño de agua; fluorescent lamp: lámpara fluorescente;

flow meter: medidor de caudal; air pump: bomba de aire; CO2 cylinder: cilindro de CO2.

Tomado de "Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses" (p. 910), por B.Wang, C. Q. Lan & M.Horsman, (2012), *Biotechnology Advances*.

### ***Bolsas de polietileno***

Bharguram (1999) quien desarrolló un sistema de cultivo monoxénico continuo y semicontinuo para microalgas (*Isochrysis* y *Choricero.s.* respectivamente) con materiales de bajo costo y fácil disponibilidad, de manera puntual bolsas de polietileno, enunció que fue Trotta en 1981, seguido por Laing y Hepper en 1983 y Laing y Jones 1983, quienes usaron por primera vez este modelo, debido a que permitía la producción de biomasa microalgal en altas concentraciones empleando TRH bajos.

En este sentido, Bharguram (1999) se concentró en el diseño, construcción y evaluación del sistema a pequeña escala en condiciones de laboratorio; así como en la comparación de sus resultados con los sistemas convencionales de cultivo por baches. Básicamente, los sistemas fueron diseñados para conseguir las condiciones óptimas de luz, pH, turbulencia, salinidad, temperatura, calidad y cantidad de nutrientes, y de esta manera maximizar la producción de biomasa.

Dentro de los resultados reportó que el sistema control por baches tardó 11 y 12 días en lograr una densidad de cultivo de 3.35 millones de células/ml para *Isochrysis* y *Choricero.s.*; en el cultivo de *Isochrysis* empleo tan solo 6 días para alcanzar 6.32 millones de células/ml y en el de *Choricero.s.* 3.32 millones de células/ml en 5 días, esto para los sistemas continuos y semi-continuos. Por otra parte, alude que el uso de CO<sub>2</sub> gaseoso en el cultivo generó mayor crecimiento y densidad celular, haciendo hincapié en que su suministro adecuado también propicia las condiciones de pH óptimo en el medio,  $\approx 7.5$ .

Por otra parte, SundarRajan y col. (2019) indican que de manera general la aplicación de estos sistemas resulta de interés debido a su transparencia, economía y buena esterilidad. Usualmente se compone por: la bolsa de plástico, un marco de soporte para la bolsa y un sistema de aireación para lograr la suspensión microalgal en el medio. Además, sus parámetros de diseño clave refieren a: materiales, tamaño, tipo de aireación (acondicionamiento de un tubo de aireación o provisión de una salida de aireación en la parte inferior), tipo de mezcla (transporte aéreo (airlift) o por balanceo) y la estructura del marco.

### **Uso de microalgas en la refinería del biogás y su contribución en la economía circular**

Furness y col. (2021) sugieren que la economía circular representa una alternativa de sostenibilidad al modelo tradicional “tomar-hacer-botar”, a partir del aprovechamiento del ciclo de vida de sus recursos. Es un concepto más bien reciente en el sector de plantas de tratamiento convencional de AR, las cuales en la actualidad demandan químicos y energía y aportan en la generación de lodos y emisiones atmosféricas. De ahí la necesidad de realizar una transición a la implementación de biofábricas, escenarios que recopilan materiales y energía de las AR, con la finalidad de elaborar productos de alto valor agregado o simplemente recursos para reintegrarlos a la cadena productiva.

El cultivo de microalgas en AR permite emplear un residuo líquido, que normalmente demanda recursos para su tratamiento y paralelamente la remoción de CO<sub>2</sub> del biogás, para obtener biomasa y posteriormente algún tipo de producto de valor agregado, como biofertilizantes (Solovchenko et al., 2016), carotenoides (Rawat et al., 2011), biocombustibles

(biodiesel de alta eficiencia por transesterificación de lípidos, biogás por digestión anaerobia, bioetanol por fermentación de carbohidratos, biometano en la refinación de biogás, biohidrógeno por hidrólisis biocatalizada o fermentación, biobutanol por fermentación, biocrudo por licuefacción de solventes de biomasa, etc.) (Abou-Shanab et al., 2013), (Ji et al., 2014), (Mata et al., 2010), (Park et al., 2011), (Muñoz & Guieysse, 2006, p.).

### **Estado del conocimiento**

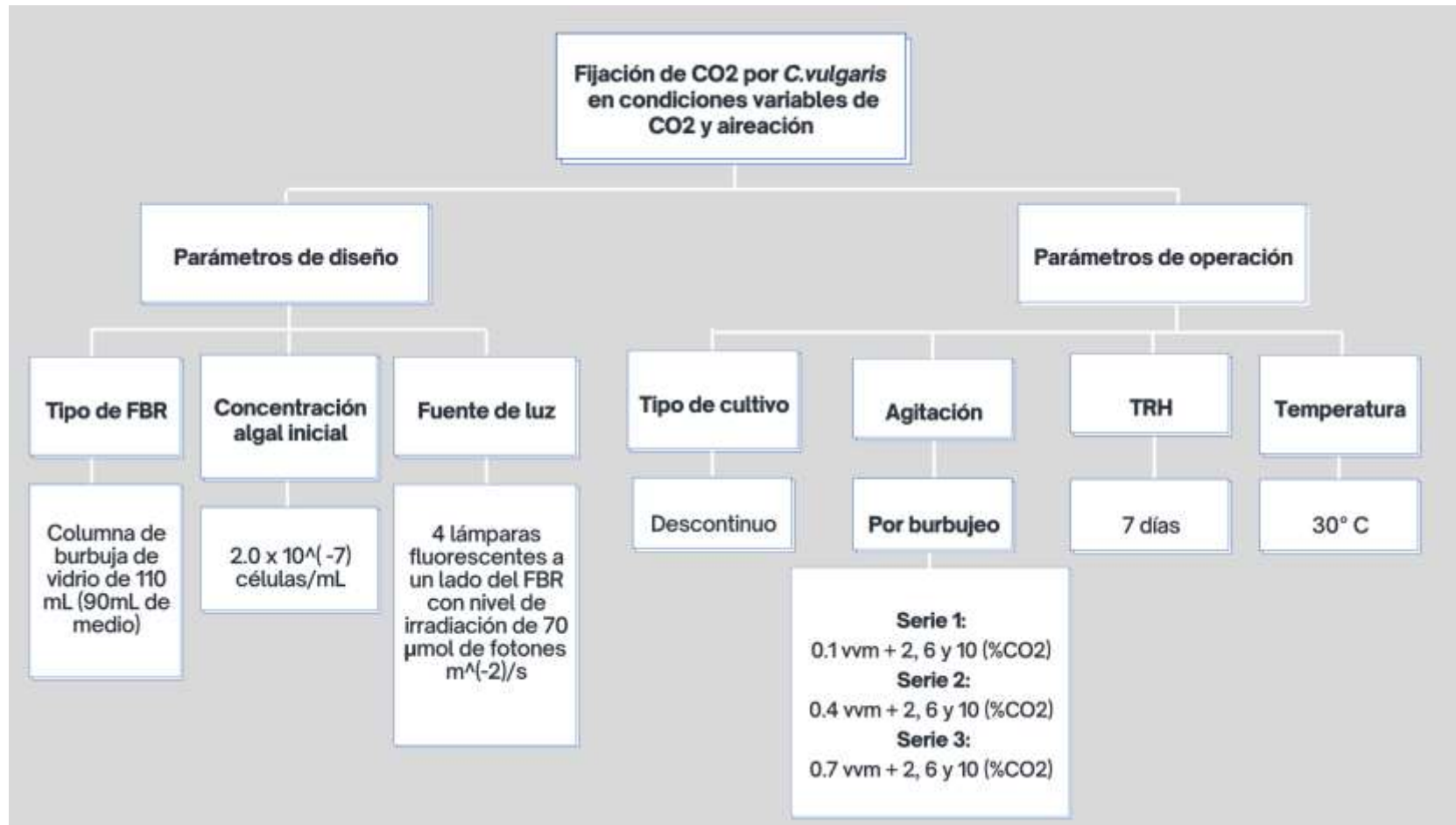
A continuación se presenta un compilado y desarrollo de algunas de las más recientes tendencias en investigación respecto al uso de microalgas como método biológico para la eliminación del CO<sub>2</sub> del biogás.

#### **Evaluación de la tasa de biofijación máxima de CO<sub>2</sub> por *Chlorella vulgaris* a condiciones variables de aireación y CO<sub>2</sub>**

Anjos y col. (2013) mencionan que el objetivo principal del estudio fue estimar la tasa de biofijación más alta de CO<sub>2</sub> de *C. vulgaris*, a partir de su cultivo autotrófico en 3 series experimentales con los mismos parámetros de diseño y operación (ver figura 5), siendo su agitación lo que los diferencia particularmente. Cada serie contempla el desarrollo de 3 FBR, en los cuales se mantiene constante la tasa de aireación y varía el porcentaje de CO<sub>2</sub> respectivamente. La serie 1 emplea 0.1 vvm y 2, 6 y 10 (% CO<sub>2</sub>), la serie 2, 0.4 vvm y 2, 6 y 10 (% CO<sub>2</sub>) y la serie 3, 0.7 vvm y 2, 6 y 10 (% CO<sub>2</sub>). Por consiguiente evaluaron cada FBR, determinado así concentración celular micro algal, producción de biomasa, tasa de crecimiento específico, tasa de biofijación máxima de CO<sub>2</sub> y caracterización bioquímica celular.

Figura 5

Parámetros de diseño y operación investigación Anjos y colaboradores (2013)



Nota. Elaborado a partir de "Bioresource Technology Optimization of CO<sub>2</sub> bio-mitigation by *Chlorella vulgaris*." (p. 149–154.), por M. Anjos, B. D. Fernandes, A. A. Vicente, J. A Teixeira & G. Dragone, (2013), *Bioresource Technology*.



Según Anjos y col. (2013), en los resultados identificaron que *C. vulgaris* es capaz de crecer bajo todas las condiciones de aireación y de CO<sub>2</sub> valoradas. Particularmente, a 6 y 10% de CO<sub>2</sub> y tasa de aireación de 0.4 vvm, se obtuvieron los valores más altos de concentración final y productividad máxima de biomasa; además, bajo estas mismas condiciones, determinaron que al aumentar la tasa de aireación los resultados fueron bastante semejantes. Igualmente identificaron que hay un mayor suministro de CO<sub>2</sub> en el FBR a 6 y 10%, con respecto al 2%, al elevar la tasa de aireación de 0.4 vvm a 0.7 vvm. Así pues afirman que hay una importante relación entre el porcentaje de CO<sub>2</sub> provisto, la concentración final y la productividad máxima de biomasa, ambas incrementándose en alrededor del 45%, al aumentar del 2 al 6% de CO<sub>2</sub> en 0.4 vvm; análogamente, precisan un descenso importante en estas variables al suministrar altos niveles de CO<sub>2</sub>, 10% específicamente.

Los valores máximos de concentración de biomasa final (10 g/L), productividad máxima de biomasa (13 g/ L d) y tasa de crecimiento específica máxima (0.95/d), se alcanzaron a 6 (%CO<sub>2</sub>) y 0.4 vvm, exponiendo la importancia del porcentaje de CO<sub>2</sub> y la aireación en la tasa de biofijación de CO<sub>2</sub>. Adicionalmente, precisan de un punto de quiebre estadístico en la tasa de biofijación máxima de alrededor de 6.5 (%CO<sub>2</sub>) y 0.5 vvm, correspondiente a 2.29 g/ L d; obteniendo valores análogos de 2.22 g/ L d, a 6 (%CO<sub>2</sub>) y 0.4 vvm bajo condiciones experimentales, cabe resaltar que posterior a él se evidencia una tendencia descendente. Finalmente, no encontraron diferencias significativas en la composición bioquímica de las células microalgales bajo las diferentes condiciones de cultivo.

## **Remoción de CO<sub>2</sub> del biogás con *N. gaditana*: Estudio de atmósferas inhibitorias con CH<sub>4</sub> y CO<sub>2</sub> variable, cultivo en FBR continuo y conjunto FBR continuo-UTM**

El proyecto desarrollado por Rivas & Jeison (2014) evaluó el mejoramiento fotosintético del biogás empleando microalgas a partir del desarrollo de tres etapas experimentales con *Nannochloropsis gaditana* CCMP-527. En primer lugar realizaron su cultivo empleando una mezcla de agua de mar y medio f/2 enriquecido con NaNO<sub>3</sub> y KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> a 20 °C, seguido a esto desarrollaron los diferentes ensayos aplicando los parámetros de diseño y operación compilados en la tabla 3, la figura 6 y 7. La etapa uno se subdivide en dos estudios de medios inhibitorios, experimentando con tres FBRs en el primero y con seis FBRs en el segundo; en el número uno emplean 0, 50 y 100 (% CH<sub>4</sub>) + N<sub>2</sub>, análogamente en el segundo aplican 0.3, 3, 6, 9, 15 y 30 (%CO<sub>2</sub>) + N<sub>2</sub>; esto con el objetivo de identificar posibles efectos inhibitorios que podrían alterar una exitosa limpieza del biogás. Por otra parte, en la etapa dos aplicaron un proceso de suministro continuo de CO<sub>2</sub> al FBR con recirculación de gas, allí pretendían evaluar la absorción de CO<sub>2</sub> bajo dichas condiciones. Por último, la etapa tres se compuso de dos ensayos consecutivos que involucraban procesos continuos de dos etapas operados en contraflujo, es decir la unión de un FBR y una UTM en donde se hacía el contacto líquido-gas; es importante mencionar que lo único que diferencia a estos dos ensayos es precisamente su volumen y en consecuencia su TRH, el cual para ambos casos varió dentro de una misma etapa, así como el Q de recirculación del medio líquido del FBR a la UTM, puesto que uno se ejecutó a escala de laboratorio y el otro a nivel semi industrial.

Tabla 3

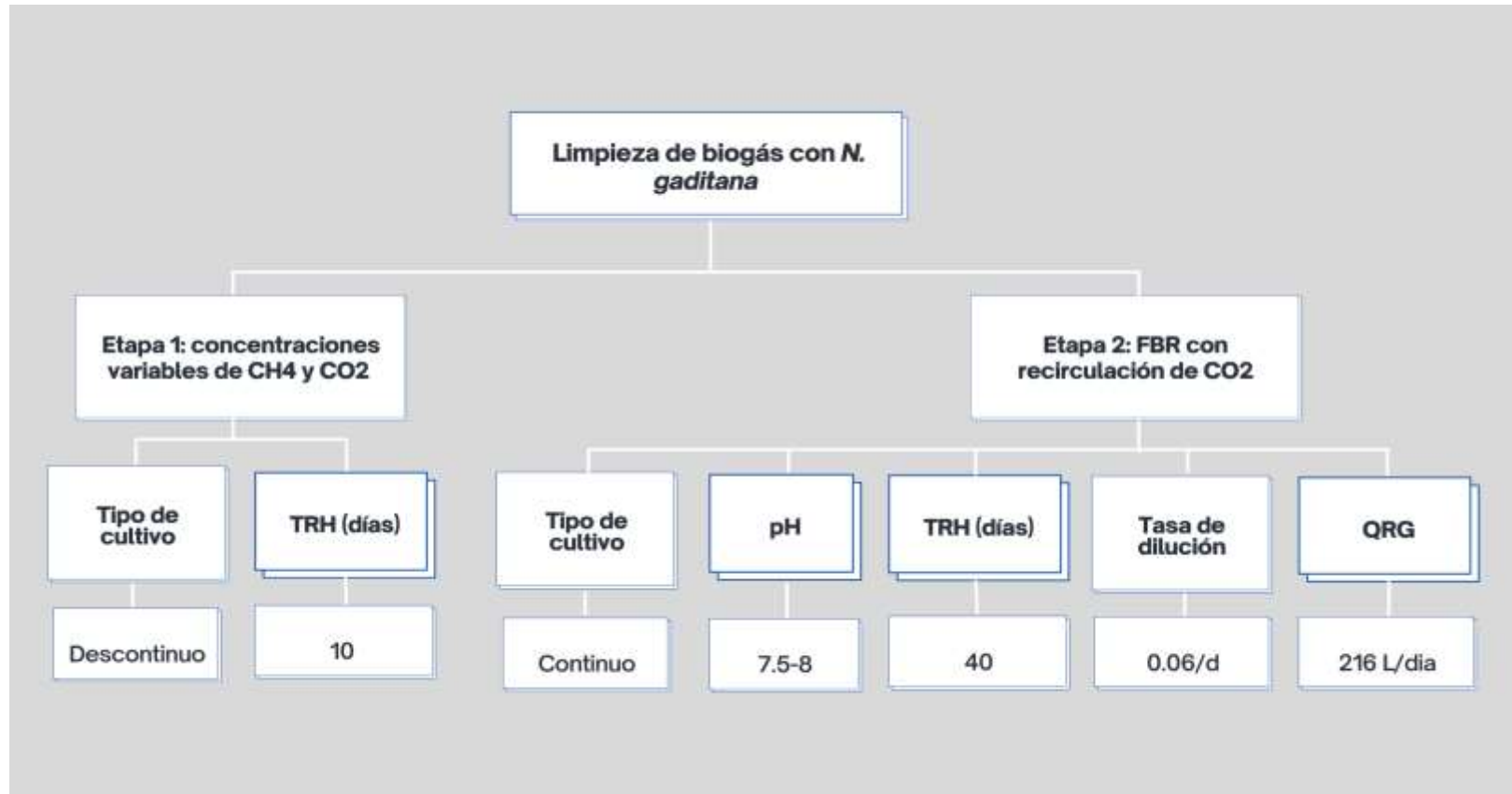
Parámetros de diseño investigación Rivas & Jeison (2014)

	<b>Etapa 1:</b> Exposición atmosférica de <i>N. gaditana</i> a concentraciones variables de CH <sub>4</sub> y CO <sub>2</sub>	<b>Etapa 2:</b> Funcionamiento de un proceso continuo de una sola etapa para captura de CO <sub>2</sub>	<b>Etapa 3:</b> Funcionamiento de un proceso continuo de dos etapas para captura de CO <sub>2</sub>	
			<b>Etapa 3.1:</b> FBR+UTM (completamente mezclada)	<b>Etapa 3.2:</b> FBR+ columna de burbuja operada en contraflujo
Volumen y tipo de FBR	Herméticos por lotes de 0.5 L	Recipiente de 2.2L	Abierto, de 2.2L+ recipiente de 1.3 L como UTM	Abierto, de vidrio (75L)+ columna de burbuja ( 0.7L)
Fuente de Luz e intensidad luminosa promedio	Lámparas de 60 μmol de fotones m <sup>-2</sup> /s	N/R	N/R	Continua, usando lámparas fluorescentes de luz blanca fría de 100 μmol de fotones m <sup>-2</sup> / s
Q directo de gas en el FBR	144 L/ día	216 L/ día	Aire: 302.4 L/día (Para mezcla)	N/R
Q promedio de alimentación del medio líquido	N/A	0.144 L/día	0.144 L/ día	4.75 L/ d
Suministro gaseoso	<b>Estudio 1 medios inhibitorios:</b> FBRs con 0, 50 y 100 (%CH <sub>4</sub> ) respectivamente + N <sub>2</sub>	Inyección de gas sintético: 70% N <sub>2</sub> y 30% CO <sub>2</sub>	Inyección de gas sintético en UTM: 70% N <sub>2</sub> y 30% CO <sub>3</sub>	Inyección de biogás en columna de burbuja: 72 % CH <sub>4</sub> y 28% CO <sub>2</sub>
	<b>Estudio 2 medios inhibitorios:</b> FBRs con 0.3, 3, 6, 9, 15 y 30 (%CO <sub>2</sub> ) respectivamente + N <sub>2</sub>			

Nota. N/A: No aplica; N/R: No Reportado. Elaborado a partir de: Note. Elaborado a partir de “*Photosynthetic CO<sub>2</sub> uptake by microalgae : An attractive tool for biogas upgrading.*” (p. 3–10.), por M. Rivas & D. Jeison, (2014), *Biomass and Bioenergy*.

Figura 6

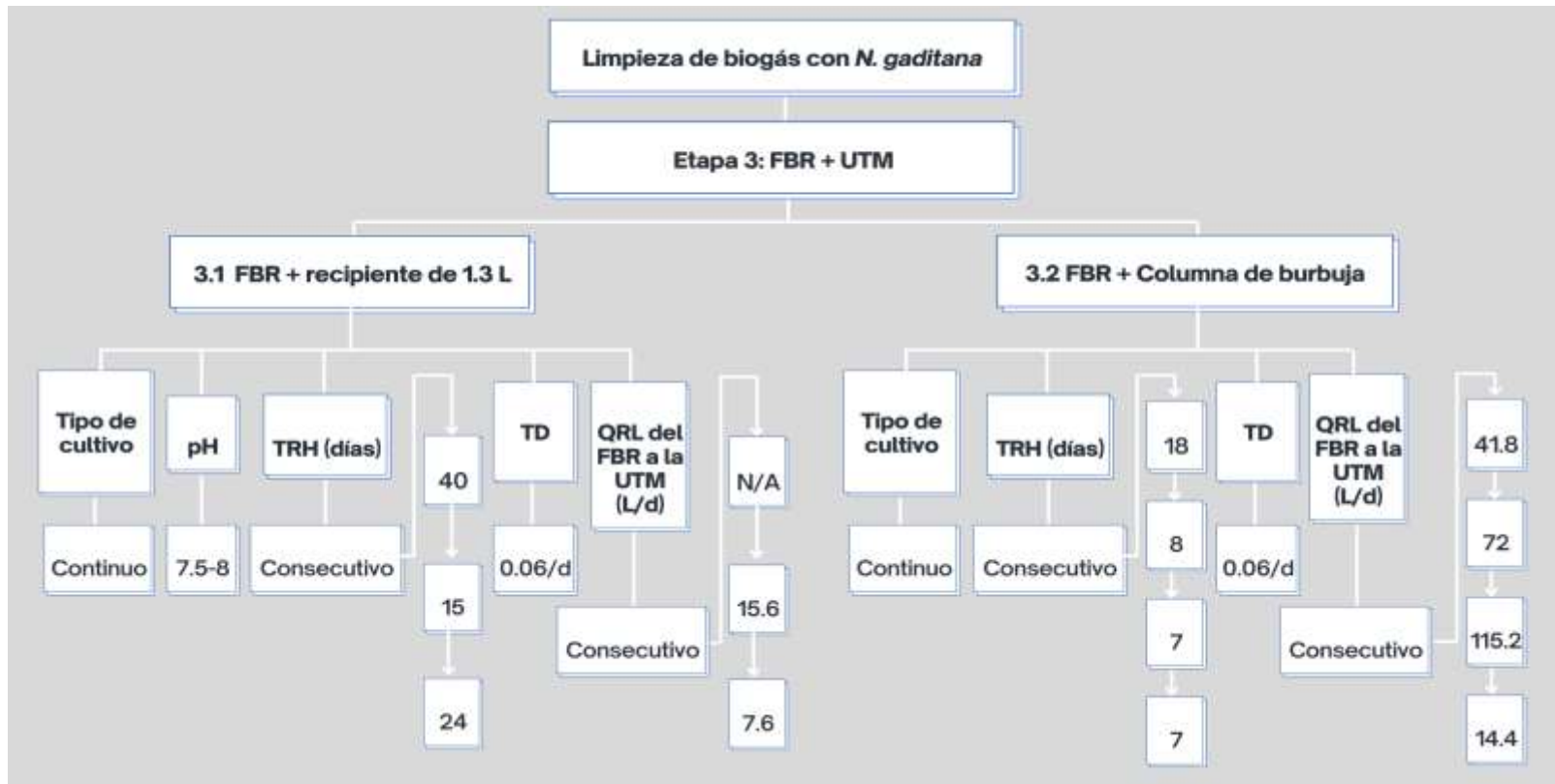
Parámetros de operación etapa 1 y 2 investigación Rivas & Jeison (2014)



Nota. QRG: Caudal de recirculación del gas. Elaborado a partir de: Note. Elaborado a partir de "Photosynthetic CO<sub>2</sub> uptake by microalgae : An attractive tool for biogas upgrading." (p. 3–10.), por M. Rivas & D. Jeison, (2014), *Biomass and Bioenergy*.

Figura 7

Parámetros de operación etapa 3 investigación Rivas & Jeison (2014)



Nota. N/A: No aplica; TD: Tasa de dilución; QRL: Caudal de recirculación del líquido. Elaborado a partir de: Note. Elaborado a partir de "Photosynthetic CO<sub>2</sub> uptake by microalgae: An attractive tool for biogas upgrading." (p. 3–10.), por M. Rivas & D. Jeison, (2013), *Biomass and Bioenergy*.

Alusivo a los resultados, Rivas & Jeison (2014) mencionan que en la etapa uno el crecimiento microalgal fue similar bajo las diferentes concentraciones de CH<sub>4</sub> y también que su presencia en el medio no genera ningún efecto significativo en el crecimiento de la *N. gaditana*. Análogamente, en las atmósferas con 0.3, 3 y 6 (%CO<sub>2</sub>), el desarrollo fue similar, con una tasa de crecimiento específico de 0.16/d, a 9% descendió a 0.07/d y a 15% la actividad fue inhibida, por la caída del pH. En un montaje operativo lo esperado es un pH controlado y una composición gaseosa variable, por lo que la inhibición por altas concentraciones de CO<sub>2</sub> no es un problema en la limpieza del biogás.

En la etapa dos manipularon el pH a través del Q del gas de entrada, equivalente a 1.0 L/d, de ahí una biomasa con concentración entre 1.4 - 1.5 g/L, producción volumétrica de 0.1 g/L y rendimiento (SSV) de 529 mg/g de CO<sub>2</sub>. Del mismo modo el 96% del CO<sub>2</sub> fue removido del gas de entrada, de este el 84% fue bio fijado y 12% disuelto en el líquido como CO<sub>2</sub> o  $HCO_3^- / CO_3^{2-}$ ; la concentración de O<sub>2</sub> en el gas efluente fue de 22%, con un balance de masa de 0.96 mol de O<sub>2</sub> por 1 mol de CO<sub>2</sub>.

En la etapa tres, el FBR conectado a la UTM de 1.3L, fue capaz de generar niveles más bajos de O<sub>2</sub> en el gas efluente comparado con la etapa dos. De hecho al aplicar un Q recirculante de 7.6 L/d se obtuvo aproximadamente de 5% de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> en el gas efluente. Del mismo al aplicar Q de 15.6 L/d, alrededor del 68% del O<sub>2</sub> fotosintético fue desorbido del FBR, por lo que solo el 32% salió con el biogás; análogamente la UTM absorbió cerca del 46% del CO<sub>2</sub>. Claramente el flujo de líquido entre el FBR y la UTM resulta ser un factor decisivo que determina el contenido de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> en el gas efluente.

Por último en el FBR conectado a la columna de burbuja, referente a la biomasa se mantuvieron concentraciones constante de 0.45 L/d y productividad volumétrica de 0.03 L/d. Además en Q recirculante de 14.4 L/d las concentraciones de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> en el biogás fueron de 1.9% y 1.2%; el 81% del CO<sub>2</sub> que ingresó al sistema fue fijado, el 13% se perdió en el efluente líquido y 6% fue liberado junto con el biogás mejorado. En conclusión no hubo desorción de CO<sub>2</sub> En el FBR, sino al contrario, una exitosa absorción del aire; a altas tasas de recirculación la absorción de CO<sub>2</sub> fue casi que total, sin embargo la concentración de O<sub>2</sub> también se incrementó en el gas efluente.

**Cultivo de *Chlorella sp* con longitud de onda de luz, intensidad luminosa y fotoperiodo variable para la remoción de CO<sub>2</sub> del biogás, aprovechando simultáneamente lodos de un reactor anaerobio como fuente de nutrientes**

La investigación de Yan y col. (2016), estudió el cultivo de *Chlorella sp* en una serie de FBRs con el objetivo de determinar las condiciones de longitud de onda de luz, intensidad luminosa y fotoperiodo que maximizaran la biofijación de CO<sub>2</sub> del biogás, paralelamente para este proceso aprovechó lodos provenientes de un reactor anaerobio como fuente de nutrientes. Inicialmente realizaron su cultivo en un medio estándar BG-11 a temperatura de 25 °C, fotoperiodo claro: oscuro (12h: 12h), fuente de luz fluorescente blanca fría con intensidad luminosa de 600  $\mu\text{mol de fotones /m}^2\text{s}$  y agitación artificial intermitente 3 veces al día. Continuando desarrollaron el experimento en dos etapas, la primera de estas comprendió la realización de seis FBRs, cuya única diferencia era la longitud de onda de la fuente de luz, aplicando tres mezclas rojo: azul en diferentes proporciones respectivamente, así como tres

monocromáticas. Para la segunda etapa fue aplicada la longitud de onda de la fuente de luz de mayor eficiencia determinada en la etapa uno a los nueve FBRs probados, los mismos se clasificaron en grupos de a tres con tres diferentes intensidades luminosas respectivamente, en cada uno de estos grupos se probaron tres distintos fotoperiodos (ver tabla 4 y figura 8).

**Tabla 4**

*Parámetros de diseño etapa uno y dos, investigación Yan y colaboradores (2016)*

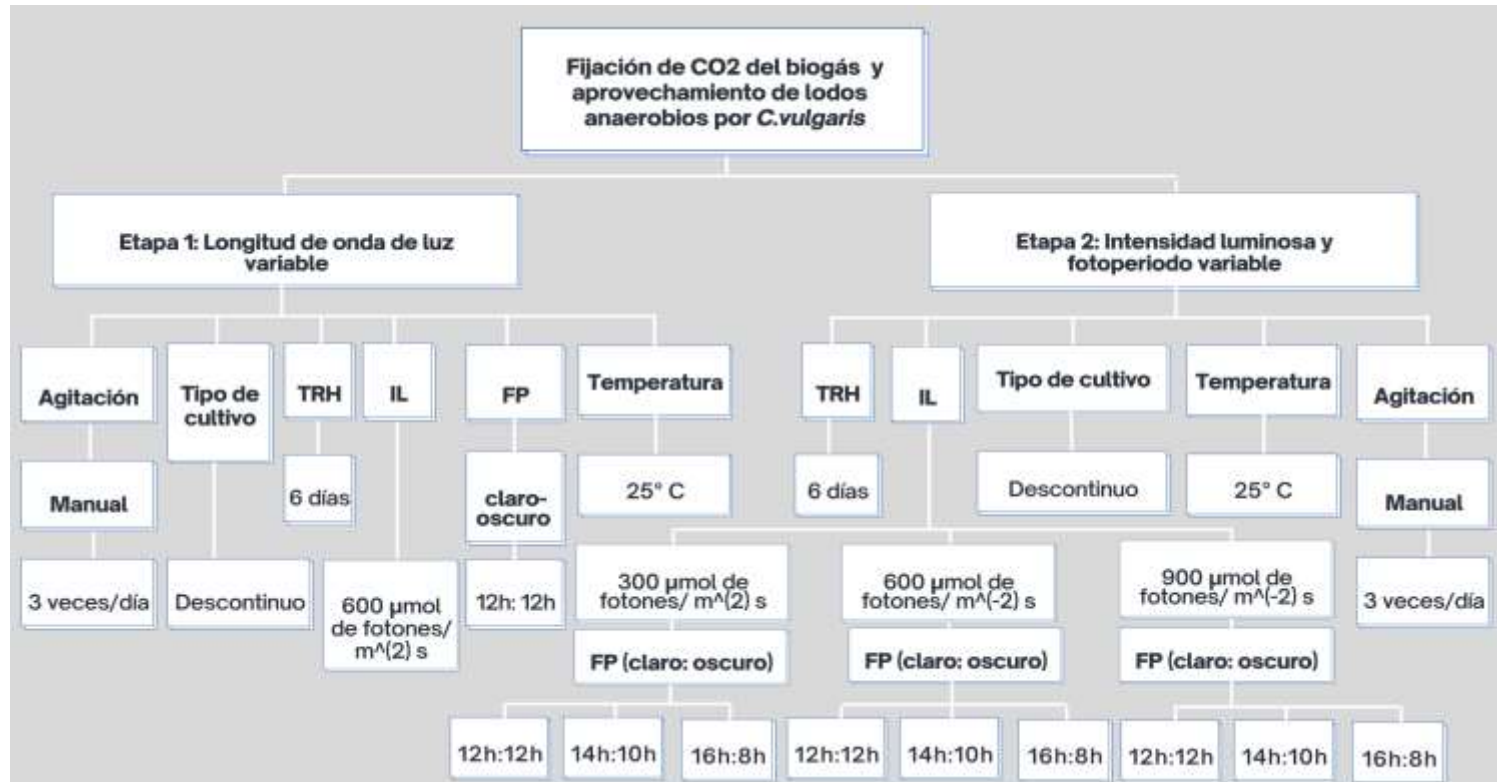
Etapa 1: Longitud de onda de luz LED Variable		Etapa 2: Intensidad luminosa y fotoperiodo variable		
Tipo y volumen de FBR	Bolsa de polietileno transparente (8L de biogás-40L de lodos de un reactor anaerobio)			
Fuente de carbono	Lodo de un reactor anaerobio			
Peso seco micro algal inicial	180.55 mg/L			
Fuente de Luz (longitud de onda)	LED-Variable	2: 8		
		Rojo: Azul	5: 5	
		8: 2		
		LED	Rojo: Azul	5: 5
		Rojo		
		Monocromática	Azul	
		Blanco		
Composición del biogás sintético	60.55 (%CH <sub>4</sub> ) y 38.02 (%CO <sub>2</sub> )			

*Nota.* Elaborado a partir de “*Photosynthetic CO<sub>2</sub> uptake by microalgae for biogas upgrading and simultaneously biogas slurry decontamination by using of microalgae photobioreactor under various light wavelengths , light intensities , and photoperiods.*” (p. 9–18.), por C.Yan, L.Zhu, & Y. Wang (2016), *Applied Energy*.



Figura 8

Parámetros de operación etapa uno y dos, investigación Yan y colaboradores (2016)



Nota. IL: Intensidad luminosa; FP: Fotoperiodo. Elaborado a partir de "Photosynthetic CO<sub>2</sub> uptake by microalgae for biogas upgrading and simultaneously biogas slurry decontamination by using of microalgae photobioreactor under various light wavelengths, light intensities, and photoperiods." (p. 9–18.), por C. Yan, L. Zhu, & Y. Wang (2016), *Applied Energy*.

Alusivo a los resultados Yan y col. (2016) identificaron que la mezcla (rojo:azul = 5:5) tuvo mayor crecimiento celular (506.30 mg/L), eficiencia de remoción de CO<sub>2</sub> del biogás (74.53%) y eficiencia de remoción de nutrientes en los lodos de biogás, comparado con las otras dos mezclas, las cuales tuvieron valores muy próximos; análogamente los tratamientos con mezcla de diferentes longitudes de onda de luz LED obtuvieron mayor rendimiento que los que empleaban luz LED monocromática, siendo a su vez la luz blanca la más exitosa en esta categoría. Por último, la adición de lodos de biogás fomentó el crecimiento microalgal celular y esto paralelamente favoreció su tratamiento.

En la etapa 1 identificaron que tanto para los tratamientos con mezcla de longitudes de onda de luz como para las monocromáticas, el pH, CID y OD, fueron bastante similares. Por otra parte en la etapa 2 el crecimiento celular microalgal logró los valores más altos de 483.02, 531.95 y 390.17 mg/L en baja intensidad luminosa y fotoperiodo largo, intensidad luminosa moderada con fotoperiodo medio e intensidad luminosa alta con fotoperiodo bajo, siendo dichas relaciones a su vez las de mayor eficiencia en la eliminación de CO<sub>2</sub> del biogás, DQO, NT y PT.

De manera general recomiendan para el periodo experimental inicial (0-48 h), medio (48-96h) y final (96-144h) intensidad luminosa y fotoperiodo de 300  $\mu\text{mol}$  de fotones / $m^2s$  - FP largo, 600  $\mu\text{mol}$  de fotones / $m^2s$  - FP medio y 900  $\mu\text{mol}$  de fotones / $m^2s$  - FP corto, respectivamente. Logrando un crecimiento celular microalgal en peso seco de 582.40 mg/L, eficiencia de remoción de CO<sub>2</sub> del biogás, DQO, NT y PT de 85.46%, 85.23%, 87.10% y 92.40%, a correspondencia.

## **Efectos de la alcalinidad y relación líquido/gas variable en la remoción de CO<sub>2</sub> del biogás mediante el cultivo de un consorcio alga-bacteria en un FBR tubular horizontal semi-cerrado**

Marín y col. (2019) mencionan que el objetivo de la Investigación fue determinar el potencial de mejora del biogás empleando un FBR tubular horizontal semicerrado inoculado con un consorcio alga-bacteria compuesto por (*Stigeoclonium tenue*, *Chlorella vulgaris*, *Navicula amphoraste* y *Nitzschia closterium*) y unido a una columna de absorción. Operacionalmente desarrollaron tres series experimentales, sin embargo el diseño base del sistema fue el mismo.

Para comenzar construyeron el FBR de acuerdo a los parámetros de diseño enunciados en la tabla 5, seguido a esto ejecutaron dos etapas de estudio y una final que integraba las características determinadas previamente a partir de una operación continua. Durante la etapa uno evaluaron L/G variables en la columna de absorción, mientras que en la etapa dos experimentaron con diferentes alcalinidades en el caldo de cultivo proveniente del FBR, siguiendo la metodología establecida en la figura 9.

**Tabla 5**

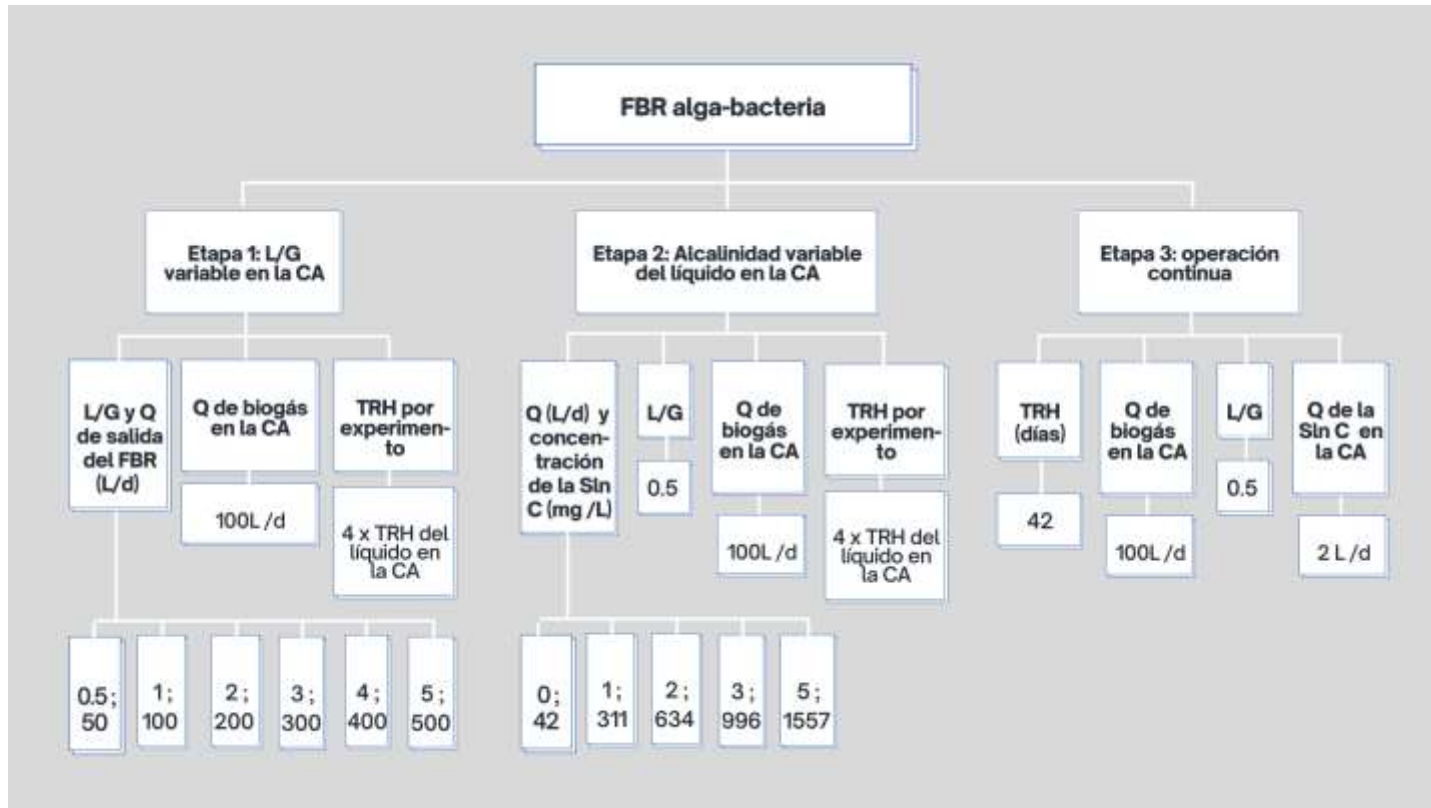
*Parámetros de diseño general del FBR Marín y colaboradores (2019)*

<b>Parámetros de diseño general del sistema</b>	
Inoculación inicial	220 mg SSV/ L
Cultivo	Continuo
Tipo y volumen del FBR	Tubular hibrido horizontal (11 700 L) + CA (45 L)
Configuración	2 tanques laterales abiertos ubicados a diferentes alturas e interconectados por tubos + CA de burbujas
Fuente de carbono	2300 L/d de aguas residuales agrícolas
Composición del biogás	3.7 (%CO <sub>2</sub> ), 0.1 (%H <sub>2</sub> S) y 86.2 (%CH <sub>4</sub> )
Mezcla	Ruedas de 6 paletas con velocidad de 9 - 12 rpm
Velocidad	0.20 - 0.25 m/s

*Nota.* CA: Columna de absorción. Elaborado a partir de “*Bioresource Technology Influence of liquid-to-biogas ratio and alkalinity on the biogas upgrading performance in a demo scale algal-bacterial photobioreactor.*” (p. 212–217.), por D. Marín, A. Ortiz, R. Díez-montero, E. Uggetti & J. García, (2019), *Bioresource Technology*.

Figura 9

Parámetros de operación del FBR Marín y colaboradores (2019)



Nota. CA: Columna de absorción; L/G: relación líquido gas; SIn C: Solución de carbonato ( $\text{NaHCO}_3$  y  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Elaborado a partir de

“Bioresource Technology Influence of liquid-to-biogas ratio and alkalinity on the biogas upgrading performance in a demo scale algal-bacterial photobioreactor.” (p. 212–217.), por D. Marín, A. Ortiz, R. Díez-montero, E. Uggetti & J. García, (2019), *Bioresource Technology*.

En la etapa uno Marín y col. (2019) identificaron que la relación L/G si incurre en la variación de la composición del biometano tratado, alcanzando concentraciones máximas de CH<sub>4</sub> de 89.7% a L/G =1; análogamente cuando esta fue de 2.0, obtuvieron concentraciones inferiores a 0.1 (%CO<sub>2</sub>), para 0.5 alcanzaron las concentraciones más altas de 9.6 (%CO<sub>2</sub>) y > 2.0 se evidencia un descenso significativo, de rango entre < 0.1 hasta 1.4%, equivalentes a una eficiencia de remoción de rango entre 90.4 y >99.9%. Del mismo modo las concentraciones de N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> del efluente aumentaron de 3.4% a 11.9% del paso de L/G = 0.5 a 5.0, respectivamente.

Para la etapa dos, determinaron que el suministro de la solución de carbonato a la columna de absorción incrementó la calidad del biometano, obteniendo concentraciones de 9.6, 2.6, 1.3, 1.2 y 1.1 (%CO<sub>2</sub>) correspondientes a CI en el caldo de cultivo de 42, 311, 634, 996 y 1557 mg/L, respectivamente. Igualmente las concentraciones de N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> aumentaron de 2.4 a 6.1%, correspondientes a 42 y 1557 mg IC/L. Las concentraciones más bajas de biometano fueron de 88% y las más altas de 93.2%, equivalentes 42 y 634 mg/L.

Finalmente en la etapa tres, observaron un comportamiento constante en la composición de CH<sub>4</sub> durante el TRH, entre 94.1 y 98.9%, CO<sub>2</sub> de rango <0.1% y 1.4%, equivalentes a eficiencias de remoción > 91.0%, ausencia de H<sub>2</sub>S independientemente de las condiciones ambientales, así como concentraciones de N<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> entre 0.9 y 5.9%. Del mismo modo en el tratamiento de agua residual en el afluente y efluente, el pH, las concentraciones de COT disuelto, CI disuelto y NT fueron del orden de 7.9 y 8.9, (69.9 - 277.3) y (90.4 - 217.0), (21.6 - 46.3) y (29.8 - 91.8) y por último (9.1 - 25.0) y (11.1 - 25.9) mg/L.

**Respuesta de una estrategia de control automatizada basada en el caudal de reciclaje del líquido para la mejora del biogás ante pHs y afluentes gaseosos de composición variable, evaluada en un FBR tipo HRAP + Columna de absorción**

Rodero y col. (2020) indican que el objetivo del proyecto fue investigar lo que a su juicio fue la primera evaluación de un sistema de control para la mejora de biogás en un FBR tipo HRAP + columna de absorción a escala semi- industrial; emplea oxígeno fotosintético en la oxidación del H<sub>2</sub>S y cuenta con superficie de iluminación de 32 m<sup>2</sup> y profundidad de 0.3m. Así pues su interés estuvo en mantener y/o restaurar la calidad del biometano en caso de variaciones ambientales (fluctuaciones de pH en el caldo de cultivo y variaciones en la producción de biogás) o fallos operacionales propios del sistema.

Para comenzar construyeron el FBR de acuerdo a los parámetros de diseño enunciados en la tabla 6, además ejecutaron tres etapas posteriores, cada cual con condiciones operativas particulares como se muestra en la figura 10. En esta medida durante la etapa uno probaron la estrategia de control basada en la variación del Q de reciclaje del líquido para la manipulación del contenido de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> del biogás tratado, alusivo a la etapa dos evaluaron dicha estrategia en presencia y ausencia, bajo condiciones de pH en el FBR y Q de biogás variable y para concluir, en la etapa tres valoraron el sistema de control tras un fallo operativo de 2 horas, así como para su posterior restauración durante 4 horas.

**Tabla 6**

*Parámetros de diseño general investigación Rodero y colaboradores (2020)*

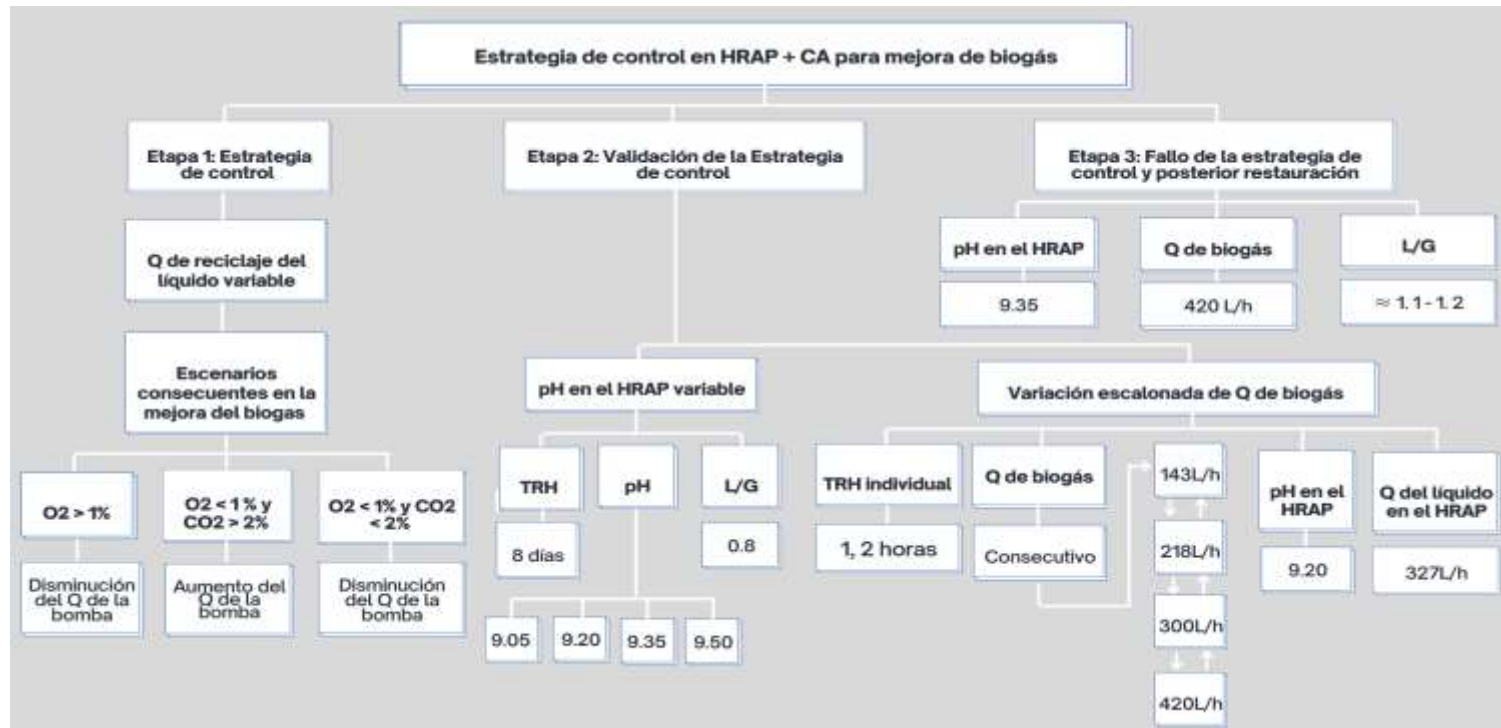
<b>Parámetros de diseño general del sistema</b>	
Cultivo	Continuo
Tipo y volumen de FBR	HRAP (9300L) con dos canales de agua divididos por una pared central de concreto + columna de absorción de biogás (150L), conectados mediante recirculación externa.
Fuente de carbono	160 L/d de lodos de digestión anaerobia
Composición del biogás	13.7 (%CO <sub>2</sub> ), 0.1 (%H <sub>2</sub> S) y 86.2 (%CH <sub>4</sub> )
Mezcla	Mecánica-continua, por recirculación interna del líquido con paletas de 6 hojas ≈ 0.3 m/s
Velocidad de recirculación de biomasa	30g/m <sup>2</sup> d
Módulo de control del Q de reciclaje del líquido	Controlador lógico programable (PLC) "S7-315"
Análisis de la composición del biogás	Analizador de gases en línea INCA 4001

*Nota.* HRAP: Estanque alga-bacteria de alta tasa. Elaborado a partir de "Performance evaluation of a control strategy for photosynthetic biogas upgrading in a semi-industrial scale photobioreactor." (p. 1–8.), por M. del R. Rodero, A. Carvajal, Z. Arbib, E. Lara, C. de Prada, R. Lebrero, & R. Muñoz, (2020), *Bioresource Technology*.



Figura 10

Parámetros operativos de la investigación Rodero y colaboradores (2020)



Nota. HRAP: Estanque alga-bacteria de alta tasa; CA: Columna de absorción; L/G: relación líquido gas. Elaborado a partir de "Performance evaluation of a control strategy for photosynthetic biogas upgrading in a semi-industrial scale photobioreactor." (p. 1–8.), por M. del R. Rodero, A. Carvajal, Z. Arbib, E. Lara, C. de Prada, R. Lebrero, & R. Muñoz, (2020), *Bioresource Technology*.

Según Rodero y col. (2020) en la etapa dos con pH variable y sin estrategia de control identificaron que una leve caída de pH ( $\approx 0.15$ ) generó un descenso importante en la transferencia de masa L/G de la UTM, pese a que la alcalinidad era alta. Además la eficiencia de remoción de CO<sub>2</sub> fue de 93.4, 87.7, 77.9 y 68.5% y la concentración de CH<sub>4</sub> de 97.3, 95.1, 90.3 y 88.0%, a pH de 9.50, 9.35, 9.20 y 9.05, respectivamente. Paralelamente al operar el sistema de control la concentración de CO<sub>2</sub> fue  $< 2\%$  luego de 1h y pH 9.5, 2 h después y con pH de 9.05 permaneció estable. Finalmente lograron la eliminación completa del H<sub>2</sub>S y concentraciones de O<sub>2</sub> insignificantes bajo todas las condiciones.

En la etapa dos con Q de biogás variable y ausencia de sistema de control obtuvieron tasas máximas de L/G de 1.3, 1.7, 2.1 y 2.4, correspondientes a 515, 681, 816 y 967 L/h. Además la concentración de CO<sub>2</sub> en el biogás aumentó de 2.5 a 14.1%, al incrementar gradualmente el Q, por otra parte durante el descenso gradual, la concentración de CO<sub>2</sub> subió levemente hasta 16.1% y luego disminuyó paulatinamente a 6% a 143 L/h. Las concentraciones de O<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S en el biogás tratado fueron insignificantes, mientras que las concentraciones de CH<sub>4</sub> fueron consecuentes a la remoción de CO<sub>2</sub>, siendo 97.6% la concentración máxima a 143 L/h y la más baja de 83.9% a 300 L/h. Análogamente al aplicar el sistema de control hubo remoción completa de H<sub>2</sub>S, lograron concentraciones de CO<sub>2</sub> de 2.4% y esta se mantuvo prácticamente constante al  $\approx 2\%$  independientemente de las variaciones graduales de Q de biogás, mientras que las concentraciones de O<sub>2</sub>  $\leq 0.5\%$  se registraron aún bajo las relaciones L/G más altas de 4.9.

En la etapa tres identificaron que la estrategia de control logró proporcionar biometano de calidad satisfactoriamente al interrumpir el suministro de líquido, paralelamente obtuvieron resultados similares bajo condiciones controladas y no controladas. Sin embargo aclaran que en un caso eventual de aumento en el contenido de CO<sub>2</sub> debido a cualquier fluctuación en el caldo de cultivo, el sistema por sí solo no estaría en la capacidad de recobrar la concentración de CO<sub>2</sub> inicial a menos de que esté en condiciones de control. Por otra parte, mientras el sistema de control estuvo activo se registraron variaciones menores en el Q del líquido (470-560 L/h) y el contenido de CO<sub>2</sub> permaneció < 2%. Al detener la recirculación de líquido, las concentraciones de CO<sub>2</sub> en el biogás mejorado aumentaron a 29.1%, no obstante una vez restaurado el sistema se logró un contenido de O<sub>2</sub> en el efluente < 1% y CH<sub>4</sub> de 95.8%.

## Metodología

La construcción del FBR involucró el uso de una serie de materiales generales y otros específicos, de acuerdo al ítem a desarrollar. La tabla 7 expone un compilado de los materiales de uso general, mientras que durante la explicación metodológica de cada componente se enuncian los específicos.

**Tabla 7**

*Materiales generales en la construcción de los diferentes componentes del FBR*

<b>N°</b>	<b>Material</b>
1	Tubo Conduit 1/2" PVC
2	Codo 1/2" Presión
3	Tricodo 1/2" Presión
4	T 1/2" Presión
5	Bolsa de polipropileno de alta densidad calibre 50 micras
6	Adaptador 1/2" Terminal Conduit
7	Caucho de silicona marca Constru Químicos
8	Catalizador de caucho de silicona marca Constru Químicos
9	Tapón Roscado 1/2" Presión
10	Manguera de vinilo transparente de PVC para acuario
11	Silicona de vidrio marca Pegadit
12	Amarres plásticos marca Marwa de 20 cm x 4.8 mm
13	Adaptador macho 1/2" Presión
14	Empaques de goma 3/4 " para uso en conectores de manguera marca ERG
15	Cemento solvente tubos y accesorios de PVC marca Durman
16	Cinta para sellos impermeables marca Sika
17	Tubo 1/2" PVC de presión
18	Válvula de control de flujo de aire para acuario en Y

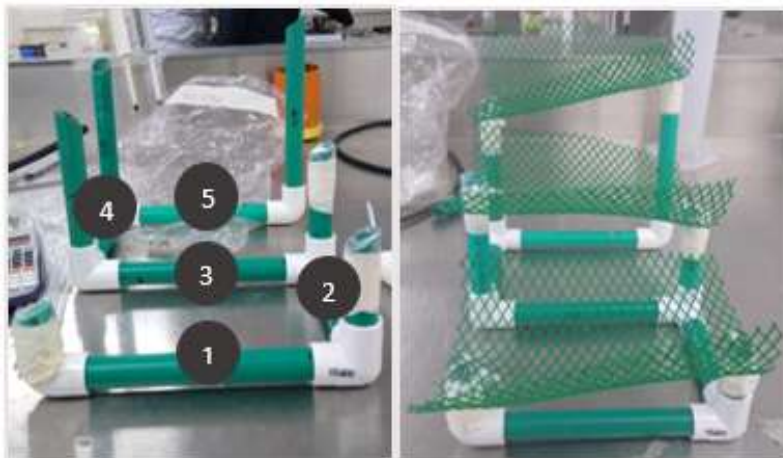
## **Estructura de soporte del FBR**

Se propusieron y construyeron diferentes modelos secuenciales con el objetivo de identificar uno final que respondiera al volumen y TRH planteado, la maximización del tiempo de vida y en general a las condiciones de remoción de CO<sub>2</sub> por parte de las microalgas; Así pues su fabricación se enfocó en la construcción de un FBR horizontal con una ligera pendiente entre niveles y estructura de soporte en PVC, teniendo en cuenta la resistencia del material y su perennidad de alrededor de 100 años (Makris et al., 2020)

El primer modelo contempló la fabricación de una estructura base pequeña con tubos conduit, codos, trícodos y malla plástica como soporte de la bolsa de polipropileno como lo ilustra la figura 11. El modelo se compuso por cinco secciones con pendiente de 26.8% entre sí; además para la superficie horizontal se usaron tres tubos de 19 cm y dos de 11 cm, mientras que para la altura se usó un tubo de 4 cm, uno de 6 cm, uno de 8.5 cm, uno de 12.5 cm, uno de 15 cm y finalmente uno de 19 cm, así como plástico y cinta de enmascarar en cada extremo superior de estos tubos verticales, con el objetivo de evitar la ruptura de la bolsa.

**Figura 11**

*Primer modelo de la estructura de soporte del FBR*

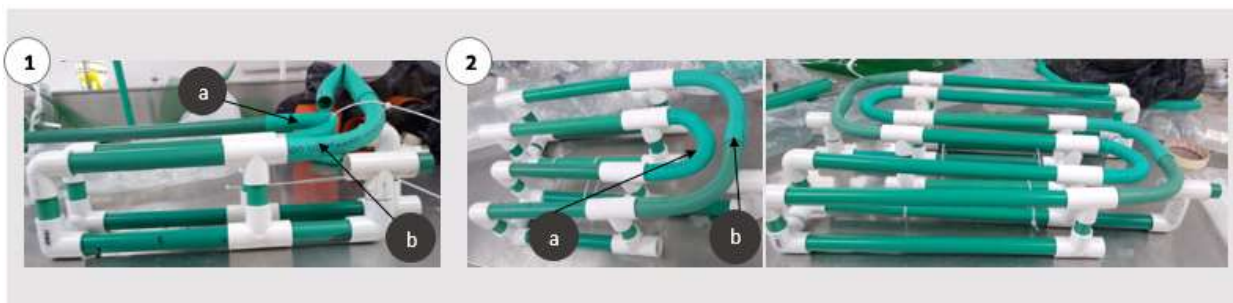


*Nota.* Sección 1, 2, 3, 4 y 5; ambas fotografías corresponden a el mismo modelo, difieren únicamente en la presencia y/o ausencia de la malla plástica.

El segundo modelo descartó el uso de malla plástica y en contraste contempló la fabricación de la estructura únicamente en PVC, por lo cual empleó tubos conduit, codos, trícodos y Ts. Así mismo con la finalidad de mantener una pendiente del 3.1% entre niveles horizontales evaluó diferentes alternativas para los brazos de conexión, aclarando que dicho componente es particularmente el que otorga a la estructura una leve diferencia de altura. En consecuencia consideró dos etapas, la 1) usó a) curvas de PVC deformadas manualmente con una pistola de aire y calor y b) no deformadas, para la línea interna y externa respectivamente. Por otra parte, la 2) empleó a) coraza flexible de protección eléctrica para el fragmento interno y b) un conjunto de curvas de PVC para el exterior, como lo muestra la figura 12.

**Figura 12**

*Segundo modelo de la estructura de soporte del FBR*

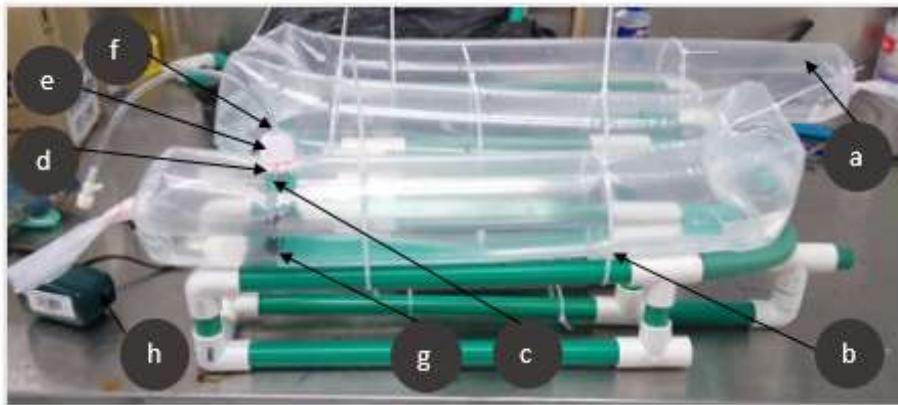


*Nota.* La fotografía de la izquierda representa la fase 1, mientras que la del centro y la de la derecha muestran el avance intermedio y final correspondiente a la fase 2.

Posteriormente se probó el sistema diseñado con a) una bolsa de polipropileno de longitud útil de 1.78 m, cerrada con nudos manuales en cada extremo, llena de 50% agua - 50% aire y b) sujeta a la estructura con amarres plásticos; igualmente se ensayó una alternativa de sello para el suministro de gas compuesta por c) un adaptador terminal Conduit relleno con una mezcla de caucho de silicona-catalizador, d) un empaque circular de caucho elaborado también a partir de dicha mezcla, e) un tapón roscado, f) manguera de vinilo pegada al tapón con silicona para vidrio, g) un difusor ubicado al interior de la bolsa y h) una bomba de aire para acuario, como se identifica en la figura 13.

**Figura 13**

*Segundo modelo de la estructura de soporte del FBR, bolsa de polipropileno y primer sello de suministro de gas*



Posteriormente las curvas del sistema fueron reemplazadas por tubos conduit, codos y Ts, conservando la pendiente del 3.1%. Adicionalmente se hizo otra bolsa con longitud útil de 1.78 m, se sujetó a la estructura con amarres plásticos y se le añadieron dos sellos con la misma configuración descrita anteriormente, salvo que uno era a) de entrada y b) otro de salida del gas, estando este último conectado a un recipiente con agua con la finalidad de mantener inflado el sistema, como se ilustra en la figura 14.



**Figura 14**

*Modificaciones finales en las curvas del modelo dos de la estructura de soporte del FBR y primeros modelos de sellos de suministro y salida de gas*

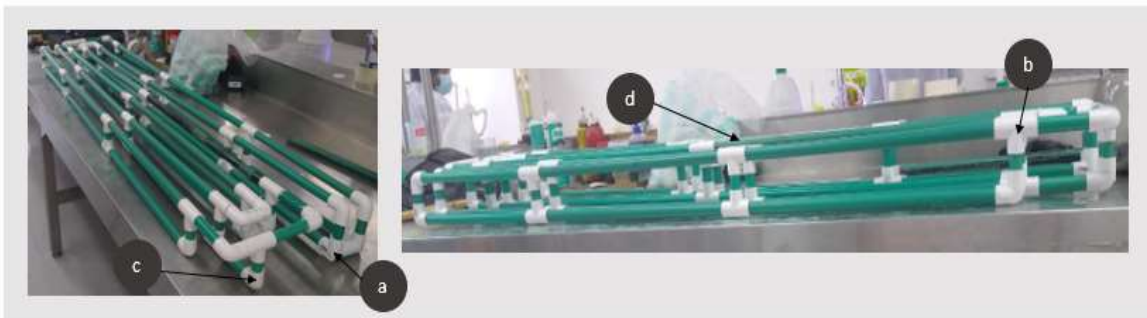


*Nota.* Ambas fotografías corresponden al mismo modelo, tan solo que la de la izquierda es la estructura de soporte y la de la derecha una prueba preliminar.

Por consiguiente se estimó la longitud útil de la bolsa de tal manera que cumpliera con los criterios de volumen del proyecto, siendo esta equivalente a 5.1 m; con base en esto se delimitó el largo de la estructura final la cual fue de 5.7m. En consecuencia la configuración se compuso por a) seis tricodos, b) 32 Ts, c) 16 codos y d) 22 m tubo conduit, tal como se presenta en la figura 15 y el anexo 1.

**Figura 15**

*Configuración final de la estructura de soporte del FBR*



*Nota.* Ambas fotografías responden al mismo modelo, siendo la de la izquierda es una vista en planta y la de la derecha una vista frontal.

Para concluir la figura 16 presenta el montaje final de la estructura de soporte junto a una instalación preliminar del FBR, la misma se compuso por a) la estructura de soporte final, b) una bolsa con longitudes equivalentes a las finales y 50% aire - 50% agua en distribución de volumen, c) un sello de entrada y d) otro de salida de gas y por último e) amarres plásticos.

**Figura 16**

*Estructura de soporte final e instalación preliminar del FBR*

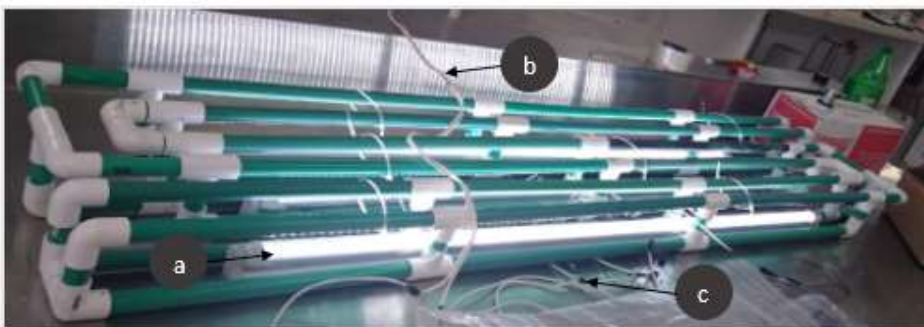


## Suministro de luz

La configuración de la fuente de luz del FBR se presenta en la figura 17. Así pues se realizó un circuito en paralelo compuesto por a) 3 tubos LED marca FITECH, modelo FE-T812-S, 18W de potencia y 110-270V, los cuales se ubican en la parte más baja de la estructura de soporte, entre cada uno de los brazos y además se sujetaron a la misma empleando amarres plásticos, b) cable de cobre calibre 14 AWG, c) cinta aislante y d) un enchufe tipo B 110V.

**Figura 17**

*Configuración del suministro de luz del FBR*



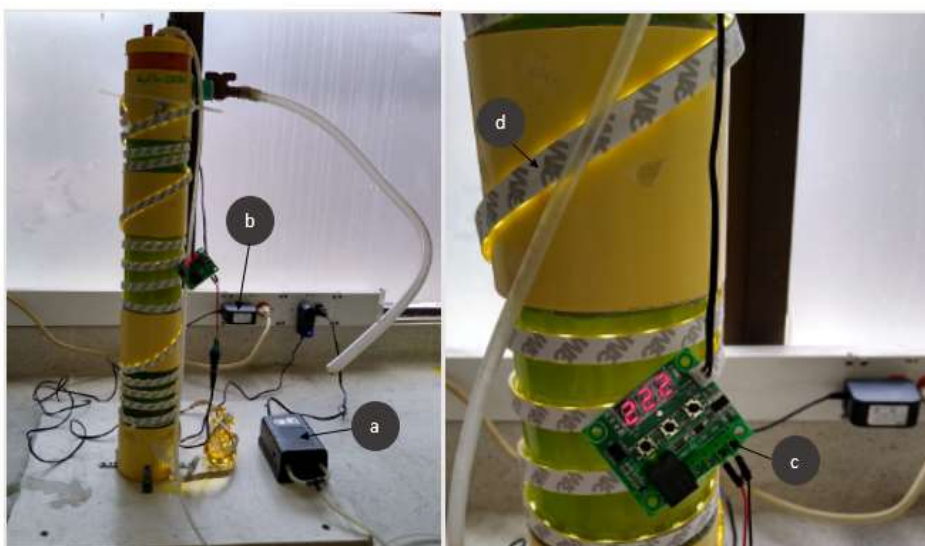
## Preparación del inóculo

Inicialmente se lavó y retiró la materia orgánica muerta aglomerada en las paredes de un reactor airlift de 2.2 L con agua y jabón, seguido a esto se preparó una solución de agua e hipoclorito de sodio y se limpió y por último se retiró todo olor de la mezcla preparada previamente empleando agua repetidas veces. Seguido a esto se tomó un pre inóculo de 220

mL de *chlorella vulgaris* proveniente de otro reactor y se introdujo en el airlift, así como 1.98L de agua y 8 mL de orina; adicionalmente se le conectó a) una bomba de aire Xilong dos salidas, b) un adaptador para la luz LED de 12V, 1.5 A, c) un sensor de temperatura y d) luz LED alrededor del FBR fijando una temperatura promedio de rango entre 22- 24°C, como se muestra en la figura 18.

**Figura 18**

*FBR tipo airlift de 2.2L para la preparación del inóculo*



*Nota.* Ambas fotografías son del mismo sistema, tan solo que la de la izquierda presenta el FBR de manera general y la de la derecha es una toma enfocada.

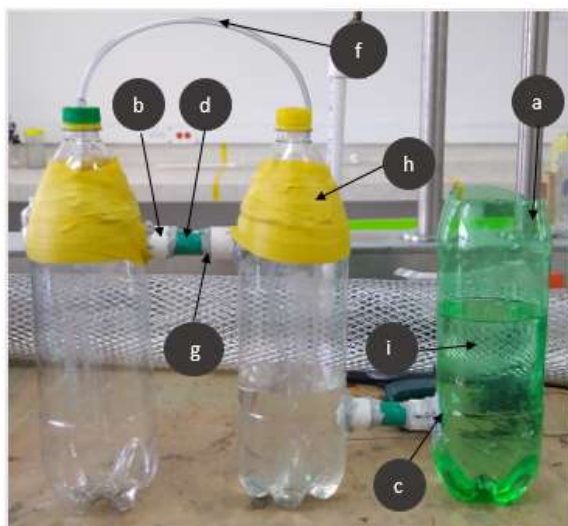
Por último, se aclara que su operación duró 20 días con adición de 8 mL de orina cada 8 días y muestreo diario para toma de absorbancia.

## Sistema de salida del gas

La figura 19 presenta el primer modelo del sistema de salida de gas del FBR, este se compuso de a) tres botellas 2L PET, b) cuatro adaptadores macho, c) cuatro hembras de adaptador terminal conduit para ajustar los adaptadores macho dentro del recipiente, d) dos tubos conduit de 7 cm, e) cuatro empaques  $\frac{3}{4}$ " los cuales se ubican dentro de la botella en medio de los adaptadores macho y hembra, f) manguera para acuario de vinilo, g) silicona para vidrio, h) cinta aislante e i) agua.

**Figura 19**

*Primer modelo del sistema de salida de gas*

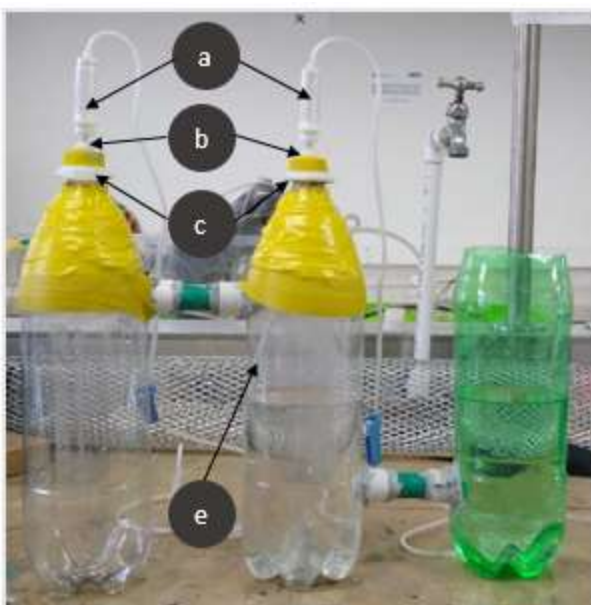


Posteriormente dicho modelo eliminó el uso de manguera de vinilo pegada con silicona para vidrios por a) dos venoclisis, b) dos soportes para venoclisis elaborados a partir de una mezcla de caucho de silicona-catalizador, c) dos empaques de caucho de silicona en las tapas

elaborados también con la mezcla anterior y d) una manguera siliconada interna unida al punzón del venoclisis y sumergida en agua en el recipiente del medio, como se aprecia en la figura 20; Es importante clarificar que luego de ocho días de operación se identificó que los empaques empleados no eran realmente idóneos, puesto que se agrietaron y rompieron debido a la fricción ejercida por la tapa.

**Figura 20**

*Modificación del primer modelo del sistema de salida de gas*



La figura 21 presenta la configuración del modelo final del sistema de salida, así pues este se compuso de a) tres recipientes PET 3L, b) dos tubos  $\frac{1}{2}$ " de presión de 7 cm y cuatro adaptadores macho, pegados a su vez con cemento solvente PVC, c) teflón en la sección que une el recipiente, el adaptador macho y el adaptador hembra conduit, d) cinta Sika, e) una manguera siliconada conectada internamente al punzón del venoclisis, recibiendo así de forma directa el gas de salida proveniente del FBR y sumergida en 0.7L de agua en el recipiente de la

izquierda, f) 2L de agua distribuidos entre el recipiente del medio y el de la derecha, g) una bolsa de almacenamiento de gas de 40 L la cual se conecta mediante una manguera de vinilo y un venocllisis al recipiente del centro; es importante mencionar que h) el sello de la bolsa resulta similar al aplicado en los sellos de suministro de líquido y salida de gas, con la única diferencia de que el tapón no tiene caucho de silicona en su interior y además está perforado totalmente en la tapa.

**Figura 21**

*Modelo final del sistema de salida de gas del FBR*



*Nota.* Las tres fotografías corresponden al mismo sistema, siendo la de la izquierda una toma general, la del centro la bolsa de almacenamiento y la de la derecha una vista interna del sello de la bolsa.

### **Sellos de entrada y salida del gas y del líquido**

Los primeros modelos de sellos se enunciaron en la figura 12 y 13, sin embargo estos experimentaron algunas modificaciones. De modo que los siguientes ejemplares eliminaron los empaques de caucho de silicona por a) dos empaques de goma  $\frac{3}{4}$ " , los cuales se ubicaban dentro y fuera de la bolsa y b) un adaptador terminal conduit relleno de una mezcla de caucho

de silicona - catalizador, como lo ilustra la figura 22. Cabe resaltar que una vez desarrolladas las pruebas se identificó fuga de agua por el sello, lo que invalidó totalmente su uso.

### Figura 22

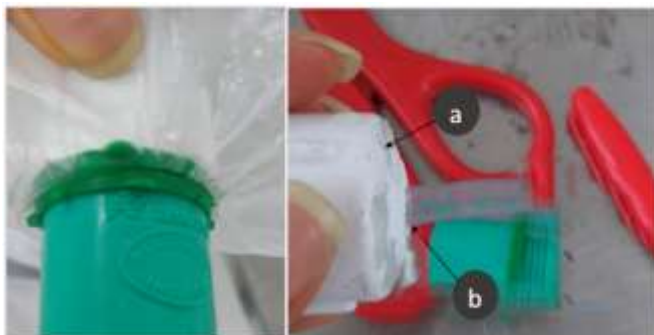
*Segundo modelo de sello*



*Nota.* Las tres imágenes corresponden al mismo sello, sin embargo la de la izquierda y la de centro muestra la vista interna de la bolsa y la de la derecha la externa.

Las transformaciones posteriores involucraron el cambio del adaptador terminal conduit hembra por a) un tapón roscado de presión, el cual a su vez b) fue perforado en la mitad y adherido a la manguera que lo atravesaba por ese agujero con cemento solvente para PVC, como lo muestra la figura 23. Cabe aclarar que una vez este se montó en la bolsa de polipropileno se probó con agua, identificando la ausencia de fugas.



**Figura 23***Tercer modelo de sello*

*Nota.* Las dos imágenes son del mismo modelo, sin embargo la de la izquierda presenta una vista externa de la bolsa y la de la derecha una vista interna.

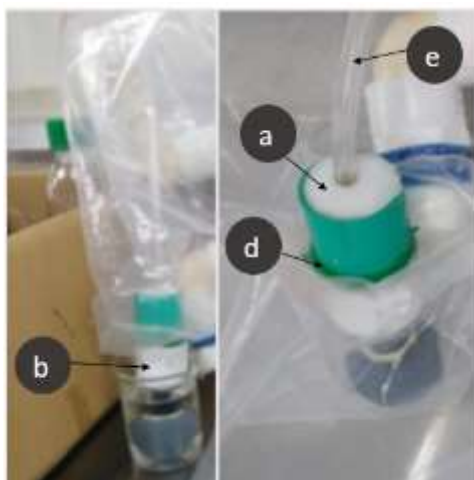
Los 4 sellos finales del FBR tuvieron configuraciones base similares a las mencionadas anteriormente y además dispusieron de un parche para reparación de piscina de 6.5 x 6.5 cm sobre la superficie de la bolsa donde fue enroscando el tapón de presión en el adaptador conduit, esto con el objetivo de evitar la ruptura de la bolsa en esas secciones de alta fricción. A continuación los detalles respectivos de cada cual:

- **Sello de suministro de gas:** Su configuración se ilustra en la figura 24. Se compuso por a) una mezcla de caucho de silicona - catalizador al interior del adaptador macho conduit, b) tapón de presión perforado en el centro por donde se introdujo el difusor y paralelamente se conectó la manguera de vinilo, c) ajuste de la conexión manguera - difusor aplicando dentro del tapón mezcla de caucho de silicona - catalizador hasta la mitad y simultáneamente dejando la otra sección libre para enroscar, además la sección

de unión externa del difusor y la tapa del tapón se reforzó con cemento solvente para PVC, d) dos empaques de goma  $\frac{3}{4}$ " y por último e) manguera de vinilo la cual ya había sido incrustada en el tapón, pero posteriormente se introdujo a presión en el centro del acople macho conduit.

### Figura 24

*Configuración final del sello de suministro de gas:*



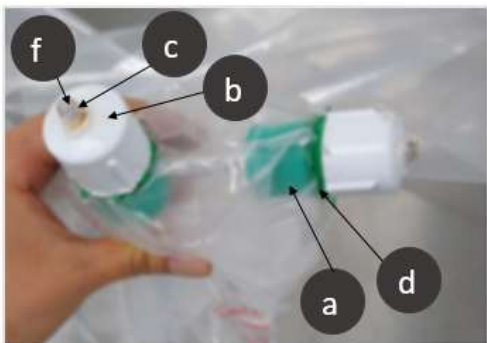
*Nota.* Ambas fotografías corresponden al mismo modelo, sin embargo la de la izquierda es una vista interna de la bolsa y la de la derecha una vista externa.

Cabe aclarar que debido a que este fue el empaque final, la piedra difusora fue introducida en una solución de agua e hipoclorito de sodio durante 5 minutos con el objetivo de remover cualquier microorganismo en ella y posteriormente fue pasada repetidas veces por agua para remover el olor de la solución.

- Sellos de suministro de líquido y salida de gas:** Estos dos sellos pese a ser usados con diferentes objetivos en el FBR tuvieron la misma configuración. Se compusieron por a) una mezcla de caucho de silicona - catalizador al interior del adaptador macho conduit, b) un tapón perforado en el centro por donde se introdujo la manguera de vinilo, adicionalmente c) la manguera dentro del tapón se pegó llenando el tapón con una mezcla de caucho de silicona - catalizador hasta la mitad y simultáneamente dejando un espacio libre para enroscar, también se reforzó la sección de unión entre la manguera y la tapa del tapón con cemento solvente para PVC, además se emplearon d) dos empaques de goma  $\frac{3}{4}$ ", e) manguera de vinilo la cual se introdujo a presión en el centro del acople macho y el tapón y por último, se aclara que f) el extremo de la manguera que salió del tapón tuvo una longitud de 0.5 cm, como se identifica en la figura 25.

**Figura 25**

*Configuración final de los sellos de suministro de líquido y salida de gas*



- Sello y sistema de salida del líquido:** La salida del líquido implicó la construcción de un sello directo a la bolsa y un sistema sifón acoplado al mismo. De ahí el sello se conformó por a) un adaptador macho a presión, b) un tapón perforado totalmente en la

tapa y c) dos empaques de goma para uso en lavaplatos, tal como se expone en la figura 26.

**Figura 26**

*Configuración final del sello de salida del líquido*



*Nota.* Ambas fotografías corresponden al mismo modelo, sin embargo la de la izquierda presenta una vista externa de la bolsa y la de la derecha una vista interna.

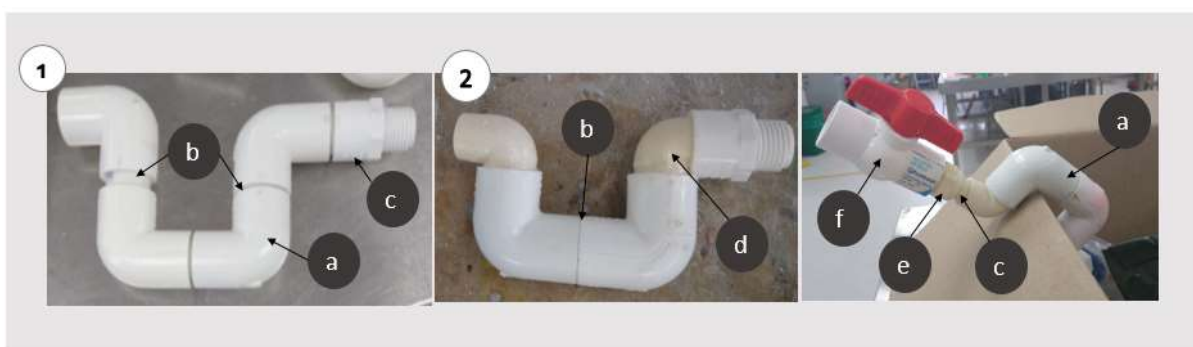
Por otra parte, el sistema sifón pasó por dos etapas de diseño tal como lo indica la figura 27, ambas con configuraciones similares y materiales variables; esto debido a que pese a que el primero no presentó fugas, su tamaño era mayor del esperado y al ubicarlo en forma de U invertida su altura superaba el nivel de la lámina de agua de FBR, mientras que el segundo tuvo un tamaño menor y cumplió efectivamente con la altura necesaria para mantener un nivel en la lámina de agua fija dentro del sistema.

Así pues la etapa 1 empleó a) cuatro codos, b) dos tubos de presión de 4 cm y uno de 4.5 cm, para unión entre codos c) un adaptador macho y cemento solvente PVC para unir las piezas. Por otra parte la etapa 2 muestra el modelo final del FBR, el cual se compuso por a) dos codos, b) un tubo de presión de 4 cm para unión entre codos, c) un tubo de ½" CPVC de 4

cm para unión codo-adaptador macho CPVC, d) dos codos CPVC de  $\frac{1}{2}$ " , e) un adaptador macho CPVC de  $\frac{1}{2}$ " y f) una válvula bola roscada de PVC humboldt  $\frac{1}{2}$  "; en adición se usó cemento solvente PVC para unir las piezas lisas respectivamente y teflon para las roscadas, igualmente previo a su unión con el FBR se realizaron ensayos con agua con el objetivo de verificar la ausencia de fugas.

**Figura 27**

*Etapa uno y dos del sistema sifón*



*Nota.* La fotografía de la izquierda representa la etapa uno, mientras que la del centro y la derecha son el proceso intermedio y la terminación de la etapa 2, es decir la configuración final.

## Generación de CO<sub>2</sub>

El protocolo de generación de CO<sub>2</sub> empleó una solución de 325 mL de agua + 60 gr de azúcar blanco a 50°C, seguido a esto se agitó hasta lograr una mezcla homogénea y una vez su temperatura disminuyó a 40°C se aplicaron 45 gr de levadura activa seca Levapan y se integraron a la solución revolviéndola. Seguido a esto se puso todo en una bolsa de polipropileno de 20 L sellada por un solo extremo, se le retiró el aire al recipiente manualmente

y se selló el otro extremo con calor. Por otra parte, la operación de la bolsa no requirió de mezcla adicional, tan solo de un espacio que mitigara la pérdida de calor de manera acelerada. Finalmente el proceso se repitió tres veces y consecuentemente se produjeron tres bolsas.

### **Toma de muestras del reactor**

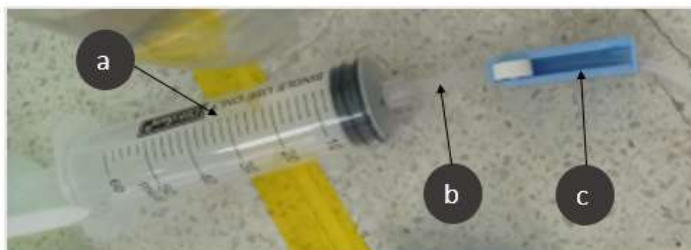
Durante la operación del FBR en batch y continuo se tomaron 13 muestras tanto gaseosas como líquidas, respectivamente. A continuación se enuncia el protocolo empleado para cada cual.

- **Muestras gaseosas**

Se tomaron 24 mL de gas por el conector de muestreo ubicado en la manguera de salida de gas del FBR, empleando a) una jeringa de 50 mL totalmente vacía acoplada a b) una manguera siliconada y está a su vez a c) una llave reguladora de venoclisis, como lo ilustra la figura 28.

**Figura 28**

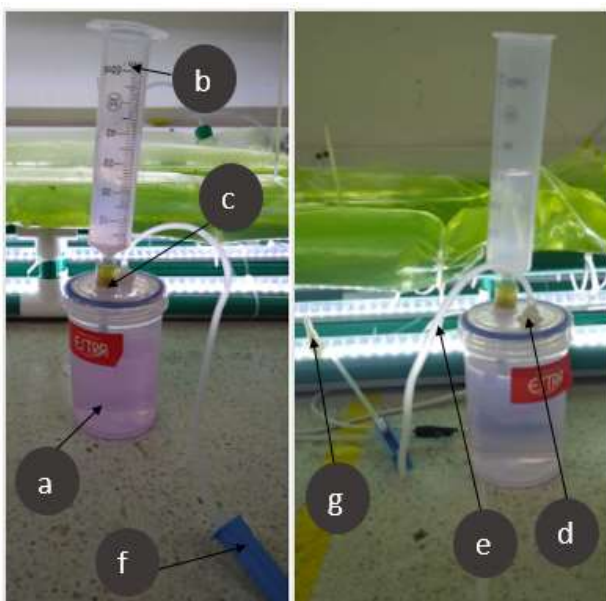
*Jeringa de muestreo de CO<sub>2</sub>*



Básicamente el extremo libre de la jeringa de muestreo se conectaba a la válvula para acuario de un instrumento que permitía medir la cantidad de CO<sub>2</sub> en la muestra por volumetría; su configuración a continuación: a) un recipiente redondo tapa rosca Twist 330 mL con una solución de 200mL de agua, NaOH 0.057N y fenolftaleína, b) una jeringa de 50 mL sin émbolo adherida a c) un soporte de corcho, el cual a su vez estaba unido en su interior a un tubo metálico de 4 cm, d) un soporte para venoclisis elaborado a partir de una mezcla de caucho de silicona - catalizador, e) una manguera de silicona con unión sólida en su extremo para conexión con soporte para venoclisis, f) llave reguladora de venoclisis y g) una válvula para acuario, tal como se muestra en la figura 29.

**Figura 29**

*Medidor volumétrico de CO<sub>2</sub>*



*Nota.* Ambas fotografías corresponden al mismo instrumento, tan solo que la de la izquierda es una vista frontal y la de la derecha una trasera.

Cabe aclarar que previo a la conexión entre la jeringa de muestreo de CO<sub>2</sub> y el medidor, la jeringa sin émbolo de este último debe ubicarse en una volumen cualquiera, normalmente en 10 mL, a partir de la manipulación de la presión hidrostática del sistema mediante el suministro de aire y el ajuste de la llave reguladora. De esta manera se logra cuantificar la diferencia de volumen y por ende la cantidad de CO<sub>2</sub> presente en la muestra (ver figura 30).



**Figura 30**

*Ajuste preliminar a la toma de muestras de CO<sub>2</sub> en el medidor volumétrico*



- **Muestras líquidas**

La figura 31 presenta el protocolo empleado durante los días examinados. Así pues se tomó 1) una muestra de 35 mL de medio líquido del FBR por la válvula de bola roscada de PVC en un tubo para centrifuga falcon de 45 mL, seguido a esto 2) se analizó pH y temperatura empleando un pHmetro HI 2212 Hanna Instruments; por otra parte, 3) se dispusieron 15 mL en un tubo para toma de muestras y 4) se midió absorbancia empleando un espectrofotómetro Thermo scientific genesys 20 a 675 nm.

**Figura 31**

*Protocolo para muestras líquidas*

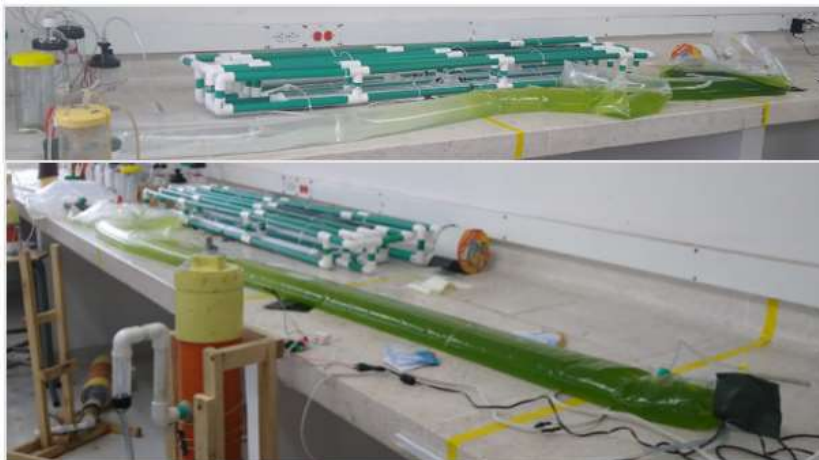


### Montaje del reactor en Batch

Para la instalación del reactor en batch se tomó la bolsa y se realizaron dos nudos consecutivos manualmente en el extremo donde se ubicó la salida del líquido, además el fragmento restante se dobló y envolvió hacia arriba con cinta Sika con el objetivo de garantizar que el líquido no se saliera. Además se cerró la válvula bola roscada de PVC, así como las válvulas de acuario de la manguera de salida de gas, entrada de líquido y entrada de gas, adicionalmente se pusieron 17.8 L de agua por el extremo abierto empleando una probeta graduada de plástico BRIXCO de 1000 mL, 2.2 L del inóculo y 80 mL de orina. Seguido a esto se sacó un poco el aire manualmente y se selló el otro extremo de la bolsa de la misma manera que el primero, como se muestra en la figura 32.

**Figura 32**

*Montaje inicial de FBR en Batch*



*Nota.* La fotografía superior muestra el extremo dónde se ubicó la salida del líquido, mientras que la de abajo corresponde al extremo donde se situaron la manguera de entrada de líquido y salida de gas

Seguido a esto el FBR se puso en la estructura de soporte en PVC, se sujetó con amarres plásticos, se encendieron las luces LED y se le conectó un compresor de aire para carro a la manguera de suministro de gas con la finalidad de llenar cerca del 50% del volumen restante con aire; además se tomó 1.4 L de CO<sub>2</sub> de una bolsa de almacenamiento y se suministró con una jeringa de 50 mL en 24 pulsos. De ahí, la figura 33 presenta el proceso de montaje culminado.

**Figura 33**

*Montaje final del FBR en Batch*



### **Montaje y operación del reactor en continuo**

Para comenzar con la operación continua se añadieron algunos componentes más con el objetivo de automatizar el sistema. En ese sentido la figura 34 presenta un módulo electrónico externo el cual se compuso por a) un arduino UNO R3 compatible con cable USB, b) un Módulo Relay dos Canales 5V Arduino, c) una bomba peristáltica para dosificar por pulsos medio líquido nuevo, d) una segunda bomba peristáltica para dosificar por pulsos CO<sub>2</sub>, dos adaptadores 12V-2A para las bombas peristálticas, una fuente 5V-1A para la alimentación del arduino, cables jumpers arduino y cable calibre 20 AWG, puesto que la bomba de CO<sub>2</sub> se ubicó a dos metros del módulo.

Adicionalmente se empleó e) una manguera de vinilo que salía de la bomba de líquido y conectaba a un conector hidráulico en T y este a su vez se unía a la manguera de suministro de líquido del FBR, f) 1 botella plastica 5L en dónde se almacenó la mezcla de orina + agua y por último g) una manguera de vinilo de conexión directa de la bomba de dosificación y el recipiente de almacenamiento de líquido.

**Figura 34**

*Módulo electrónico y componentes externos*



*Nota.* La fotografía de la izquierda corresponde al circuito electrónico de automatización del FBR, la del centro muestra las mangueras y recipiente de almacenamiento de la bomba de líquido y la de la derecha la bomba para suministro de CO<sub>2</sub>, ubicada junto a la manguera de entrada de gas.

El código guardado en el microcontrolador del arduino UNO se encuentra en el anexo 2, este se desarrolló, probó y guardó empleando la aplicación arduino IDE. Adicionalmente se programaron pulsos de 14 mL, con duración de 8 segundos e intervalos de 20 minutos, en el caso de la bomba dosificadora de líquido; así como, 8-10 mL por pulso para la bomba de suministro de CO<sub>2</sub>, con una operación de 4 segundos e intervalos de 10 minutos, dicho rango

de volumen debido a la incertidumbre identificada durante las pruebas de cuantificación. Para concluir, se aclara que las pruebas de volumen en función del tiempo para las bombas de CO<sub>2</sub> se probaron con aire y las de líquido con agua, empleando los medidores presentados en la figura 35.

**Figura 35**

*Instrumentos de medición de volumen durante las pruebas de las bombas peristálticas*



*Nota.* La fotografía de la izquierda es un medidor de líquido, mientras que la del centro y la derecha son una vista general y enfocada del medidor de gas.

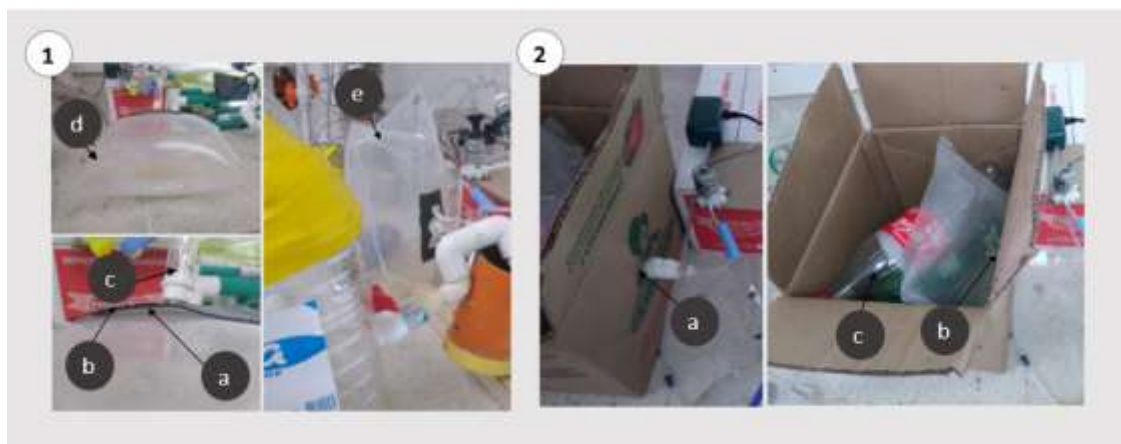
Una vez culminado el circuito electrónico, se llevó a cabo el montaje final para suministro de CO<sub>2</sub>, el mismo involucró dos ensayos, los cuales se ilustran en la figura 36. Durante el ensayo 1) se puso un fragmento de cinta doble faz marca Xin-Hui en la superficie de la bolsa a), encima de este un trozo de cinta Sika b), adicionalmente se tomó un venoclisis, se conectó mediante una manguera siliconada a la bomba de suministro de CO<sub>2</sub> y luego su punzón fue incrustado en el centro de la fracción de la cinta Sika c). Después se probó la posición de la bolsa, acostada totalmente sobre el mesón d) y parada, con cintas doble faz

sujetando los laterales de la cámara cuentagotas y un objeto en la parte trasera el cual ejercía presión y soporte a la bolsa para evitar el escape del gas e).

Por otra parte, durante el ensayo 2) simplemente se hicieron algunas modificaciones a la estructura de soporte ya presentada en la fase 1. Así pues se tomó una caja de cartón y se le hizo un orificio de 2 cm de diámetro por donde se incrustó y adhirió con silicona caliente la cabeza del sistema de ventilación del venoclisis, el cual al igual que el anterior se conectó mediante una manguera siliconada a la bomba de suministro de CO<sub>2</sub>, adicionalmente se cubrió su cámara cuentagotas con cinta doble faz con la finalidad de evitar fugas a). Por otra parte, a la bolsa de almacenamiento se le puso un fragmento de cinta Sika para sellos impermeables en la superficie y en el centro de este se puso una cura adhesiva redonda, luego se añadió silicona caliente sobre la cura y se procedió a insertar el punzón del venoclisis en el centro b). Por último se agregó pegante bóxer en la unión interna de la caja y la bolsa, así como dos botellas PET las cuales atravesaban la caja con el objetivo de ejercer presión a la bolsa y brindar soporte para evitar el escape del gas c).

**Figura 36**

*Ensayo uno y dos del montaje para suministro de CO2 del sistema continuo*



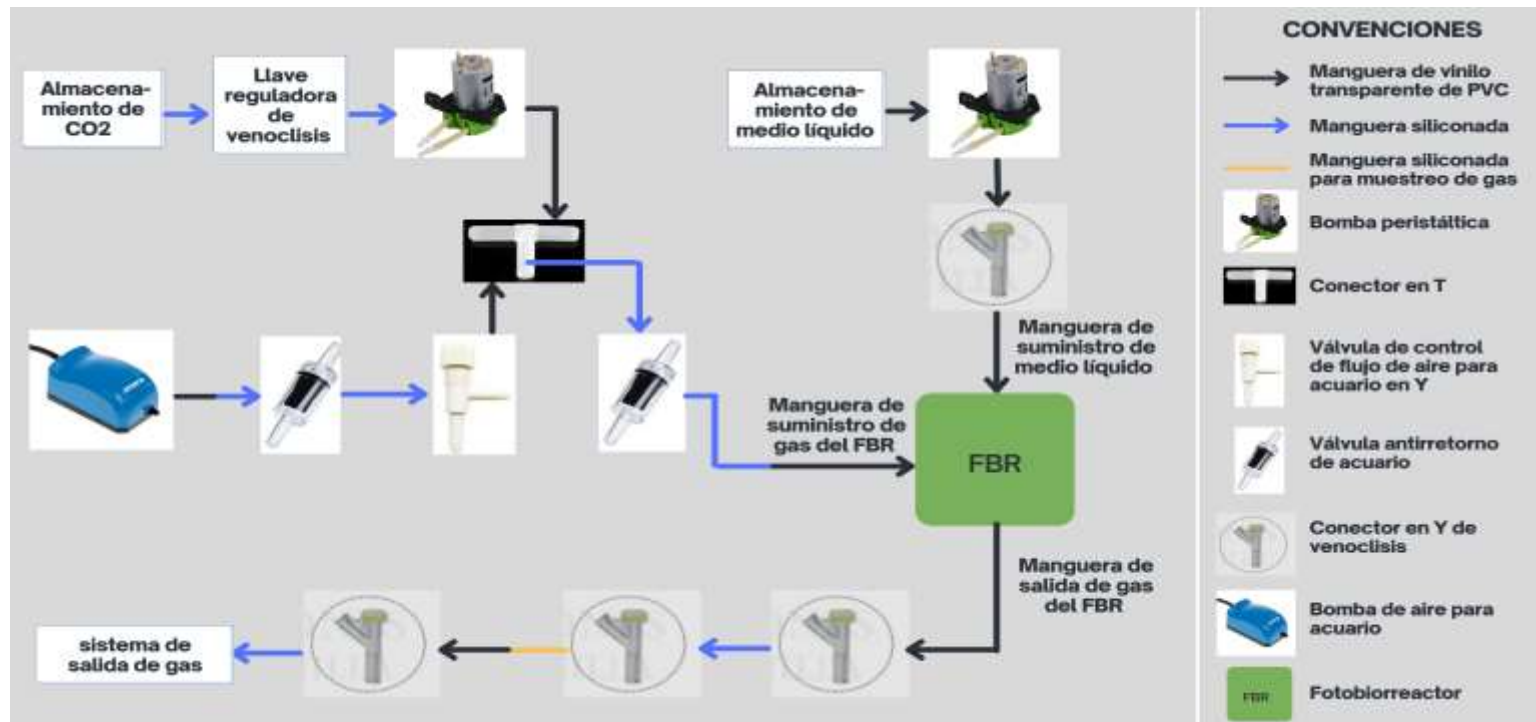
Nota. Las tres fotografías de la izquierda presentan vistas generales y enfocadas del primer ensayo, mientras que las dos de la derecha ilustran el segundo ensayo y/o montaje final dentro y fuera de la estructura de soporte.

Por otra parte, el sistema en general usó manguera para acuario siliconada y de vinilo transparente de PVC, además sustituyó la mayor parte de las válvulas de acuario usadas en la operación en batch por conectores directos y válvulas anti retorno, siguiendo la distribución presentada en la figura 37.



Figura 37

Conexiones hidráulicas del sistema operado en continuo



*Nota.* Las flechas que presentan dos tonalidades, responden a la unión directa (una entre otra) de las mangueras; El caudal de salida de aire de la válvula de control de flujo se fijó en 12.9 mL/ min con base en las pruebas realizadas con el medidor de gas de la figura 33, posteriormente la válvula se inmovilizó con pegante bóxer.

Por otra parte, se elaboró un recipiente de almacenamiento del líquido que salía de FBR por el sistema sifón, el mismo se compuso por a) dos botellas plásticas de 5L, b) dos adaptadores de presión macho, c) 1 tubo de presión de 7 cm, d) 2 empaques de goma para uso en lavaplatos, e) una capa de cinta doble faz transparente y encima cinta aislante para cerrar los cortes previamente hechos a la botella y finalmente f) un agujero de 2.5cm de diámetro por donde se apoya la válvula de bola roscada que sale de FBR, como lo ilustra la figura 38.

**Figura 38**

*Recipiente de almacenamiento del líquido de salida del sistema continuo*



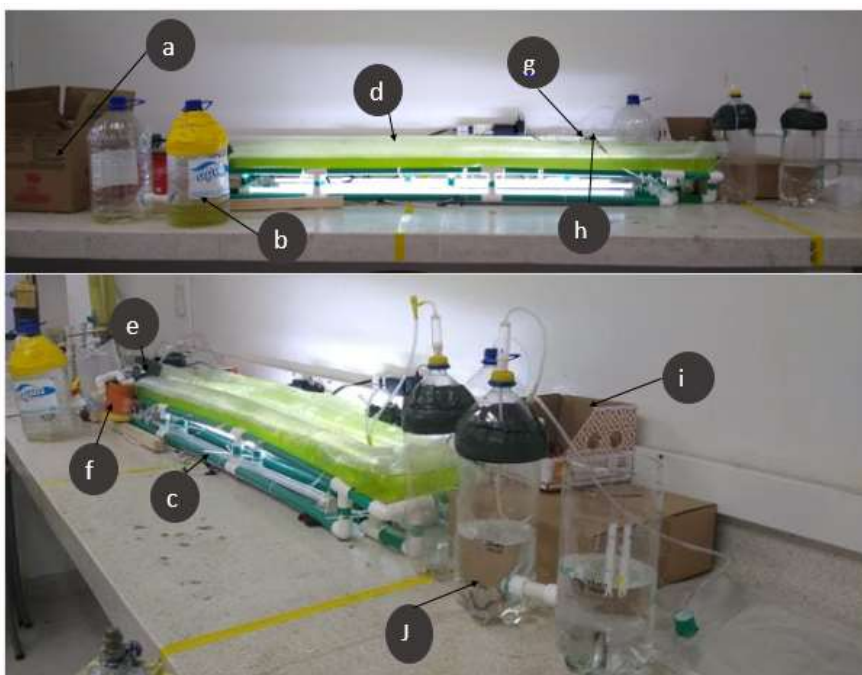
*Nota.* La fotografía de la izquierda corresponde a la vista frontal y la de la derecha es una vista lateral de sistema.

Por último, se hizo el ensamble de cada uno de los componentes descritos anteriormente para el sistema continuo. La figura 39 presenta cada una de sus partes: a)

sistema para suministro de CO<sub>2</sub>, b) recipiente de almacenamiento del líquido de salida, c) estructura soporte, d) FBR, e) entrada de gas, f) salida de líquido, g) entrada de líquido, h) salida de gas, i) módulo electrónico de control y j) sistema de salida de gas.

**Figura 39**

*Montaje final del FBR operado en continuo*



*Nota.* Ambas fotografías presentan el mismo sistema, sin embargo la de arriba es una vista frontal, mientras que la de abajo presenta una vista lateral.

## Resultados y discusión de resultados

### Diseño y construcción

Durante el diseño y elaboración del reactor se delimitó el desarrollo de un sistema cerrado puesto que el mismo permite cultivar una sola cepa de microalga, un control superior de las variables del medio, así como mayor productividad celular y rendimiento en el uso y fijación del CO<sub>2</sub> inyectado, comparado con los sistemas abiertos (Cajamar caja rural, 2016). Adicionalmente se definió tipo tubular debido a que resulta ser la configuración más conveniente y factible para el cultivo masivo en campo considerando una disponibilidad relativamente alta de iluminación (Huang et al., 2017), (Cheng et al., 2019). Por otra parte, se fijó una orientación horizontal, ya que presenta una mayor relación superficie-volumen comparado con los FBR verticales los cuales necesitan un diámetro mínimo; además, el ángulo de incidencia de la luz en esta configuración es más eficiente para la captación de la intensidad de la luz, lo que consecuentemente permite un cultivo autotrófico y además reduce el uso de fuentes de luz alterna al construirlo y operarlo en exteriores (Wang et al., 2012) .

Se sabe que normalmente los FBR verticales poseen una menor área de contacto líquido-gas comparado con los horizontales, sin embargo logran un suministro continuo de gas, lo que genera una mezcla y transferencia de CO<sub>2</sub> eficiente (Miyamoto et al., 1988). Por tanto, parte de la contribución del presente proyecto de investigación refiere a la modificación de la configuración convencional de los reactores horizontales, partiendo de su ventaja respecto al área de contacto líquido-gas, al disponer de equivalencia en volumen de líquido y gas dentro del FBR, así como la aplicación de una pendiente entre niveles horizontales provista por las

curvas de conexión, cuyo propósito fue favorecer las condiciones de mezcla y el suministro efectivo de gas. A continuación se describen los cálculos y delimitaciones técnicas del sistema:

- **Pendiente de la estructura de soporte del FBR**

Durante este proceso se aplicaron dos pendientes diferentes. Para el primer modelo se asumió una equivalente a 26.8%, mientras que a partir del segundo modelo hasta el modelo final, se fijó una elevación del 3.1% (ver ecuación 1). Varios autores mencionan que el uso de pendientes entre el 2 y el 7% genera un aumento del coeficiente de transferencia de gas y del TRH, así como como la disminución en el tiempo de mezcla (Tredici & Zittelli, 1998), (Ávila León, 2014).

$$P = \frac{\Delta h}{Dh} = \frac{0.05 \text{ m}}{1.60 \text{ m}} \times 100 = 3.1\% \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

P: Pendiente

$\Delta h$ : Diferencia de altura

$Dh$ : Distancia horizontal

- **Longitud útil de la bolsa del FBR**

Se empleó una bolsa de diámetro 0.15 m, sin embargo se identificó que una vez llena de fluido la misma posee pérdidas de volumen en sus laterales, por lo que se asumió un diámetro real de 0.1m. La ecuación 2 presenta su dimensionamiento.

$$L(\text{útil}) = \frac{V}{\pi \times R^2} = \frac{0.04 \text{ m}^3}{\pi \times (0.05 \text{ m})^2} = 5.09 \text{ m} \approx 5.1 \text{ m} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

L (útil): Longitud útil

V: Volumen

R<sup>2</sup>: Radio elevado al cuadrado

- **Longitud de la estructura de soporte del FBR**

Una vez definida la longitud útil de la bolsa, se delimitó que la estructura de soporte tendría 5.7 m, con la finalidad de dejar un borde libre de 0.6 m. Por tanto, se construyeron 3 brazos y 2 curvas de interconexión en PVC, cada cual simulando los extremos de una estructura de soporte en media caña. Los brazos 1, 2 y 3 tuvieron una longitud horizontal de 1.64m, 1.64m y 1.62m respectivamente, mientras que cada curva midió 0.235m, conservando un ángulo de 90° durante su expansión, lo que minimizó el estrangulamiento de la bolsa pese a los dobleces. Finalmente la longitud vertical de cada brazo fue de 0.08 m, 0.085 m y 0.09 m.

- **Concentración de CO<sub>2</sub> para el montaje en batch y en continuo**

Se suministró una mezcla 7% v/v de CO<sub>2</sub>, puesto que *C. Vulgaris* logra concentración final y productividad máxima de biomasa en un rango de 6 a 10% de CO<sub>2</sub> (Anjos et al., 2013) e inhibición entre 10 y 15% v/v de CO<sub>2</sub> (Chiu et al., 2008).

- **Bolsa de almacenamiento del sistema de salida de gas**

Se diseñó con el objetivo de capturar al menos 40 L, equivalentes a 2 días. Por tanto, tuvo un largo útil de 0.7m (sin borde sellado con calor) x 0.27 m de diámetro. Su dimensionamiento se realizó empleando la ecuación 3.

$$L(\text{útil}) = \frac{V}{\pi \times R^2} = \frac{0.04 \text{ m}^3}{\pi \times (0.135 \text{ m})^2} = 0.698 \text{ m} \approx 0.7 \text{ m} \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

L(útil): Longitud útil

V: Volumen

R<sup>2</sup>: Radio elevado al cuadrado

- **Bombas peristálticas para suministro de medio líquido y CO<sub>2</sub> durante la operación en continuo**

Partiendo de un volumen total de 40 L, una distribución del mismo entre gas y medio líquido dentro del FBR de 20 L respectivamente, así como que la operación por pulso de las 2 bombas peristálticas, se desarrollaron los siguientes cálculos:

**a) Bomba peristáltica de suministro de medio líquido**

$$Q = \frac{V}{T} = \frac{20 \text{ L}}{20 \text{ d}} = 1 \text{ L/d}$$

$$\diamond 1 \text{ d} = 24 \text{ h} = 86400 \text{ s}$$

$$\diamond 1 \text{ pulso de } 8 \text{ s} = 14 \text{ mL de medio líquido}$$

$$\diamond \text{Tiempo de descanso de la bomba} = 20 \text{ min} = 1200 \text{ s}$$

$$\frac{\text{Pulsos}}{\text{día}} = \frac{86400 \text{ s}}{1200 \text{ s}} = \frac{72 \text{ pulsos}}{\text{d}}$$

**Verificación:**

$$Q = 72 \text{ pulsos} \times 14 \text{ mL} = 1.008 \text{ mL} = 1,008 \text{ L/d}$$



**b) Bomba peristáltica de suministro de CO<sub>2</sub>**

$$Q = \frac{V}{T} = \frac{1.4 L}{1 d} = 1.4 L/d$$

$$\diamond 1 d = 24 h = 86400 s$$

$$\diamond 1 \text{ pulso de } 4 s = 8 \text{ a } 10 \text{ mL de CO}_2$$

$$\diamond \text{Tiempo de descanso de la bomba} = 10 \text{ min} = 600 s$$

$$\frac{\text{Pulsos}}{\text{día}} = \frac{86400 s}{600 s} = \frac{144 \text{ pulsos}}{d}$$

**Verificación:**

$$Q = 144 \text{ pulsos} \times 8 \text{ mL} = 1152 \text{ mL} = 1,15 L/d$$

$$Q = 144 \text{ pulsos} \times 10 \text{ mL} = 1440 \text{ mL} = 1,44 L/d$$

Donde:

Q: Caudal

V: Volumen

T: Tiempo

## Análisis de muestras

- **Temperatura**

La transferencia de calor al FBR se proporcionó a la par con el sistema de suministro de luz, teniendo una distancia vertical entre las lámparas LED y el FBR de alrededor de 2 cm. La tabla 8 presenta el comportamiento de la temperatura durante la puesta en marcha, exponiendo específicamente los valores máximos, mínimos, la mediana y el promedio durante la operación en batch y en continuo, respectivamente.

**Tabla 8**

*Análisis de la temperatura (°C) durante la operación del FBR*

	Operación	
	Batch	Continuo
Maximo	22,0	20,5
Minimo	18,2	19,5
Promedio	20,3	19,9
Mediana	20,2	19,7

De lo anterior se identificó que el ingreso y la salida de medio líquido nuevo tuvo una muy leve incidencia en la pérdida de temperatura, teniendo en cuenta que la diferencia entre el promedio y la mediana para ambas operaciones es de tan solo 0.4 y 0.5°C, respectivamente. Sin embargo es importante clarificar que este valor está sujeto a incertidumbre por pérdidas de

calor, debido a que los valores no se tomaron con un sensor de temperatura directamente en el reactor, sino en las muestras líquidas periódicas empleando un pHmetro.

Adicionalmente se observó que el uso de lámparas LED tubulares resultó altamente beneficioso, por sus propiedades de resistencia al agua en la mayor parte de su estructura, a excepción de los conectores, así como por su independencia del FBR, al estar ancladas a la estructura de soporte. Por otra parte, aunque en las curvas hay ausencia de suministro de luz, el diseño contempló longitudes allí relativamente bajas, así como la influencia de los procesos convectivos, los cuales favorecieron la distribución uniforme de la temperatura en el sistema aún en los lugares en donde no había suministro de luz (Britannica, 2019).

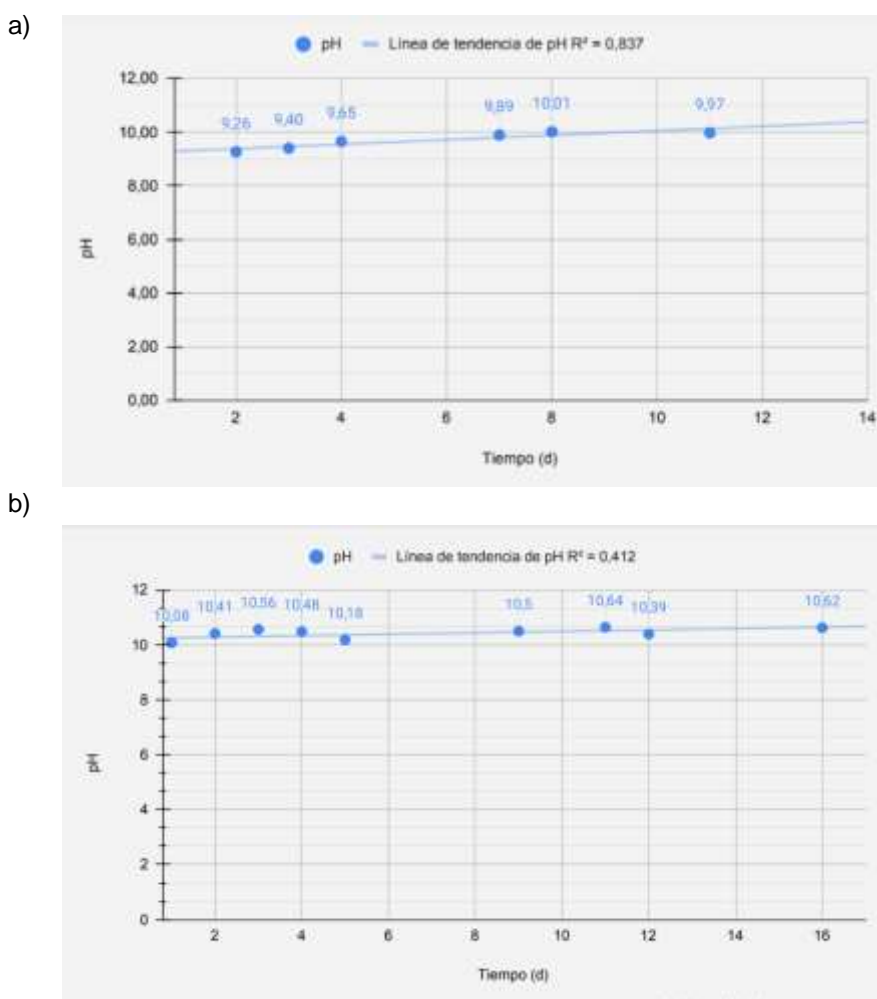
Por otra parte, estudios señalan que 20-30°C es un rango óptimo para el crecimiento de las microalgas en general (Sánchez-Borroto et al., 2019), (Singh & Singh, 2015). Además se dice que *C. Vulgaris* posee una temperatura óptima de crecimiento entre 25 - 28°C (Pawlitka-Posmyk et al., 2018), 23.3°C (Serra-Maia et al., 2016), un valor semejante al obtenido durante la preparación del inóculo del presente trabajo. Por último, una investigación señala que al evaluar el crecimiento de 14 cepas de *Chlorella*, las temperaturas que sobrepasan 26°C - 30°C afectan el crecimiento de esta microalga (Kessler, 1985). Con base en lo anterior, se identificó que el sistema proporcionó una temperatura aproximada de 20-22°C, lo cual pese a que permitió crecimiento, aún no cumplió con el rango óptimo para la maximización en la producción de biomasa ( $\approx$  23-25°C), lo que incide indirectamente en la remoción de CO<sub>2</sub> del sistema.

- pH

La figura 40, presenta los resultados periódicos de pH obtenidos del muestreo líquido durante la operación consecutiva del FBR en batch y en continuo.

**Figura 40**

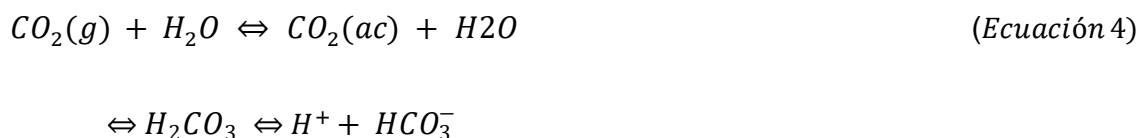
*Relación pH vs Tiempo (d)*



*Nota.* Operación en a) batch y b) continuo.

De acuerdo a los resultados obtenidos se identificó que durante la operación en batch hubo un aumento en el pH durante los 9 primeros días, posteriormente una disminución de 3 días y nuevamente se elevó para el día del muestreo final. Por otra parte, a lo largo de la operación en continuo el pH tuvo valores similares de rango 10 - 11 con una tendencia de comportamiento ascendente.

García-Gozalbes y col. (2015) enuncian que la fotosíntesis de las microalgas en un medio de cultivo dirige a un aumento gradual y paulatino del pH en consecuencia al equilibrio químico de especies carbonatadas en el agua. Así pues, a lo largo de la fase luminosa de la fotosíntesis las microalgas asimilan el CO<sub>2</sub>, este al disolverse en agua forma ácido carbónico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), el cual a su vez genera iones hidronio (H<sup>+</sup>) y bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), como lo muestra la ecuación 4:



Así mismo el ion bicarbonato en presencia de agua se disocia en iones hidronio (H<sup>+</sup>) e iones carbonato, como lo presenta la siguiente ecuación:



De esta manera se identifica que cuando un cultivo de microalgas se encuentra en fase exponencial de crecimiento, el gasto de CID ( $CO_2$ ,  $H_2CO_3$ ,  $HCO_3^-$  o  $CO_3^{2-}$ ) genera un desplazamiento de los equilibrios presentados en la ecuación 4 y 5, orientado a la reducción en la concentración de iones hidronio y por ende en un aumento del pH.

Por tanto, los valores de pH obtenidos sugieren actividad fotosintética durante la mayor parte de la operación del reactor y paralelamente concuerdan con los resultados expuestos por (Tang et al., 2011) y (García-Gozalbes et al., 2015)

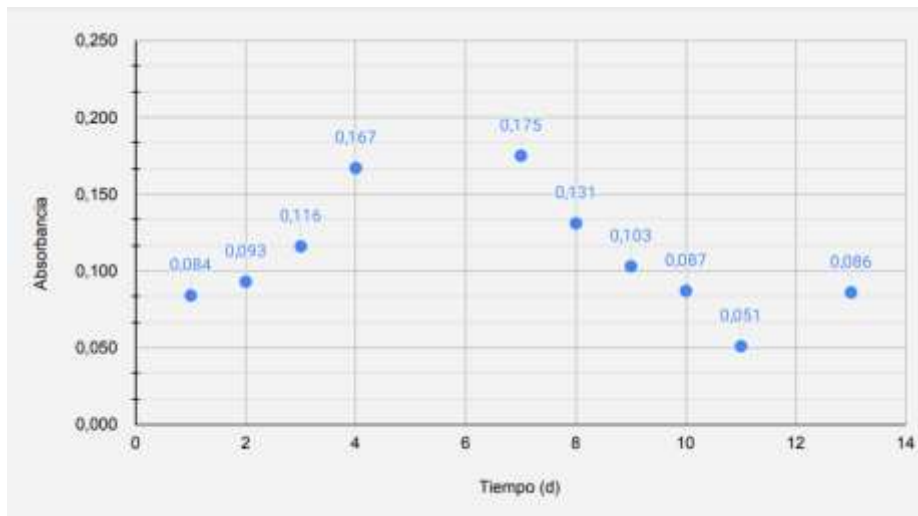
- **Absorbancia y volumen de CO<sub>2</sub> en la muestra**

La figura 41, presenta los resultados periódicos de absorbancia obtenidos del muestreo líquido durante la operación consecutiva del FBR en batch y en continuo.

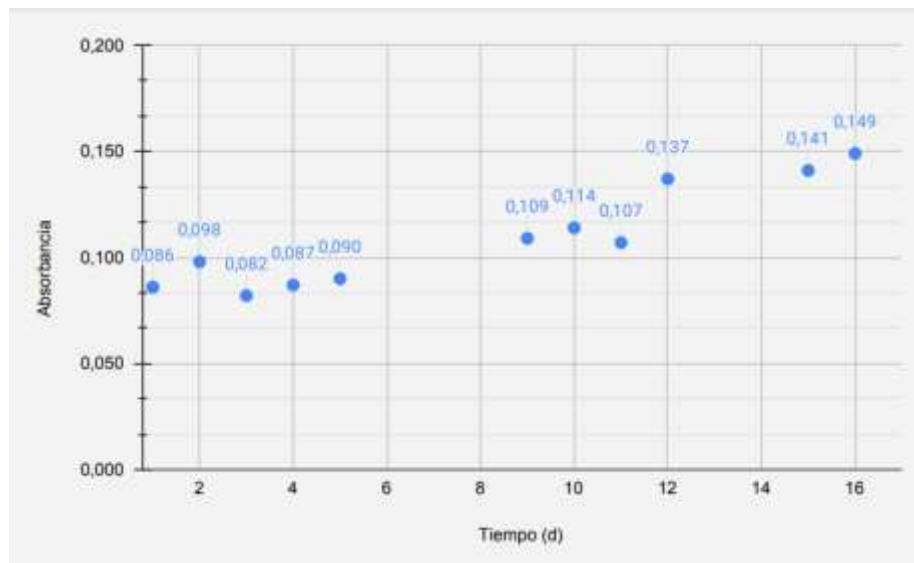
Figura 41

Cambio de la absorbancia vs Tiempo (d)

a)



b)



Nota. Operación en a) batch y b) continuo.

Se identificó que el reactor en Bach durante los primeros siete días tuvo una tendencia de crecimiento marcada, seguido por un descenso que duro 7 días y un leve crecimiento

durante el día final. Mientras que, a lo largo de los 16 días de operación del sistema continuo la curva siempre mantuvo una conducta de aumento. Es posible que lo anterior se deba a diferentes factores, como la modificación de la configuración y operación del sistema (suministro continuo de gas y líquido, acople del sistema de salida de gas, el cambio de las conexiones hidráulicas, la compensación del aire perdido usando un compresor para carro, la homogenización manual del sistema previo a la toma de muestras líquidas (condiciones aplicadas únicamente a la operación continua)), así como la presencia de una posible fuga.

La operación en batch y en continuo fueron dos procesos consecutivos del mismo reactor, los cuales pese a compartir la estructura de soporte, fuente de luz e incluso el inóculo, tuvieron diferentes configuraciones. A diferencia de la operación en continuo, el montaje inicial en batch presentó varias deficiencias las cuales no fueron corregidas durante su puesta en marcha, sino durante la operación en continuo. De ahí, factores como el suministro inicial de aire y medio líquido únicamente, el carácter deficiente de la mezcla durante el tiempo, la falta de comprobación de ausencia de fugas en el FBR y el uso exclusivo de válvulas de control de flujo de aire para acuario en las mangueras del FBR para dar hermeticidad al sistema, son agentes que explican su comportamiento durante la operación (ver figura 42).

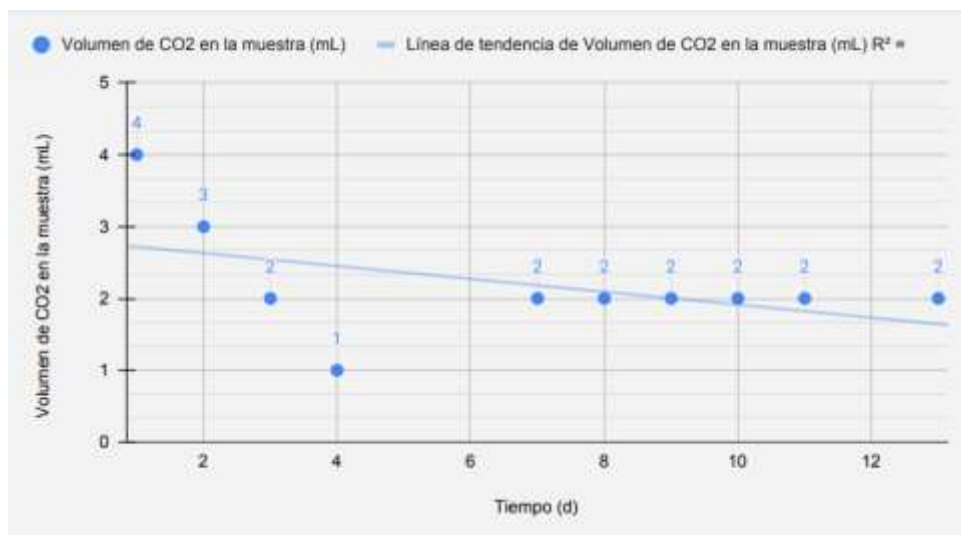


**Figura 42***Operación FBR en Batch*

Es posible que el ascenso del crecimiento celular de los primeros 7 días en batch y su posterior disminución se relacione con la deficiencia en nutrientes, puesto que durante el montaje inicial se suministraron 80 mL de orina correspondientes a 8 días, sin embargo este tuvo una operación de 13 días hasta que se empalmó con el sistema continuo. Por otra parte, conociendo que la piedra difusora de gas estaba totalmente sumergida en el líquido durante la inyección de aire y CO<sub>2</sub> inicial, puede que el suministro rápido, continuo, a contracorriente y con una presión importante al emplear tanto un compresor de carro para suministro de aire, así como una jeringa de 50mL para el CO<sub>2</sub>, haya aumentado la fuerza motriz y por ende la transferencia de masa de CO<sub>2</sub> al agua, tal como lo sugiere (Meier et al., 2015). Esto a su vez, explica el comportamiento lineal y paulatino de descenso del CO<sub>2</sub> en la fase gaseosa presente durante los primeros 4 días, como lo ilustra la figura 43.

Figura 43

Comparación volumen de CO<sub>2</sub> en la muestra (mL) vs tiempo (d) durante la operación en Bach



Entre el día 7 y 13 se evidenció un valor constante de 2 mL de CO<sub>2</sub> en la muestra gaseosa y mayoritariamente descenso en el crecimiento celular, lo que posiblemente se debe a la caída de la disolución del CO<sub>2</sub> en el agua ocasionado por las condiciones de mezcla deficientes, característico de un flujo laminar en donde el agua da la impresión de estar quieta (Pérez & Restrepo, 2008). La figura 44 presenta el monitoreo visual del FBR durante su operación, de ahí se identifica que la toma de muestras era poco representativas debido a la no homogeneidad del cultivo tanto en la fase líquida como en la fase gaseosa, además que ciertamente la mezcla insuficiente ocasiona varios de los fenómenos observados, entre estos la formación de zonas muertas, procesos de sedimentación celular en las secciones que cayeron en medio de la estructura de PVC, así como formación de biopelículas sobre algunos lugares de la superficie de la bolsa de polipropileno, lo que concuerda con lo mencionado por (Huang et al., 2017) .

**Figura 44**

*Monitoreo visual del FBR durante la operación en Batch*



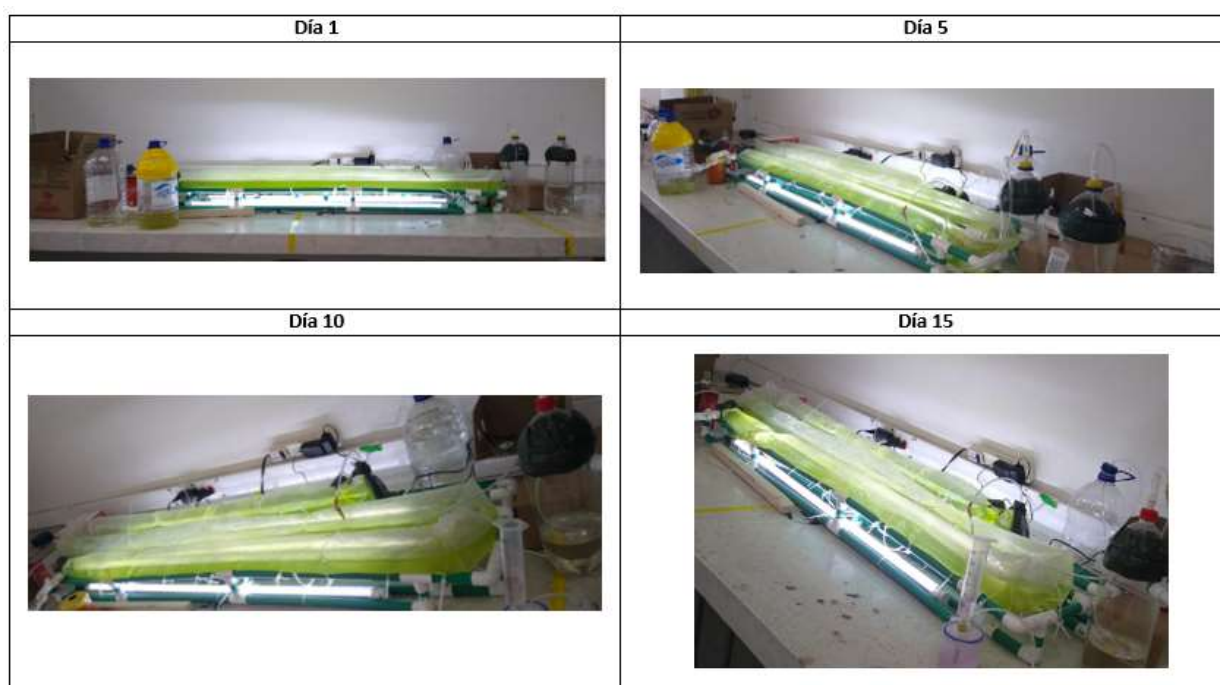
*Nota.* Las fotografías presentan las condiciones de a) no homogeneidad líquida y gaseosa, b) formación de biopelículas en la superficie del FBR, c) sedimentación y posibles zonas muertas y d) partículas suspendidas y sedimentadas.

Por otra parte, durante la operación en continuo del FBR se identificó una tendencia de crecimiento durante los 16 días de operación. Esto a diferencia de la puesta en marcha anterior tuvo un suministro constante a lo largo del día tanto de medio líquido nuevo como de mezcla aire - CO<sub>2</sub>; además, logró mantener la presión hidrostática del FBR por alrededor de 3 y/o 4 días, lo que difiere a lo ocurrido en la operación en batch.

La figura 45 presenta un compilado del monitoreo visual del FBR durante su puesta en marcha. De ahí se observó que el sistema logró permanecer más tiempo inflado, se mitigó la presencia de zonas muertas y la formación de biopelículas; no obstante, la sedimentación persistió. Lo anterior se debe a la identificación de las limitaciones del sistema en batch, así como la superación de las mismas mediante modificaciones en configuración y operación; por tanto, al sistema en continuo se acopló el sistema de salida de gas, el cual permitió conservar durante más tiempo ( $\approx$  3-4 días) la presión hidrostática, almacenar una parte del gas de salida y mantener la proporción área de contacto líquido-gas, además se reemplazó la mayor parte de las válvulas de control de flujo de aire y las mangueras de vinilo transparente para acuario por conectores directos, válvulas anti retorno y manguera siliconada, lo que disminuyó la probabilidad de infiltración y/o escape de gas al sistema.

**Figura 45**

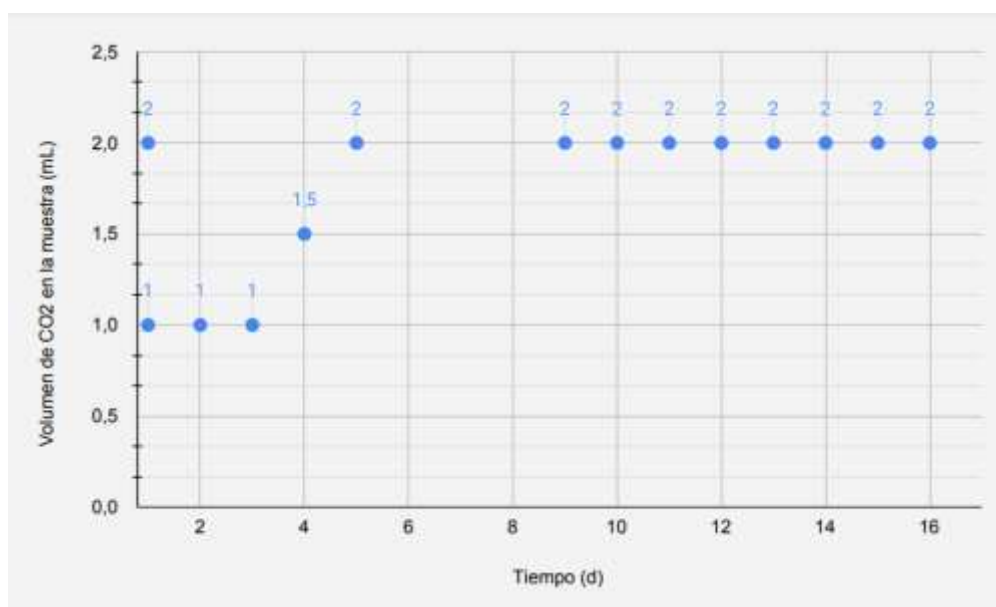
*Operación FBR en continuo*



Por otra parte, la figura 46 presenta el comportamiento del volumen de CO<sub>2</sub> durante el tiempo para esta operación. En este sentido, se identificó que durante el muestreo inicial o de empalme este fue equivalente a 2mL, transcurridos 30 minutos del día 1 hasta el día 4 se mantuvo entre 1 y 1.5 mL de CO<sub>2</sub>, sin embargo posteriormente permaneció en 2 mL.

**Figura 46**

*Comparación volumen de CO<sub>2</sub> en la muestra (mL) vs tiempo (d) durante la operación en continuo*



De lo anterior se identifica que es posible que la adición de la mezcla de aire inicial realizada con un compresor para carro durante 20 minutos, haya aumentado el movimiento y la presión del sistema y en consecuencia la transferencia de masa CO<sub>2</sub> – medio líquido; de hecho varios autores concuerdan con esto, Adnan y col. (2020) indicando que la presión incide en el aumento de la solubilidad del CO<sub>2</sub> en el agua y Ceaza (2018) refiere que precisamente el equilibrio de CO<sub>2</sub> existente entre la interface océano - atmósfera está notoriamente afectado

por la fotosíntesis, respiración, el movimiento de las olas y la temperatura de la superficie oceánica. Esto puede explicar la disminución inicial del CO<sub>2</sub> en la fracción gaseosa por disolución, afectado principalmente por el aumento de movimiento y la presión en el sistema.

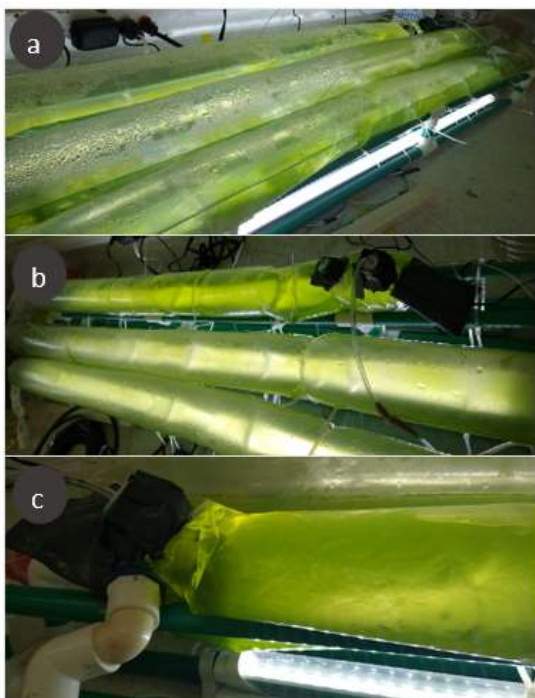
Por otra parte, a partir del quinto día se observó un comportamiento constante de 2 mL de CO<sub>2</sub> en la fracción gaseosa y una persistencia en la tendencia de crecimiento celular. Esto sugiere que es posible que la adición de la mezcla de CO<sub>2</sub> y aire así sea en un caudal bajo pero frecuente y constante, favorezca su disolución en el agua y por ende su aprovechamiento por las microalgas, lo que concuerda con el incremento del pH, propio de actividad fotosintéticos (García-Gozalbes et al., 2015). Adicionalmente la mezcla manual previa a la toma de muestras con el objetivo de aumentar la homogeneidad de la misma y el eventual suministro de aire tras pérdidas de volumen en la fracción gaseosa, permitió un ligero aumento en el movimiento del medio, lo que puede estar relacionado a su vez con el aumento en la disolución del CO<sub>2</sub>, el crecimiento de biomasa microalgal, una leve reducción del gradiente de temperatura y una eventual disminución de generación de biopelículas en la superficie del FBR, lo que es acorde a lo mencionado por (Huang et al., 2017).

La figura 47 presenta el monitoreo visual del FBR durante su operación en continuo. De ahí, se observó a) crecimiento y sedimentación celular bajo persistencia del flujo laminar y condiciones de mezcla deficientes, b) un eventual aumento en biomasa (reconocido por la coloración verde predominante) en el brazo horizontal donde se ubicó el suministro de medio líquido nuevo y nutrientes, comparado con los otros dos brazos, así como que c) la mezcla manual previa a la toma de muestras líquida permitió mayor homogeneidad y en consecuencia

una muestra significativa para la estimación de crecimiento celular comparada con las tomadas en batch.

**Figura 47**

*Monitoreo visual del FBR durante la operación en continuo*



*Nota.* Las fotografías son del mismo sistema, sin embargo la a) presenta ausencia de mezcla, mientras que la b) y la c) se tomaron tras mezcla manual, previas a la toma de muestras periódicas.

Por último, es importante mencionar que durante ambas operaciones se identificó una pérdida de gas en el sistema pese a los cambios estructurales realizados en la configuración, lo que sugiere la presencia de una fuga y por ende impide una cuantificación exacta del volumen de CO<sub>2</sub> dentro del sistema.

## Conclusiones

De acuerdo al desarrollo del presente trabajo de investigación, se construyó el FBR de micro algas con el TRH y el volumen establecido en los parámetros de diseño, además se lograron integrar materiales de bajo costo (ver anexo 3), fácil acceso y vida útil prolongada en su mayoría durante el diseño y construcción. Lo más costoso fue el arduino UNO R3 y las dos bombas de dosificación del módulo electrónico externo operado en el sistema continuo. Sin embargo, podría hacerse más económico el proyecto si se imprimen y ensamblan las bombas en 3D en el laboratorio, lo cual pese a que disminuye su fácil acceso, podría incrementar su vida útil, viabilidad económica y rendimiento en el tiempo, comparadas con las bombas aplicadas.

El proceso de diseño, construcción y delimitación de materiales tuvo un enfoque iterativo, con el objetivo de identificar las condiciones idóneas de la estructura de soporte, los sellos de entrada y salida de medio líquido y gas, el sistema sifón, el sistema de salida de gas, la resistencia de los materiales, las conexiones hidráulicas, la automatización del sistema mediante la programación de las bombas, la incidencia del suministro de gas y líquido, condiciones de mezcla, temperatura e incluso la toma de muestras del FBR.

Los resultados de la puesta en marcha en batch y continuo, así como la evaluación de remoción del CO<sub>2</sub> no son del todo análogos debido a que sus condiciones operativas fueron distintas. Básicamente la operación en batch fue el insumo que sirvió para la identificación y aplicación de algunos de los parámetros de mejora que debían emplearse al sistema en



continuo, así como para la delimitación de las recomendaciones para las fases posteriores del proyecto.

Durante el montaje del sistema en batch se identificó que la pendiente del 3.1% favoreció un poco la homogenización, la mezcla inicial del líquido en el FBR, así como una distribución equivalente de las fases pese a las diferencias de altura de cada brazo horizontal. Sin embargo durante su operación se observó que el uso de válvulas de control de flujo de aire para acuario y la ausencia de verificación de fugas de gas en la bolsa, son condiciones que limitan la hermeticidad total del sistema y por ende su evaluación. Además, la mezcla deficiente, la pérdida de área líquido-gas debido al escape del gas y la poca transferencia de masa líquido-gas por la persistencia del flujo laminar al no inyectar ni gas ni líquido durante la mayor parte de la operación, son condiciones que restringen el crecimiento de las micro algas.

## Recomendaciones

El uso de bolsa de polipropileno de alta densidad para el FBR resultó un poco complejo durante la construcción y el montaje ya que es propensa a rupturas, por lo que la adición de un parche de piscina fue una solución económica y pronta para evitar el escape del líquido. No obstante, puede que alguna fisura mínima permita el escape de gas y su fuga sea casi que imperceptible. De ahí, se recomienda realizar pruebas con plástico para invernadero, teniendo en cuenta sus propiedades de resistencia, trabajo en exteriores, regulación de rayos UV según su tipo, etc. Es importante aclarar que debe hacerse la búsqueda comercial de este tipo de plástico en forma tubular y de no encontrarse se puede optar por formar la geometría mediante vulcanización, por ejemplo.

Durante la construcción del FBR se sugiere dejar el difusor (del sistema de suministro de gas) lo más alejado posible de las paredes del FBR, debido a que por las vibraciones persistentes tiende a romper la bolsa con el tiempo. Además, en el ensamble del sistema de salida de líquido se recomienda calcular y probar una distancia óptima al sello de suministro de gas, de tal manera que el sistema sifón funcione totalmente horizontal y no inclinado. Por último, teniendo en cuenta el costo de la cinta para sellos impermeables Sika usada en los extremos de la bolsa, se propone sustituirla por caucho de bicicleta, lo que resulta eficiente técnicamente y disminuye los costos de inversión.

Por otra parte, durante la operación del FBR se recomienda verificar la ausencia de fugas de gas en los sellos directos, el uso principalmente de manguera siliconada y la menor

cantidad de conectores directos y/o válvulas de control de flujo de aire para acuario, esto para reducir las pérdidas por accesorios e incluso el escape del gas del sistema. Además, teniendo en cuenta el escalado del FBR se sugiere el estudio y prueba de mayores inclinaciones en la estructura de soporte con el objetivo de reducir el área de ocupación en campo.

Respecto a la temperatura se identificó que el uso de tubos LED resulta conveniente para su suministro, así como el de luz. Sin embargo se sugiere ubicar algún tipo de material impermeable sobre el conector lámpara-base, con la finalidad de evitar daños del equipo e incluso accidentes. Así mismo, según los resultados esta variable se ubicó por debajo del rango óptimo de crecimiento para *C. Vulgaris*, lo que indica que eventualmente el uso de lámparas de mayor potencia puede incrementar la cantidad de luz y paralelamente la temperatura. Además, con el objetivo de obtener valores de menor incertidumbre, se sugiere ubicar un sensor de temperatura directo en el FBR o un termómetro para muestreo in situ. Por último se propone el estudio de la intensidad luminosa y la temperatura de la zona rural donde se aplicará el proyecto, con la finalidad de desarrollar un modelo que simule las condiciones operativas.

De acuerdo al crecimiento de biomasa se identificó que el reactor tiene condiciones de mezcla deficientes, lo que incide de manera directa en la transferencia de masa de CO<sub>2</sub> al medio líquido, el crecimiento celular y la remoción de CO<sub>2</sub> del sistema. Por lo que se sugiere revisar alternativas eficientes y de bajo costo para aumentar los procesos de mezcla en el sistema como por ejemplo sistemas hidráulicos para recirculación del medio líquido.

Por último, se considera que el uso de una bomba peristáltica para suministro de CO<sub>2</sub> no permitió un control exacto de la materia que ingresa al sistema, precisamente porque se

emplean para líquidos. Por lo que se sugiere el uso una bomba para gas, introducir una bomba para acuario dentro de la bolsa de fermentación para generación de CO<sub>2</sub> y así regular con mayor precisión el caudal de gas a suministrar o simplemente emplear el sistema aplicado en esta investigación pero aplicando una válvula solenoide para paso directo del gas al FBR.

## Referencias

- Abd, A. A., Othman, M. R., Naji, S. Z., & Hashim, A. S. (2021). Methane enrichment in biogas mixture using pressure swing adsorption : process fundamental and design parameters. *Materials Today Sustainability*, *April*, 100063. <https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2021.100063>
- Abou-Shanab, R. A. I., Ji, M.-K., Kim, H.-C., Paeng, K.-J., & Jeon, B.-H. (2013). Microalgal species growing on piggery wastewater as a valuable candidate for nutrient removal and biodiesel production. *Journal of Environmental Management*, *115*, 257-264. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.11.022>
- Adnan, A. I., Ong, M. Y., Nomanbhay, S., & Show, P. L. (2020). Determination of Dissolved CO<sub>2</sub> Concentration in Culture Media: Evaluation of pH Value and Mathematical Data. *Processes*, *8*(11), 1373. <https://doi.org/10.3390/pr8111373>
- Anjos, M., Fernandes, B. D., Vicente, A. A., Teixeira, J. A., & Dragone, G. (2013). Bioresource Technology Optimization of CO<sub>2</sub> bio-mitigation by *Chlorella vulgaris*. *Bioresource Technology*, *139*, 149–154. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.04.032>
- Aristizábal Hernández, J. D. (2014). Validación y evaluación comparativa de la eficiencia de una estufa de leña mejorada bajo condiciones controladas y prueba de campo. *Informador Técnico*, *78*(1), 12. <https://doi.org/10.23850/22565035.65>
- Avila Leon, I. A. (2014). Estudo da produção de biomassa e lipídios no cultivo de *Neochloris oleoabundans* sob diferentes condições de estresse nutricional e físico. São Paulo, , Brazil.
- Bharguram, L. S. (1999). *High density culture of marine microalgae using semi-continuous and*

- continuous systems*. [Masters, Central Marine Fisheries Research Institute].  
<http://eprints.cmfri.org.in/11077/>
- Bose, A., Lin, R., Rajendran, K., Shea, R. O., & Xia, A. (2019). How to optimise photosynthetic biogas upgrading : a perspective on system design and microalgae selection. *Biotechnology Advances*, 37(8), 107444. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2019.107444>
- Brenner, A. & Aharon Abeliovich. (2013). Water Purification: Algae in Wastewater Oxidation Ponds. En A. Richmond & Q. Hu (Eds.), *Handbook of Microalgal Culture* (pp. 595-601). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118567166.ch31>
- Britannica, T. Editors of Encyclopaedia (2019, March 29). *convection*. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/convection>
- Cedeño, M. (2019). *Construcción de biodigestor para estimación de potencial energético a partir de bovinaza. Finca "las delicias", vereda santa bárbara, Íquira-Huila*. 65.
- Cajamar caja rural. (Junio de 2016). Cultivos de microalgas a gran escala: sistemas de producción . España.
- Ceaza. (2018). Guía técnica para el estudiante de acuicultura. Chile.
- Cheng, J., Xu, J., Ye, Q., Lai, X., Zhang, X., & Zhou, J. (2019). Strengthening mass transfer of carbon dioxide microbubbles dissolver in a horizontal tubular photo-bioreactor for improving microalgae growth. *Bioresource Technology*, 277, 11-17.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.01.019>
- Chiu, S.-Y., Kao, C.-Y., Chen, C.-H., Kuan, T.-C., Ong, S.-C., & Lin, C.-S. (2008). Reduction of CO<sub>2</sub> by a high-density culture of *Chlorella* sp. In a semicontinuous photobioreactor. *Bioresource Technology*, 99(9), 3389-3396.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2007.08.013>
- El Hamouri, B., Rami, A., & Vasel, J. L. (2003). The reasons behind the performance superiority

- of a high rate algal pond over three facultative ponds in series. *Water Science and Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research*, 48(2), 269-276.
- Furness, M., Bello-Mendoza, R., Dassonville, J., & Chamy-Maggi, R. (2021). Building the 'Bio-factory': A bibliometric analysis of circular economies and Life Cycle Sustainability Assessment in wastewater treatment. *Journal of Cleaner Production*, 129127. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129127>
- García-Gozalbes, C. C., Arbib, Z., & Perales-Vargas-Machuca, J. A. (2015). Cinéticas de crecimiento y consumo de nutrientes de microalgas en aguas residuales urbanas con diferentes niveles de tratamiento. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(1), 49-68.
- González López, C. V., Acien Fernández, F. G., Fernández Sevilla, J. M., Sánchez Fernández, J. F., Cerón García, M. C., & Molina Grima, E. (2009). Utilization of the cyanobacteria *Anabaena* sp. ATCC 33047 in CO<sub>2</sub> removal processes. *Bioresource Technology*, 100(23), 5904-5910. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.04.070>
- González, S. I. P. (2016). *Construcción y evaluación de un digestor anaerobio para la producción de biogás a partir de residuos de alimentos y poda a escala banco*. 85.
- Goswami, R. K., Mehariya, S., Verma, P., Lavecchia, R., & Zuurro, A. (2021). Microalgae-based biorefineries for sustainable resource recovery from wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, 40(October 2020), 101747. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101747>
- Grobbelaar, J. U. (2007). Photosynthetic characteristics of *Spirulina platensis* grown in commercial-scale open outdoor raceway ponds: What do the organisms tell us? *Journal of Applied Phycology*, 19(5), 591-598. <https://doi.org/10.1007/s10811-007-9172-9>
- Guo S., W. P. (2020). *Las microalgas como biofertilizantes en la agricultura moderna*. Springer, 14.
- Huang, Q., Jiang, F., Wang, L., & Yang, C. (2017). Design of Photobioreactors for Mass

- Cultivation of Photosynthetic Organisms. *Engineering*, 3(3), 318-329.  
<https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.03.020>
- Hernández, D. M. D. (2020). *Aprovechamiento energético de la codigestión anaeróbica de la fracción orgánica de residuos sólidos urbanos y residuos de cosecha de plátano para la producción de biogás*. 170.
- Ji, M.-K., Kabra, A. N., Salama, E.-S., Roh, H.-S., Kim, J. R., Lee, D. S., & Jeon, B.-H. (2014). Effect of mine wastewater on nutrient removal and lipid production by a green microalga *Micratinium reisseri* from concentrated municipal wastewater. *Bioresource Technology*, 157, 84-90. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.087>
- Kassim, M. A., & Meng, T. K. (2017). Carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) biofixation by microalgae and its potential for biorefinery and biofuel production. *Science of the Total Environment*, 584–585, 1121–1129. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.172>
- Kessler, E. (1985). Upper limits of temperature for growth in *Chlorella* (Chlorophyceae). *Plant Systematics and Evolution*, 151(1-2), 67-71. <https://doi.org/10.1007/BF02418020>
- La república . (19 de Febrero de 2020). <https://www.larepublica.co/especiales/colombia-potencia-energetica/colombia-superara-los-10-millones-de-usuarios-de-gas-natural-indica-el-ministerio-de-minas-y-energia-2966490>
- López, E. N. G., Reyez, J. S. R., & Martínez, A. T. (2017). *Implementacion de un biodigestor para el aprovechamiento de los residuos de las granjas porcinas en el municipio de tibana*. 81.
- Makris, K. F., Langeveld, J., & Clemens, F. H. L. R. (2020). A review on the durability of PVC sewer pipes: Research vs. practice. *Structure and Infrastructure Engineering*, 16(6), 880-897. <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1673442>
- Marín, D., Ortiz, A., Díez-montero, R., Uggetti, E., & García, J. (2019). *Bioresource Technology*



- Influence of liquid-to-biogas ratio and alkalinity on the biogas upgrading performance in a demo scale algal-bacterial photobioreactor. *Bioresource Technology*, 280(December 2018), 112–117. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.02.029>
- Maroneze, M. M., Barin, J. S., de Menezes, C. R., Queiroz, M. I., Zepka, L. Q., & Jacob-Lopes, E. (2014). Treatment of cattle-slaughterhouse wastewater and the reuse of sludge for biodiesel production by microalgal heterotrophic bioreactors. *Scientia Agricola*, 71(6), 521-524. Scopus. <https://doi.org/10.1590/0103-9016-2014-0092>
- Martins, A., Caetano, N. S., & Mata, T. M. (2009). *Microalgae for biodiesel production and other applications : A review*. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>
- Mata, T. M., Martins, A. A., & Caetano, Nidia. S. (2010). Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(1), 217-232. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.07.020>
- Meier, L., Pérez, R., Azócar, L., Rivas, M., & Jeison, D. (2015). Photosynthetic CO<sub>2</sub> uptake by microalgae: An attractive tool for biogas upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 73, 102-109. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.10.032>
- Miyamoto, K., Wable, O., & Benemann, J. R. (1988). Vertical tubular reactor for microalgae cultivation. *Biotechnology Letters*, 10(10), 703-708. <https://doi.org/10.1007/BF01025286>
- Muñoz, R., & Guieysse, B. (2006). Algal–bacterial processes for the treatment of hazardous contaminants: A review. *Water Research*, 40(15), 2799-2815. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.06.011>
- Meier, L., Pérez, R., Azócar, L., Rivas, M., & Jeison, D. (2015). Photosynthetic CO<sub>2</sub> uptake by microalgae: An attractive tool for biogas upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 73, 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.10.032>
- Nagarajan, D., Lee, D., & Chang, J. (2019). Bioresource Technology Integration of anaerobic digestion and microalgal cultivation for digestate bioremediation and biogas upgrading.

*Bioresource Technology*, 290(June), 121804.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121804>

ONU. (19 de Noviembre de 2021). *un.org*. Obtenido de

<https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>

Pabuena, M. A., & Pasqualino, J. (2014). Potencial de Uso de Biogás en Colombia Potential Uses of Biogas in Colombia. *Teknos*, 14(1900–7388), 27–33.

Pachón, D. A. R. (2017). *Diseño y construcción de un biodigestor para la producción de biogás a partir de heces caninas*. 97.

Paez, C. D. B., & Luengas, B. S. C. (2015). *Producción de biogás a partir de estiércol porcino a escala piloto: caso de estudio biorreactor continuo tubular plástico (bctp) finca tosoly*. 53.

Paolini, V., Petracchini, F., Carnevale, M., Gallucci, F., Perilli, M., Esposito, G., Segreto, M., Occulti, L. G., Scaglione, D., Ianniello, A., & Frattoni, M. (2018). Characterisation and cleaning of biogas from sewage sludge for biomethane production. *Journal of Environmental Management*, 217, 288–296. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.03.113>

Park, J. B. K., Craggs, R. J., & Shilton, A. N. (2011). Wastewater treatment high rate algal ponds for biofuel production. *Bioresource Technology*, 102(1), 35-42.

<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.06.158>

Pawlita-Posmyk, M., Wzorek, M., & Płaczek, M. (2018). The influence of temperature on algal biomass growth for biogas production. *MATEC Web of Conferences*, 240, 04008.

<https://doi.org/10.1051/matecconf/201824004008>

Pérez, G. R., & Restrepo, J. J. R. (2008). *Fundamentos de limnología neotropical*. Universidad de Antioquia.

Picot, B., Bahlaoui, A., Moersidik, S., Baleux, B., & Bontoux, J. (1992). Comparison of the

- Purifying Efficiency of High Rate Algal Pond with Stabilization Pond. *Water Science and Technology*, 25(12), 197-206. <https://doi.org/10.2166/wst.1992.0351>
- Rawat, I., Ranjith Kumar, R., Mutanda, T., & Bux, F. (2011). Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. *Applied Energy*, 88(10), 3411-3424. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.11.025>
- Rivas, M., & Jeison, D. (2014). *Photosynthetic CO<sub>2</sub> uptake by microalgae : An attractive tool for biogas upgrading*. 3, 3–10. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.10.032>
- Rodero, M. del R., Carvajal, A., Arbib, Z., Lara, E., de Prada, C., Lebrero, R., & Muñoz, R. (2020). Performance evaluation of a control strategy for photosynthetic biogas upgrading in a semi-industrial scale photobioreactor. *Bioresource Technology*, 307(January), 123207. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123207>
- Sánchez Mirón, A., Cerón García, M.-C., García Camacho, F., Molina Grima, E., & Chisti, Y. (2002). Growth and biochemical characterization of microalgal biomass produced in bubble column and airlift photobioreactors: Studies in fed-batch culture. *Enzyme and Microbial Technology*, 31(7), 1015-1023. [https://doi.org/10.1016/S0141-0229\(02\)00229-6](https://doi.org/10.1016/S0141-0229(02)00229-6)
- Sánchez-Borroto, Y., Tobío-Pérez, I., Romero-López, T. de J., Díaz-Domínguez, Y., Melo-Espinosa, E. A., & Piloto-Rodríguez, R. (2019). Evaluación de las condiciones experimentales básicas para la producción de biomasa a partir de la microalga *Chlorella vulgaris*. *Afinidad*, 76(585), Article 585. <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/353445>
- Serra-Maia, R., Bernard, O., Gonçalves, A., Bensalem, S., & Lopes, F. (2016). Influence of temperature on *Chlorella vulgaris* growth and mortality rates in a photobioreactor. *Algal Research*, 18, 352-359. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.06.016>

- Shah, G., Ahmad, E., Pant, K. K., & Vijay, V. K. (2021). Comprehending the contemporary state of art in biogas enrichment and CO<sub>2</sub> capture technologies via swing adsorption. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(9), 6588–6612.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.116>
- Singh, S. P., & Singh, P. (2015). Effect of temperature and light on the growth of algae species: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 431-444.  
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.024>
- Solovchenko, A., Verschoor, A. M., Jablonowski, N. D., & Nedbal, L. (2016). Phosphorus from wastewater to crops: An alternative path involving microalgae. *Biotechnology Advances*, 34(5), 550-564. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2016.01.002>
- Suárez, N. F. M. (2017). *Biogás aprovechamiento energético de una granja ganadero – avícola*. 90.
- SundarRajan, P., Gopinath, K. P., Greetham, D., & Antonysamy, A. J. (2019). A review on cleaner production of biofuel feedstock from integrated CO<sub>2</sub> sequestration and wastewater treatment system. *Journal of Cleaner Production*, 210, 445-458.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.11.010>
- Tang, D., Han, W., Li, P., Miao, X., & Zhong, J. (2011). CO<sub>2</sub> biofixation and fatty acid composition of *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella pyrenoidosa* in response to different CO<sub>2</sub> levels. *Bioresource Technology*, 102(3), 3071-3076.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.047>
- Tredici, M. R., & Zittelli, G. C. (1998). Efficiency of sunlight utilization: Tubular versus flat photobioreactors. *Biotechnology and Bioengineering*, 57(2), 187-197.  
[https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0290\(19980120\)57:2<187::AID-BIT7>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0290(19980120)57:2<187::AID-BIT7>3.0.CO;2-J)
- Wahid, R., Mulat, D. G., Gaby, J. C., & Horn, S. J. (2019). Effects of H<sub>2</sub>:CO<sub>2</sub> ratio and H<sub>2</sub> supply fluctuation on methane content and microbial community composition during in-situ

- biological biogas upgrading. *Biotechnology for Biofuels*, 12(1), 1–15.  
<https://doi.org/10.1186/s13068-019-1443-6>
- Wang, B., Lan, C. Q., & Horsman, M. (2012). Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses. *Biotechnology Advances*, 30(4), 904-912.  
<https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.01.019>
- Wang, Y., Stessman, D. J., & Spalding, M. H. (2015). The CO<sub>2</sub> concentrating mechanism and photosynthetic carbon assimilation in limiting CO<sub>2</sub>: How *Chlamydomonas* works against the gradient. *Plant Journal*, 82(3), 429–448. <https://doi.org/10.1111/tpj.12829>
- Wijffels, R. H. (2008). Potential of sponges and microalgae for marine biotechnology. *Trends in Biotechnology*, 26(1), 26-31. <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2007.10.002>
- Wu, L. B., Li, Z., & Song, Y. Z. (2010). Hydrodynamic conditions in designed spiral photobioreactors. *Bioresource Technology*, 101(1), 298–303.  
<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.005>
- Xu, M., Xue, Z., Sun, S., Zhao, C., Liu, J., Liu, J., & Zhao, Y. (2020). Co-culturing microalgae with endophytic bacteria increases nutrient removal efficiency for biogas purification. *Bioresource Technology*, 314, 123766. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.123766>
- Xu, S., Qiao, Z., Luo, L., Sun, Y., & Wong, J. W. (2021). Bioresource Technology On-site CO<sub>2</sub> bio-sequestration in anaerobic digestion : Current status and prospects. *Bioresource Technology*, 332(January), 125037. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125037>
- Yan, C., Zhu, L., & Wang, Y. (2016). Photosynthetic CO<sub>2</sub> uptake by microalgae for biogas upgrading and simultaneously biogas slurry decontamination by using of microalgae photobioreactor under various light wavelengths , light intensities , and photoperiods. *Applied Energy*, 178, 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.06.012>
- Zhao, Y., Guo, G., Sun, S., Hu, C., & Liu, J. (2019). Co-pelletization of microalgae and fungi for

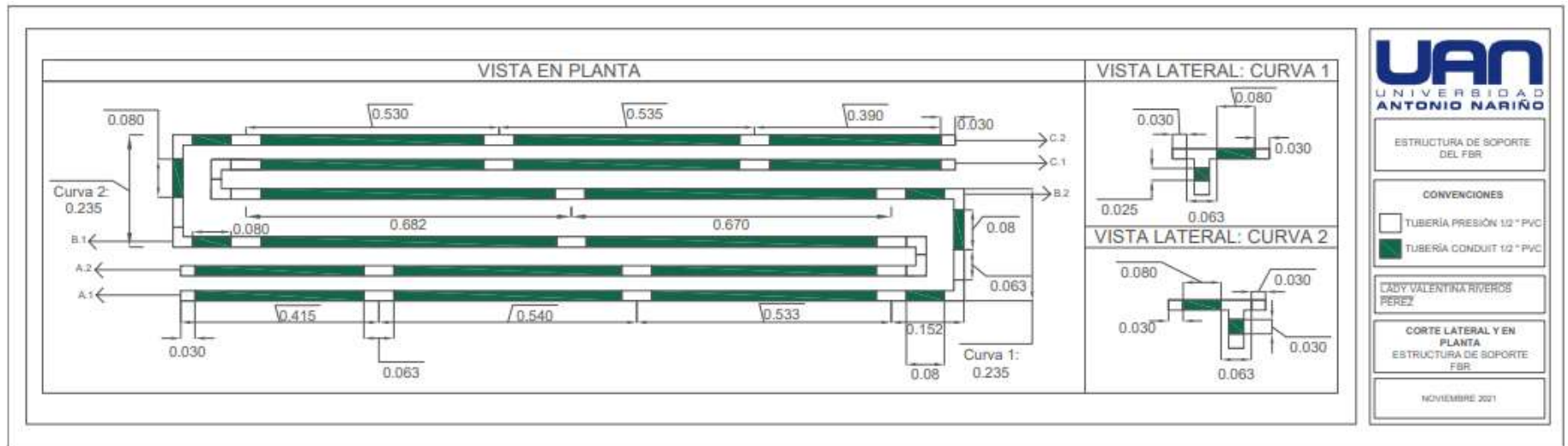
efficient nutrient purification and biogas upgrading. *Bioresource Technology*, 289, 121656. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121656>

Zhou, K., Chaemchuen, S., & Verpoort, F. (2017). Alternative materials in technologies for Biogas upgrading via CO<sub>2</sub> capture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79(April), 1414–1441. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.198>

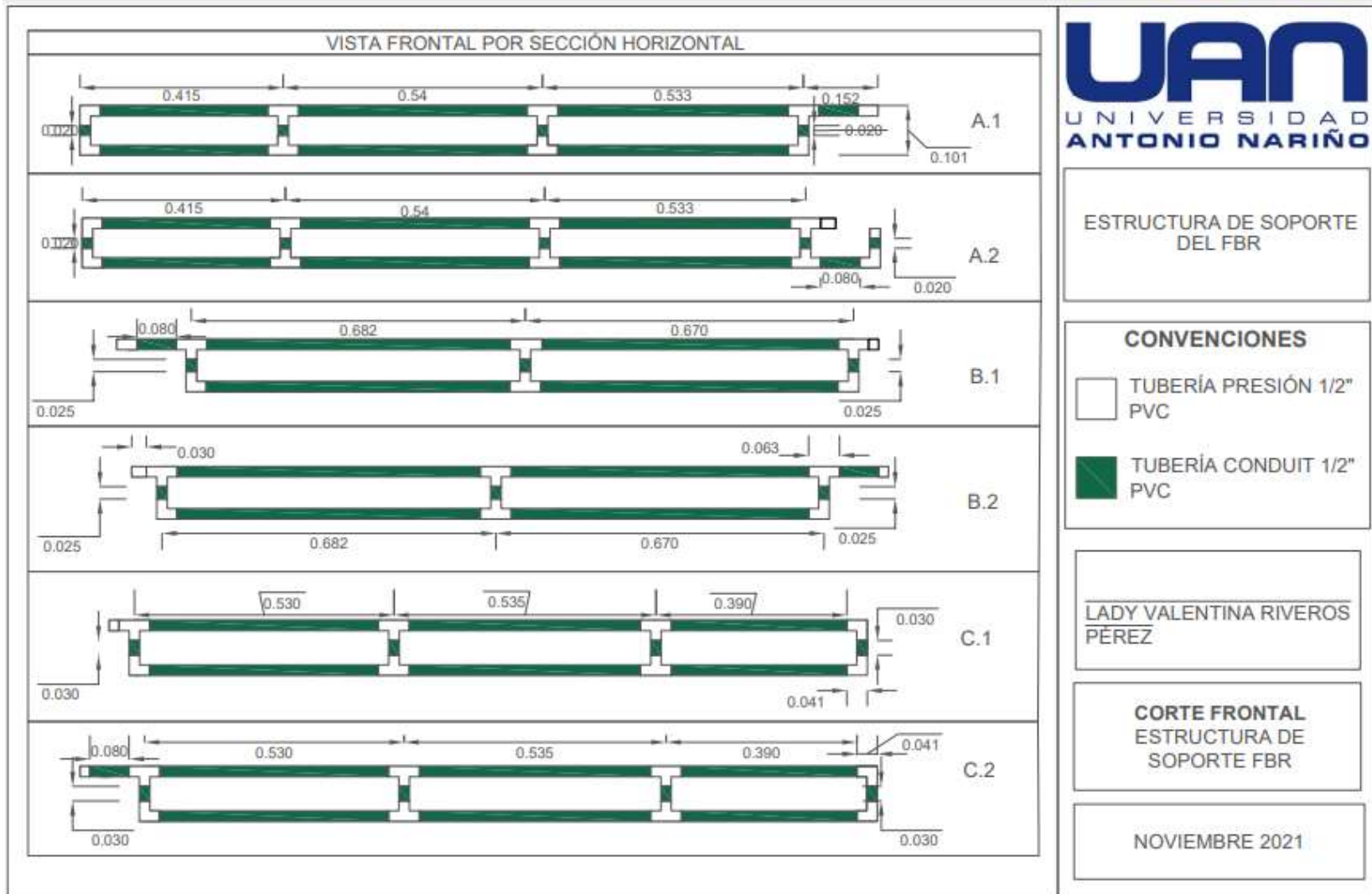
Zhu, L., Wang, Z., Shu, Q., Takala, J., Hiltunen, E., Feng, P., & Yuan, Z. (2013). Nutrient removal and biodiesel production by integration of freshwater algae cultivation with piggery wastewater treatment. *Water Research*, 47(13), 4294-4302. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.05.004>

Anexos

Anexo 1: Plano estructura de soporte (dimensiones en metros)



Nota. Dimensiones en metros



Nota. Dimensiones en metros



**Anexo 2: Código de programación del arduino UNO para el control de las bombas de dosificación de líquido y gas**

```

long RELE1=2;
long RELE2=3;
long mseg1=0;
long mseg2=0;
long millisanterior=0;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(RELE1,OUTPUT);
  pinMode(RELE2,OUTPUT);
  digitalWrite(RELE1,LOW);
  digitalWrite(RELE2,LOW);
}

void loop() {
  reloj();
}

if(mseg1>=12000){          //12000
  digitalWrite(RELE1,HIGH);
  if(mseg1>=12080){       //12080
    digitalWrite(RELE1,LOW);
    mseg1=0;
  }
}

if(mseg2>=6000){
  digitalWrite(RELE2,HIGH);
  if(mseg2>=6040){
    digitalWrite(RELE2,LOW);
    mseg2=0;
  }
}

void reloj(){
  if((millis()-millisanterior)>=100)
  {
    mseg1++;
    mseg2++;
    millisanterior=millis();
    Serial.print("millis -> ");
    Serial.print(millisanterior);

    Serial.print("R1 -> ");
    Serial.print(mseg1);

    Serial.print(" R2 -> ");
    Serial.println(mseg2);
  }
}

```

## Anexo 3: Presupuesto

Componente	Material	Cantidad	Unidad	Precio unitario	Precio total ( COP)
Estructura de soporte	Tubo Conduit 1/2" PVC	22	m	1833	40326
	Codo 1/2" Presión	16	N/A	700	11200
	Tricodo 1/2" Presión	6	N/A	6092	36552
	T 1/2" Presión	32	N/A	900	28800
	Amarres plásticos marca Marwa de 20 cm x 4.8 mm	1	paquete	N/A	8000
Suministro de luz	3 tubos LED marca FITECH, modelo FE-T812-S, 18W de potencia y 110-270V	3	N/A	11000	33000
	Cable de cobre calibre 14 AWG	4	metros	1628	6512
	Cinta aislante	2	N/A	1000	2000
	Enchufe tipo B 110V	1	N/A	6000	6000
Sistema de salida de gas	Recipientes PET 3L	3	N/A	0	0
	Tubo 1/2" presión	2	N/A	0	0
	Adaptador macho 1/2" presión	4	N/A	450	1800
	Cemento solvente tubos y accesorios de PVC marca Durman	-	N/A	0	0
	Cinta para sellos impermeables marca Sika	-	N/A	0	0
	Venoclisis	2	N/A	1600	3200
	Manguera de vinilo transparente de PVC para acuario	4	m	1450	5800
	Bolsa de polipropileno de alta densidad calibre 50 micras (40L)	1	m	1600	1600
Sello de suministro de gas	Adaptador 1/2" Terminal Conduit	1	N/A	400	400
	Mezcla de caucho de silicona - catalizador marca constru químicos	1	N/A	0	0
	Tapón de presión de 1/2" roscado	1	N/A	450	450
	Difusor de aire para acuario	1	N/A	5000	5000
	Manguera de vinilo transparente de PVC para acuario	-	N/A	-	0
	Cemento solvente tubos y accesorios de PVC marca Durman	-	N/A	-	0
	Empaques de goma 3/4 " para uso en conectores de manguera marca ERG	2	N/A	500	1000
	Parche Para Reparación de Piscinas 6.5X6.5 cm marca bestway	1	N/A	500	500

	Mezcla de caucho de silicona - catalizador marca constru químicos	1	N/A	-	0
<b>Sellos de suministro de líquido y salida de gas</b>	Adaptador 1/2" Terminal Conduit	2	N/A	400	800
	Tapón de presión de 1/2" roscado	2	N/A	450	900
	Manguera de vinilo transparente de PVC para acuario	-	N/A	-	0
	Empaques de goma 3/4 " para uso en conectores de manguera marca ERG	4	N/A	500	2000
	Parche Para Reparación de Piscinas 6.5X6.5 cm marca bestway	1	N/A	500	500
<b>Sello y sistema de salida del líquido</b>	Adaptador macho 1/2" presión	1	N/A	450	450
	Tapón de presión de 1/2" roscado	1	N/A	450	450
	Dos empaques de goma 1/2" para uso en lavaplatos	2	N/A	500	1000
	Codo 1/2" Presión	2	N/A	700	1400
	Tubo 1/2" PVC de presión, 4cm	-	N/A	-	0
	Adaptador macho 1/2" CPVC	1	N/A	1700	1700
	Tubo 1/2" CPVC, 4cm	-	N/A	-	0
	Codo 1/2" CPVC	2	N/A	1900	3800
	Válvula bola roscada de PVC humboldt 1/2 "	1	N/A	4850	4850
	Cemento solvente tubos y accesorios de PVC marca Durman	-	N/A	-	0
<b>Generación de CO2</b>	Teflón	1	N/A	3000	3000
	975 mL de agua	-	N/A	-	0
	180 gr de azúcar blanco	-	N/A	-	0
	Levadura activa seca marca Levapan (80 gr)	1	N/A	4500	4500
	Bolsa de polipropileno de 20L	2	N/A	800	1600
<b>Jeringa de muestreo de CO2</b>	Jeringa de 50 mL	1	N/A	2000	2000
	Manguera siliconada de venoclis	-	N/A	-	0
	Llave reguladora de venoclis	-	N/A	-	0
<b>Módulo electrónico externo</b>	Arduino UNO R3 compatible con cable USB	1	N/A	40000	40000
	Bomba peristáltica	2	N/A	53000	106000
	Módulo Relay dos Canales 5V Arduino	1	N/A	8500	8500
	Adaptadores 12V-2A	2	N/A	14000	28000
	Fuente 5V-1A	1	N/A	14000	14000
	Cables jumpers arduino	1	N/A	-	0
	Cable calibre 20 AWG	-	N/A	-	0
<b>TOTAL</b>					<b>417590</b>

## Anexo 4: Artículo científico

### CONSTRUCCIÓN DE UN BIORREACTOR A ESCALA DE LABORATORIO DE 20L PARA EL CULTIVO DE MICROALGAS, QUE PERMITA LA FIJACIÓN DE CO<sub>2</sub>, EMPLEANDO MATERIALES DE BAJO COSTO Y FÁCIL ACCESO, PARA EL APROVECHAMIENTO DE BIOGÁS EN ZONAS RURALES DE COLOMBIA

CONSTRUCTION OF A 20L LABORATORY-SCALE BIORREACTOR FOR THE CULTIVATION OF MICRO-ALGES, ENABLISHING CO<sub>2</sub> FIXATION, USING LOW COST AND EASY ACCESS MATERIALS, FOR TAKE ADVANTAGE OF BIOGASS IN RURAL AREAS OF COLOMBIA

**Lady Valentina Riveros Pérez**

*Estudiante, ingeniería ambiental, Proyecto UAN-TGI fase II, Grupo de Investigación GRESIA, Universidad Antonio Nariño*

#### RESUMEN

Actualmente en Colombia gran parte del desabastecimiento del servicio domiciliario de gas natural se concentra en el sector rural, por lo que el uso de leña, carbón o residuos agrícolas para cocción es una práctica habitual que cada vez ocasiona mayores afectaciones ambientales y enfermedades respiratorias; el uso de biocombustibles como el biogás es una alternativa de aprovisionamiento para el sector, partiendo de su vocación agraria, generación de residuos agrícolas, así como la viabilidad energética y económica del biogás. El objetivo principal de este proyecto fue construir un fotobiorreactor a escala de laboratorio de 20L para el cultivo de microalgas, que permita la fijación de CO<sub>2</sub>, empleando materiales de bajo costo y fácil acceso, esto con la finalidad de proponer tecnologías alternativas para la limpieza y aprovechamiento de este biocombustible en zonas rurales de Colombia. El proceso de diseño, construcción, delimitación de materiales e incluso la toma de muestras tuvo un enfoque iterativo, con el propósito de

identificar las condiciones finales idóneas del sistema. De ahí, se elaboró, operó y evaluó un fotobiorreactor tubular horizontal con una ligera pendiente entre niveles provista por las curvas de conexión y distribución volumétrica 50% mezcla de aire-CO<sub>2</sub> y 50% medio de cultivo líquido; Durante su puesta en marcha final, el fotobiorreactor demostró una tendencia de crecimiento celular en el tiempo y remoción periódica de CO<sub>2</sub>, sin embargo presentó condiciones de mezcla deficientes, lo que limitó el aprovechamiento del CO<sub>2</sub> por parte de las microalgas, además una fuga que impidió la cuantificación exacta de remoción de CO<sub>2</sub>.

**Palabras clave:** Biogás, microalgas, remoción de CO<sub>2</sub> del biogás, limpieza del biogás, fotobiorreactor tubular horizontal

#### ABSTRACT

Currently in Colombia, much of the shortage of natural gas domestic service is concentrated in the rural sector, so the use of firewood, coal or agricultural waste for

cooking is a common practice that increasingly causes greater environmental impacts and respiratory diseases; the use of biofuels such as biogas is an alternative supply for the sector, based on its agricultural vocation and agricultural waste generation, as well as energy and economic workability of biogas. The main objective of this project was to construct a 20L laboratory-scale photobioreactor for the cultivation of microalgae, which allows the fixation of CO<sub>2</sub>, using low-cost and easily accessible materials, with the purpose of proposing alternative technologies for the cleaning and use of this biofuel in rural areas of Colombia. The process of design, construction, material delimitation and even sampling had an iterative approach, with the aim of delimiting the ideal end conditions of the system. A horizontal tubular photobioreactor with a slight slope between levels provided by the connection curves and volume distribution of 50% air-CO<sub>2</sub> mixture and 50% liquid culture medium was developed, operated and evaluated; During its final start up, the photobioreactor showed a trend of cellular growth over time and periodic removal of CO<sub>2</sub>, however, it presented poor mixing conditions, which limited the utilization of CO<sub>2</sub> by the microalgae, as well as a leakage that prevented the exact quantification of CO<sub>2</sub> removal.

**Keywords:** Biogas, microalgae, CO<sub>2</sub> removal from biogas, cleaning of biogas, horizontal tubular photobioreactor

## INTRODUCCIÓN

Estimaciones refieren que la generación de energía es el sector de mayor contribución en la emisión de gases efecto invernadero, del mismo modo 13% del total de la

población aún no tiene acceso a servicios modernos de electricidad, 3000 millones de personas emplean madera, carbón o residuos agrícolas para cocinar y calentar la comida y tan solo el 17.5% del consumo final de energía mundial fue provista por fuentes renovables en 2015 (ONU, 2021). Por tanto, son contundentes dos aspectos: suministro descentralizado, en especial para abastecer comunidades en condición de vulnerabilidad y una transición al uso mayoritario de fuentes no convencionales de energía (Pabuena & Pasqualino, 2014).

Alrededor de 1.600.000 hogares colombianos aún emplean leña para cocinar, los cuales en múltiples ocasiones han presentado afectaciones pulmonares serias debido a exposiciones prolongadas a gases de combustión (Aristizábal Hernández, 2014). El uso de biocombustibles como el biogás es una alternativa de aprovisionamiento para el sector, partiendo de su vocación agraria y generación de residuos agrícolas, así como la viabilidad energética y económica del biogás.

Pabuena & Pasqualino (2014) mencionan que en Colombia la generación de biogás se ha limitado principalmente a la implementación de biodigestores domésticos en el sector rural, estos se han desarrollado de manera gradual, por iniciativa de los usuarios en su mayoría y con deficiente apoyo institucional. No obstante, el reciente progreso del cultivo de palma y el tratamiento de sus aguas residuales industriales ha impulsado la implementación a mayor escala de estos proyectos.

El biogás es una fuente renovable de energía a un precio asequible y su viabilidad se incrementa al aplicarlo en áreas rurales. Shah y col. (2021) mencionaron que 1 m<sup>3</sup> de biogás corresponde a 6 kW/h de energía, de los cuales 2kW/h se convierten en

electricidad usando generadores y 4 kW/h se recobran en forma de energía térmica durante la producción de electricidad; además, las plantas de biogás generan abono, un producto de interés comercial debido a sus propiedades en la fertilización del suelo.

El uso directo del biogás como biocombustible es ineficiente, lo que implica su conversión en biometano a partir de la eliminación de sus contaminantes, siendo el CO<sub>2</sub> el de mayor proporción. Actualmente se emplean múltiples tecnologías comerciales para eliminar el CO<sub>2</sub> del biogás, entre estas el lavado con agua, absorción/depuración de aminas, depuración/ sorción de disolventes orgánicos, separación por membranas, entre otras., las cuales a pesar de su eficiencia, son costosas y contaminantes (Zhou et al., 2017). El uso de micro algas en los procesos de biorrefinería del biogás es una alternativa de interés para la remoción de CO<sub>2</sub> por fijación, debido a su acelerada tasa de crecimiento, facilidad de adaptación a condiciones medioambientales y condiciones de cultivo a precios accesibles (Meier et al., 2015). El presente proyecto de investigación corresponde a la fase I del prototipo de un sistema de limpieza de biogás y pretende diseñar, construir y evaluar un fotobiorreactor (FBR) para el cultivo de micro algas, que permita la fijación de CO<sub>2</sub>, empleando materiales de bajo costo y fácil acceso, esto con la finalidad de proponer tecnologías alternativas para la limpieza y el aprovechamiento del biogás en zonas rurales de Colombia

## 1. METODOLOGÍA

El proceso de diseño, construcción, operación, delimitación de materiales e inclusive la toma de muestras tuvo un enfoque iterativo, se hace la descripción de cada uno de ellos a continuación.

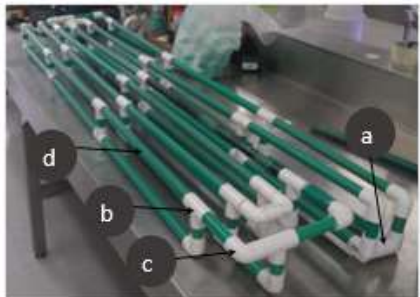
### 1.1 Estructura de soporte del FBR

Se propusieron y construyeron diferentes modelos secuenciales, siendo los tres primeros de dimensiones pequeñas y el cuarto de dimensiones reales. En este orden de ideas, se delimitó la fabricación de un FBR horizontal con una ligera pendiente entre niveles y estructura de soporte en PVC, teniendo en cuenta las características de durabilidad de alrededor de 100 años y resistencia del material (Makris et al., 2020).

El modelo uno contempló la fabricación de una estructura compuesta por cinco secciones con pendientes de 26.8% entre sí, empleó tubos conduit, codos, trícodos y malla plástica para el soporte de la bolsa de polipropileno. El modelo dos descartó el uso de malla plástica y en contraste aplicó una estructura únicamente en PVC, con tubos conduit, codos, trícodos y Ts; además integró una pendiente de 3.1% entre niveles horizontales aplicando curvas de conexión en PVC deformadas y no deformadas con calor. Por otra parte, el modelo tres conservó la pendiente, sin embargo sustituyó el uso de curvas de PVC para las conexiones entre brazos horizontales por tubos conduit, codos, trícodos y Ts. La figura 1 presenta el modelo 4 (final), su configuración es igual al 3 pero de dimensiones equivalentes a los criterios de diseño planteados en los objetivos del proyecto. Por tanto, se compuso por a) seis tricodos, b) 32 Ts, c) 16 codos y d) 22 m tubo conduit.

**Figura 1**

Configuración final de la estructura de soporte del FBR

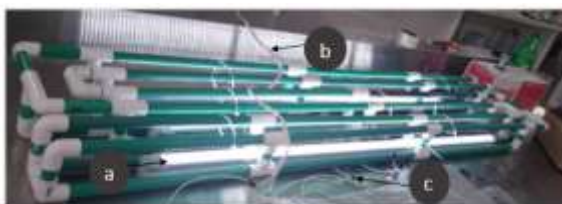


## 1.2 Suministro de luz

Se realizó un circuito en paralelo compuesto por a) 3 tubos LED marca FITECH, modelo FE-T812- S, 18W de potencia y 110-270V, los cuales se ubicaron y sujetaron con amarres pasticos en la parte más baja de la estructura de soporte, entre cada uno de los brazos, b) cable de cobre calibre 14 AWG, c) cinta aislante y d) un enchufe tipo B 110V (ver figura 2).

**Figura 2**

Configuración del suministro de luz del FBR



## 1.3 Preparación del inoculo

En un reactor airlift de 2.2 L previamente limpiado y desinfectado, se puso un pre inóculo de 220 mL de *Chlorella vulgaris* proveniente de otro reactor, así como 1.98 L de agua y 8 mL de orina. Finalmente se adecuó al reactor una bomba de aire Xilong dos salidas, un adaptador para luz LED de 12V, 1.5A, un sensor de temperatura y luz LED alrededor del FBR fijando una temperatura promedio de rango entre 22-

24°C. Se operó durante 20 días con adición de 8 mL de orina cada 8 días y muestreo diario para toma de absorbancia.

## 1.4 Sistema de salida de gas

Se desarrollaron dos modelos base previos al modelo final (ver figura 3). Se compuso por a) 3 recipientes PET 3L, b) 2 tubos 1/2" de presión de 7 cm y 4 adaptadores macho, pegados con cemento solvente PVC, c) teflón en la sección que une el recipiente, el adaptador macho y el adaptador hembra conduit, d) cinta Sika, e) 1 manguera siliconada conectada internamente al punzón del venoclis y sumergida en 0.7L de agua (botella de la izquierda), f) 2L de agua distribuidos entre el recipiente del medio y el de la derecha, g) una bolsa de almacenamiento de gas de 40 L la cual se conectaba mediante una manguera de vinilo y un venoclis al recipiente del centro; cabe aclarar, que ambas botellas llevan un venoclis y un soporte de venoclis elaborado a partir de caucho de silicona y catalizador, además que h) el sello de la bolsa fue similar al aplicado en los sellos de suministro de líquido y salida de gas, difiere únicamente en que el tapón no tiene caucho de silicona en su interior y además está perforado totalmente en la tapa.

**Figura 3**

Modelo final del sistema de salida de gas del FBR



*Nota.* Las tres fotografías son del mismo sistema; la de la izquierda es una toma general, la del centro la bolsa de almacenamiento y la de la derecha una vista interna del sello de la bolsa.

## 1.5 Sellos de entrada y salida del gas y del líquido

### Sello de suministro de gas

Se compuso por a) una mezcla de caucho de silicona - catalizador al interior del adaptador macho conduit, b) 1 tapón perforado en el centro por donde se introdujo el difusor y paralelamente se conectó la manguera de vinilo, c) ajuste de la conexión manguera - difusor aplicando dentro del tapón mezcla de caucho de silicona - catalizador hasta la mitad, dejando la otra sección libre para enroscar; además la sección de unión externa del difusor y la tapa del tapón se reforzó con cemento solvente para PVC, d) 2 empaques de goma  $\frac{3}{4}$ " y por último e) manguera de vinilo la cual ya había sido incrustada en el tapón, pero posteriormente se introdujo a presión en el centro del acople macho conduit (ver figura 4). Cabe aclarar que debido a que este era el montaje final, el difusor se puso en una solución de agua e hipoclorito de sodio durante 5 minutos y posteriormente se lavó con agua hasta eliminar olor.

**Figura 4**

*Configuración final del sello de suministro de gas*



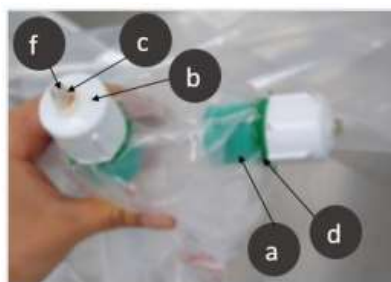
*Nota.* Ambas fotografías son del mismo modelo, siendo la izquierda una vista interna de la bolsa y la derecha una vista externa.

### Sellos de suministro de líquido y salida de gas

Ambos tuvieron la misma configuración y se compusieron por a) una mezcla de caucho de silicona - catalizador al interior del adaptador macho conduit, b) 1 tapón perforado en el centro por donde se introdujo la manguera de vinilo, adicionalmente c) la manguera dentro del tapón se pegó llenando el tapón con una mezcla de caucho de silicona - catalizador hasta la mitad y dejando un espacio libre para enroscar, también se reforzó la sección de unión entre la manguera y la tapa del tapón con cemento solvente para PVC, además se emplearon d) 2 empaques de goma  $\frac{3}{4}$ ", e) manguera de vinilo la cual se introdujo a presión en el centro del acople macho y el tapón y f) una longitud interna libre de la manguera de 0.5 cm (ver figura 5).

**Figura 5**

*Configuración final de los sellos de suministro de líquido y salida de gas del FBR*



### Sello de salida de líquido y sistema sifón

La salida del líquido implicó la construcción de un sello directo a la bolsa y un sistema sifón acoplado al mismo. De ahí el sello se conformó por a) 1 adaptador macho a presión, b) 1 tapón perforado totalmente en la tapa y c) 2 empaques de goma para uso en lavaplatos (ver figura 6). Mientras que el sistema sifón se integró por a) 2 codos  $\frac{1}{2}$ " de



presión, b) 1 tubo de presión de 4 cm para unión entre codos, c) 1 tubo de 1/2" CPVC de 4 cm para unión codo-adaptador macho CPVC, d) 2 codos CPVC de 1/2", e) 1 adaptador macho CPVC de 1/2" y f) 1 válvula bola roscada de PVC humboldt 1/2"; cabe aclarar que se usó cemento solvente PVC para unir las piezas lisas respectivamente y teflón para las roscadas, además se verifico la ausencia de fugas de agua.

**Figura 6**

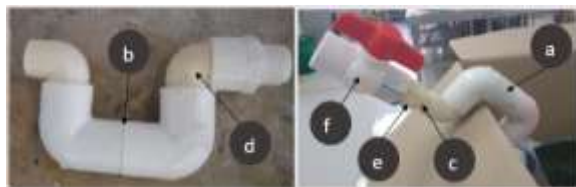
*Configuración final del sello de salida del líquido*



*Nota.* Ambas fotografías son del mismo modelo, siendo la izquierda una vista externa de la bolsa y la derecha una interna.

**Figura 7**

*Configuración final del sistema sifón*



*Nota.* Ambas fotografías son del mismo modelo, tan solo que la de la izquierda aún no tiene válvula bola roscada y la de la derecha sí.

## 1.6 Generación de CO<sub>2</sub>

Se tomaron 325 mL de agua + 60 gr de azúcar blanco a 50°C, seguido a esto se agitó hasta lograr una mezcla homogénea y una vez su temperatura disminuyó a 40°C se aplicaron 45 gr de levadura activa seca Levapan y se integraron a la solución

revolviéndola. Seguido a esto se puso todo en una bolsa de polipropileno de 20 L sellada por un solo extremo, se le retiró el aire al recipiente manualmente y se selló el otro extremo con calor. La operación de la bolsa no requirió de mezcla adicional, tan solo de un espacio que mitigara la pérdida de calor de manera acelerada. El proceso se hizo por triplicado.

## 1.7 Toma de muestras del reactor

### Muestras gaseosas

Se tomaron 24 mL de gas por el conector de muestreo ubicado en la manguera de salida de gas del FBR, empleando una jeringa de 50 mL totalmente vacía acoplada a una manguera siliconada y está a su vez a una llave reguladora de venoclisis para evitar el escape del gas. Básicamente el extremo libre de la manguera de la jeringa de muestreo se conectaba a la válvula para acuario de un instrumento que permitía medir la cantidad de CO<sub>2</sub> en la muestra por volumetría.

### Muestras líquidas

Se tomó una muestra de 35 mL de medio líquido del FBR por la válvula de bola roscada de PVC en un tubo para centrifuga falcon de 45 mL, seguido a esto se analizó pH y temperatura empleando un pHmetro HI 2212 Hanna Instruments; por otra parte, se dispusieron 15 mL en un tubo para toma de muestras y se midió absorbancia empleando un espectrofotómetro Thermo scientific genesys 20 a 675 nm.

### 1.8 Montaje del FBR en Batch

Se tomó el FBR y se realizaron dos nudos consecutivos manualmente en el extremo donde se ubicó la salida del líquido, además el fragmento restante se dobló y envolvió hacia arriba con cinta Sika para que el líquido no se saliera. Se cerraron la válvula bola roscada de PVC, así como las válvulas de acuario de la manguera de salida de gas, entrada de líquido y entrada de gas, se pusieron 17.8 L de agua por el extremo abierto, 2.2 L del inóculo y 80 mL de orina. Seguido a esto se sacó un poco el aire manualmente y se selló el otro extremo de la bolsa de la misma manera que el primero.

Posteriormente el FBR se puso en la estructura de soporte en PVC, se sujetó con amarres plásticos, se encendieron las luces LED y se le conectó un compresor de aire para carro a la manguera de suministro de gas para llenar cerca del 50% del volumen restante con aire; además se tomó 1.4 L de CO<sub>2</sub> de una bolsa de almacenamiento y se suministró con una jeringa de 50 mL en 24 pulsos. La figura 8 presenta el montaje culminado.

**Figura 8**

*Configuración final del FBR en Batch*



### 1.9 Montaje y operación del FBR en continuo

La operación en continuo solicitó la adición de algunos componentes y pruebas con el objetivo de automatizar el sistema, las mismas se describen a continuación.

### Modulo electrónico externo para suministro de medio líquido nuevo y CO<sub>2</sub>

Se compuso por 1 arduino UNO R3 compatible con cable USB, 1 un Módulo Relay dos Canales 5V Arduino, 1 bomba peristáltica para dosificar por pulsos medio líquido nuevo, 1 segunda bomba peristáltica para dosificar por pulsos CO<sub>2</sub>, 2 adaptadores 12V-2A para las bombas peristálticas, 1 fuente 5V-1A para la alimentación del arduino, cables jumpers arduino y cable calibre 20 AWG, puesto que la bomba de CO<sub>2</sub> se ubicó a dos metros del módulo. Adicionalmente se empleó una manguera de vinilo que salía de la bomba de líquido y se unía a un conector hidráulico en T y este a su vez a la manguera de suministro de líquido del FBR, 1 botella plástica 5L en dónde se almacenó la mezcla de orina + agua y por último una manguera de vinilo de conexión directa de la bomba de dosificación y el recipiente de almacenamiento de líquido.

La programación del sistema se hizo en arduino IDE; equivalente a pulsos de 14 mL, con duración de 8 segundos e intervalos de 20 minutos, en el caso de la bomba dosificadora de líquido, así como, 8-10 mL por pulso para la bomba de suministro de CO<sub>2</sub>, operación de 4 segundos e intervalos de 10 minutos, dicho rango de volumen debido a la incertidumbre identificada.

### Montaje para suministro de CO<sub>2</sub>

Se tomó una caja de cartón y se le hizo un orificio de 2 cm de diámetro por donde se incrustó y adhirió con silicona caliente la cabeza del sistema de ventilación del venoclisis, el cual se conectó mediante una manguera siliconada a la bomba de suministro de CO<sub>2</sub>, adicionalmente se cubrió su cámara cuentagotas con cinta doble faz

con la finalidad de evitar fugas. Por otra parte, a la bolsa de almacenamiento se le puso un fragmento de cinta Sika para sellos impermeables en la superficie y en el centro de este se puso una cura adhesiva redonda, luego se añadió silicona caliente sobre la cura y se procedió a insertar el punzón del venoclisis en el centro. Por último se agregó pegante boxer en la unión interna de la caja y la bolsa, así como dos botellas PET las cuales atravesaban la caja con el objetivo de ejercer presión a la bolsa y brindar soporte para evitar el escape del gas.

### Conexiones hidráulicas

El sistema usó manguera de vinilo transparente de PVC (las empleadas en los sellos directos en el FBR) y de resto mayoritariamente manguera siliconada, además sustituyó la mayor parte de las válvulas de acuario usadas en la operación en Batch por conectores directos y válvulas anti retorno.

### Recipiente de almacenamiento de líquido de salida

Se compuso por a) 2 botellas plásticas de 5L interconectadas, b) 2 adaptadores de presión macho, c) 1 tubo de presión de 7 cm, d) 2 empaques de goma para uso en lavaplatos, e) 1 capa de cinta doble faz transparente y encima cinta aislante para cerrar los cortes previamente hechos a la botella y finalmente f) 1 agujero de 2.5 cm de diámetro por donde se apoyó la válvula de bola roscada que sale del FBR (ver figura 9).

**Figura 9**

*Recipiente de almacenamiento de líquido de salida*

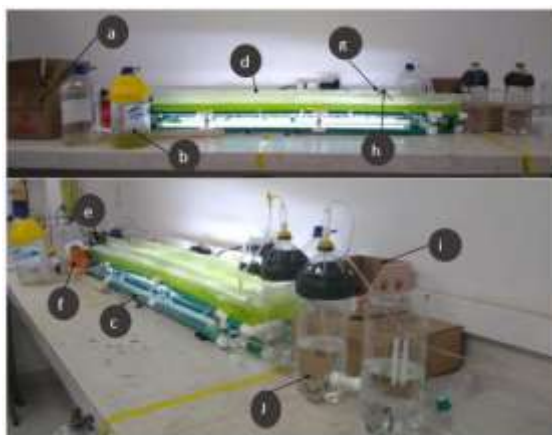


### Montaje y operación final del FBR en continuo

Se ensamblaron cada uno de los componentes descritos anteriormente. Entre estos a) sistema para suministro de CO<sub>2</sub>, b) recipiente de almacenamiento del líquido de salida, c) estructura de soporte, d) FBR, e) entrada de gas, f) salida de líquido, g) entrada de líquido, h) salida de gas, i) módulo electrónico de control y j) sistema de salida de gas, como lo ilustra la figura 10. Además para su operación se adicionaron 4L de agua + 40 mL de orina cada 4 días en la botella para suministro de medio líquido nuevo y aire con un compresor para carro por pérdidas de volumen gaseoso ( $\approx$  4 días).

**Figura 10**

*Montaje final del FBR operado en continuo*



*Nota.* Ambas fotografías son del mismo sistema, la de arriba es una vista frontal y la de abajo una vista lateral.

## 2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 2.1 Diseño y construcción

Se delimitó un sistema cerrado, ya que permite el monocultivo y mayor control de las variables del medio, productividad celular y eficiencia en la utilización y fijación del CO<sub>2</sub> inyectado, comparado con los sistemas abiertos (Cajamar caja rural, 2016). Tipo tubular, siendo esta la configuración más apropiada y viable para el cultivo masivo en exteriores considerando una disponibilidad relativamente alta de iluminación (Huang et al., 2017), (Cheng et al., 2019); por último, con orientación horizontal, puesto que presenta una mayor relación superficie-volumen comparado con los FBR verticales, los cuales necesitan un diámetro mínimo; además, el ángulo de incidencia de la luz en esta configuración es más eficiente para la captación de la intensidad de la luz, lo que beneficia el cultivo autotrófico y además reduce el uso de fuentes de luz alterna al construirlo y operarlo en exteriores (Wang et al., 2012) .

Los FBR verticales poseen una menor área de contacto líquido-gas comparado con los horizontales, sin embargo logran un suministro continuo de gas, lo que genera una mezcla y transferencia de CO<sub>2</sub> eficiente (Miyamoto et al., 1988). De ahí, parte de la contribución del presente proyecto de investigación refiere a la modificación de la configuración convencional de los reactores horizontales, partiendo de su ventaja respecto al área de contacto líquido-gas al disponer de equivalencia en volumen de líquido y gas dentro del FBR, así como la aplicación de una pendiente entre niveles horizontales provista por las curvas de conexión, cuyo propósito fue favorecer las condiciones de mezcla y el suministro efectivo de gas.

Pese a que la mayor parte de la estructura de soporte del FBR fue horizontal, las curvas de conexión permitieron una leve diferencia de altura, generando una pendiente del 3.1% entre niveles. Tredici & Zittelli (1998) y Ávila León (2014) mencionan que el uso de pendientes entre el 2 y el 7% genera un aumento del coeficiente de transferencia de gas y del TRH, así como como la disminución en el tiempo de mezclado. Por otra parte, el FBR se fabricó usando una bolsa tubular de polipropileno de alta densidad de 0.15 m de diámetro nominal y 0.1 m de diámetro interno (considerando las pérdidas de volumen en los laterales), su longitud útil fue de 5.1 m, equivalentes a 40L (20L líquido y 20L gas). Por tanto, se elaboró una estructura de soporte de 5.7m de longitud (3 brazos y 2 curvas de interconexión), la cual simulaba los extremos de una estructura de soporte en media caña. Los brazos 1, 2 y 3 tuvieron una longitud horizontal y vertical de 1.64m-0.08m, 1.64m-0.085m y 1.62m-0.09, a correspondencia; mientras que cada curva midió 0.235m, conservando un ángulo de 90° durante su expansión, lo que minimizó el estrangulamiento de la bolsa pese a los dobleces. Finalmente, durante su operación (batch y continuo, respectivamente) se suministró una mezcla 7% v/v de CO<sub>2</sub>, ya que *C. Vulgaris* logra concentración final y productividad máxima de biomasa en un rango de 6 a 10% de CO<sub>2</sub> (Anjos et al., 2013) e inhibición entre 10 y 15% v/v de CO<sub>2</sub> (Chiu et al., 2008).

### 2.2 Análisis de muestras

#### Temperatura

De acuerdo a los resultados de la temperatura (°C) durante la operación del

FBR (datos no mostrados) se identificó que el ingreso y la salida de medio líquido nuevo (operación continua) tuvo una incidencia despreciable en la pérdida de temperatura comparada con la operación en Batch, siendo 0.4°C la diferencia de sus promedios. Además, aunque en las curvas hay ausencia de suministro de luz, el diseño contempló longitudes allí relativamente bajas y la influencia de los procesos convectivos, los cuales favorecieron la distribución uniforme de la temperatura en el sistema aún en los lugares en donde no había suministro de luz (Britannica, 2019). Por último, el sistema proporcionó una temperatura aproximada de 20-22°C (considerando el muestreo ex situ), lo cual pese a que permitió crecimiento, aún no cumplió con el rango óptimo para la maximización en la producción de biomasa ( $\approx 23-25^\circ\text{C}$ ) (Pawlita-Posmyk et al., 2018) y (Serra-Maia et al., 2016), lo que incide indirectamente en la remoción de CO<sub>2</sub> del sistema.

## pH

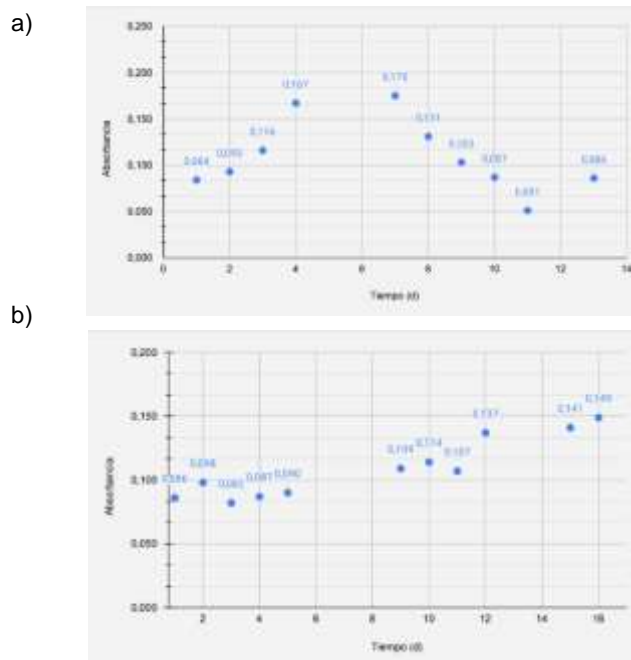
Hubo una tendencia de crecimiento en el pH durante la mayor parte del tiempo en ambas operaciones (datos no mostrados). García-Gozalbes y col. (2015) enuncian que la fotosíntesis de las microalgas en un medio de cultivo dirige a un aumento gradual y paulatino del pH en consecuencia al equilibrio químico de especies carbonatadas en el agua. Por tanto, los valores de pH obtenidos sugieren actividad fotosintética durante la mayor parte de la operación del reactor y paralelamente concuerdan con los resultados expuestos por (Tang et al., 2011) y (García-Gozalbes et al., 2015).

## Absorbancia y volumen de CO<sub>2</sub> en la muestra

La figura 11 presenta el crecimiento celular durante la operación del FBR en términos de absorbancia. De ahí, se observó que los primeros 7 días de la operación en Batch la absorbancia tuvo una tendencia de crecimiento marcada, no obstante se hubo descenso el resto del tiempo. Por otra parte, durante toda la operación en continuo se identificó un comportamiento de aumento. Es posible que lo anterior se deba a diferentes factores, como la modificación de la configuración y operación del sistema (suministro continuo de gas y líquido, acople del sistema de salida de gas, el cambio de las conexiones hidráulicas, la compensación del aire perdido usando un compresor para carro, la homogenización manual del sistema previo a la toma de muestras líquidas (condiciones aplicadas únicamente a la operación continua)), así como la presencia de una posible fuga.

**Figura 11**

*Cambio de la absorbancia vs Tiempo (d)*



*Nota.* Operación en a) Batch y b) continuo.

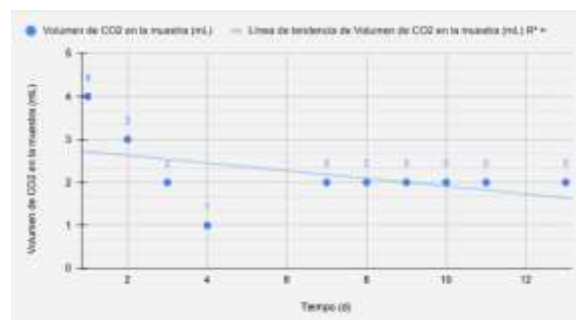
El montaje inicial en Batch presentó varias deficiencias las cuales no fueron corregidas durante su puesta en marcha, sino durante la operación en continuo. De ahí, factores como el suministro inicial de aire y medio líquido únicamente, el carácter deficiente de la mezcla durante el tiempo, la falta de comprobación de ausencia de fugas de gas en el FBR, la pérdida de área de contacto gas-líquido por pérdidas de gas y el uso exclusivo de válvulas de control de flujo de aire para acuario en las mangueras del FBR para dar hermeticidad al sistema, son agentes que explican su comportamiento durante la operación.

Es posible que el aumento de los primeros 7 días y su posterior disminución se relacione con la deficiencia en nutrientes, considerando que el montaje inicial era tan solo para 8 días. Además, puesto que el difusor estaba totalmente sumergido en el líquido, puede que la inyección rápida, continua, a contracorriente y con una presión importante al usar tanto un compresor de carro para suministro de aire, como una jeringa de 50mL para el CO<sub>2</sub> al comienzo, haya aumentado la fuerza motriz y por ende la transferencia de masa de CO<sub>2</sub> al agua, tal como lo sugiere (Meier et al., 2015); lo que explica a su vez el comportamiento lineal de descenso del CO<sub>2</sub> en la fase gaseosa durante los primeros 4 días (ver figura 12). No obstante, entre el día 7 y 13 se evidenció un valor constante de 2 mL de CO<sub>2</sub> y un descenso en el crecimiento celular, lo que posiblemente se debe a la caída de la disolución del CO<sub>2</sub> en el agua ocasionada por las condiciones de mezcla deficientes y la persistencia del flujo laminar; esto simultáneamente justifica la presencia de algunas zonas muertas, sedimentación celular y la formación de biopelículas sobre varias secciones de la bolsa (Huang et al.,

2017), características evidenciadas durante el monitoreo visual.

**Figura 12**

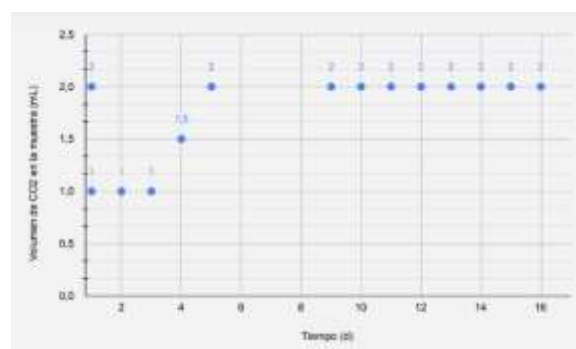
*Comparación volumen de CO<sub>2</sub> en la muestra (mL) vs Tiempo (d) durante la operación en Batch*



Por otra parte, la figura 13 presenta el volumen de CO<sub>2</sub> en la fase gaseosa durante la operación en continuo.

**Figura 13**

*Comparación volumen de CO<sub>2</sub> en la muestra (mL) vs Tiempo (d) durante la operación en continuo*



Posiblemente la adición de gas realizada con un compresor para carro por 20 minutos inicialmente, haya aumentado el movimiento y la presión del sistema y en consecuencia la transferencia de masa CO<sub>2</sub> – medio líquido; Adnan y col. (2020) indicando que la presión incide en el aumento de la solubilidad del CO<sub>2</sub> en el agua y Ceaza

(2018) refiere que precisamente el equilibrio de CO<sub>2</sub> existente entre la interface océano - atmósfera está notoriamente afectado por la fotosíntesis, respiración, el movimiento de las olas y la temperatura de la superficie oceánica. Lo que indica que la disminución inicial del CO<sub>2</sub> se debió principalmente al aumento del movimiento y la presión en el FBR.

Por otra parte, la constancia de 2 mL de CO<sub>2</sub> en la fase gaseosa a partir del 5 día y aun así la persistencia en la tendencia de crecimiento celular sugiere que la adición de la mezcla de CO<sub>2</sub> y aire así sea en un caudal bajo pero frecuente y constante, favorece su disolución en el agua y por ende su aprovechamiento por las microalgas; además, la mezcla manual previa a la toma de muestras y el eventual suministro de aire tras pérdidas de volumen en la fracción gaseosa, permitió un ligero aumento en el movimiento del medio, lo que a su vez favoreció el aumento en la disolución del CO<sub>2</sub>, la tendencia en el crecimiento celular y una eventual disminución de generación de biopelículas en la superficie del FBR, lo que concuerda con lo expuesto por (Huang et al., 2017). Pese a esto, se observó persistencia de flujo laminar y condiciones de mezcla deficientes, coloración verde predominante en el brazo horizontal donde se ubicó el suministro de medio líquido nuevo indicando que allí hay un mayor crecimiento, además la mezcla manual previa a la toma de muestras líquida permitió mayor homogeneidad y en consecuencia una muestra significativa para la estimación del crecimiento celular, comparada con las tomadas en Batch.

Por último, es importante mencionar que durante ambas operaciones se identificó una pérdida de gas en el sistema pese a los cambios estructurales realizados en la

configuración, lo que sugiere la presencia de una fuga y por ende impide una cuantificación exacta del volumen de CO<sub>2</sub> dentro del sistema.

## CONCLUSIONES

Se construyó el FBR de micro algas con el TRH y el volumen establecido en los parámetros de diseño, además se lograron integrar materiales de bajo costo, fácil acceso y vida útil prolongada en su mayoría. Lo más costoso fue el arduino UNO R3 y las dos bombas de dosificación del módulo electrónico externo operado en el sistema continuo; sin embargo, podría hacerse más económico el proyecto mediante la impresión 3D y el ensamble de las bombas en el laboratorio, lo cual pese a que disminuye su fácil acceso, podría incrementar su vida útil, viabilidad económica y rendimiento en el tiempo, comparadas con las bombas aplicadas.

El proceso de diseño, construcción y delimitación de materiales tuvo un enfoque iterativo, con el objetivo de identificar las condiciones idóneas de la estructura de soporte, los sellos de entrada y salida de medio líquido y gas, el sistema sifón, el sistema de salida de gas, la resistencia de los materiales, las conexiones hidráulicas, la automatización del sistema mediante la programación de las bombas, la incidencia del suministro de gas y líquido, condiciones de mezcla, temperatura e incluso la toma de muestras del FBR.

Los resultados de la puesta en marcha en Batch y continuo, así como la evaluación de remoción del CO<sub>2</sub> no son del todo análogos debido a que sus condiciones operativas fueron distintas. Básicamente la operación en Batch fue el insumo que sirvió para la

identificación y aplicación de algunos de los parámetros de mejora que debían emplearse al sistema en continuo, así como para la delimitación de las recomendaciones para las fases posteriores del proyecto.

Durante el montaje del sistema en Batch se identificó que la pendiente del 3.1% favoreció un poco la homogenización, la mezcla inicial del líquido en el FBR, así como una distribución equivalente de las fases pese a las diferencias de altura de cada brazo horizontal. Sin embargo se observó que el uso de válvulas de control de flujo de aire para acuario y la ausencia de verificación de fugas de gas en la bolsa, son factores que limitan la hermeticidad total del sistema y por ende su evaluación. Además, la mezcla deficiente, la pérdida del área de contacto líquido-gas debido al escape del gas y la poca transferencia de masa CO<sub>2</sub>-medio líquido debido a la persistencia del flujo laminar al no inyectar ni gas ni líquido durante la mayor parte de la operación, son condiciones que restringen el crecimiento de las microalgas.

Por último, en la operación en continuo se determinó que la integración del sistema de salida de gas, el reemplazó de la mayor parte de las válvulas de control de flujo de aire y las mangueras de vinilo transparente para acuario por conectores directos, válvulas anti retorno y manguera siliconada, la adición constante de la mezcla de CO<sub>2</sub>-aire y medio líquido nuevo, el eventual suministro de aire tras pérdidas de volumen en la fracción gaseosa, así como la mezcla manual previa a la toma de muestras, permitió una mayor conservación de la presión hidrostática del sistema, así como el incremento del movimiento del medio, lo que pudo relacionarse con un aumento en la disolución del CO<sub>2</sub> y el crecimiento celular.

## REFERENCIAS

- Adnan, A. I., Ong, M. Y., Nomanbhay, S., & Show, P. L. (2020). Determination of Dissolved CO<sub>2</sub> Concentration in Culture Media: Evaluation of pH Value and Mathematical Data. *Processes*, 8(11), 1373. <https://doi.org/10.3390/pr8111373>
- Anjos, M., Fernandes, B. D., Vicente, A. A., Teixeira, J. A., & Dragone, G. (2013). Bioreactor Technology Optimization of CO<sub>2</sub> bio-mitigation by *Chlorella vulgaris*. *Bioreactor Technology*, 139, 149–154. <https://doi.org/10.1016/j.biotech.2013.04.032>
- Aristizábal Hernández, J. D. (2014). Validación y evaluación comparativa de la eficiencia de una estufa de leña mejorada bajo condiciones controladas y prueba de campo. *Informador Técnico*, 78(1), 12. <https://doi.org/10.23850/22565035.65>
- Avila Leon, I. A. (2014). Estudo da produção de biomassa e lipídios no cultivo de *Neochloris oleoabundans* sob diferentes condições de estresse nutricional e físico. São Paulo, , Brazil.
- Britannica, T. Editors of Encyclopaedia (2019, March 29). convection. *Encyclopedia Britannica*. <https://www.britannica.com/science/convection>
- Cajamar caja rural. (Junio de 2016). Cultivos de microalgas a gran escala: sistemas de producción . España.
- Cheng, J., Xu, J., Ye, Q., Lai, X., Zhang, X., & Zhou, J. (2019). Strengthening mass transfer of carbon dioxide microbubbles dissolved in a horizontal tubular photo-bioreactor for improving microalgae growth. *Bioreactor Technology*, 277, 11-17. <https://doi.org/10.1016/j.biotech.2019.01.019>
- Chiu, S.-Y., Kao, C.-Y., Chen, C.-H., Kuan, T.-C., Ong, S.-C., & Lin, C.-S. (2008). Reduction of CO<sub>2</sub> by a high-density culture of *Chlorella* sp. In a semicontinuous photobioreactor. *Bioreactor Technology*, 99(9), 3389-3396. <https://doi.org/10.1016/j.biotech.2007.08.013>
- Ceaza. (2018). Guía técnica para el estudiante de acuicultura. Chile.
- García-Gozalbes, C. C., Arbib, Z., & Perales-Vargas-Machuca, J. A. (2015). Cinéticas de crecimiento y consumo de nutrientes de microalgas en aguas residuales urbanas con diferentes niveles de tratamiento. *Tecnología y ciencias del agua*, 6(1), 49-68.
- Huang, Q., Jiang, F., Wang, L., & Yang, C. (2017). Design of Photobioreactors for Mass Cultivation of Photosynthetic Organisms. *Engineering*, 3(3), 318-329. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2017.03.020>
- Makris, K. F., Langeveld, J., & Clemens, F. H. L. R. (2020). A review on the durability of PVC sewer pipes: Research vs. practice. *Structure and Infrastructure Engineering*, 16(6), 880-897. <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1673442>
- Meier, L., Pérez, R., Azócar, L., Rivas, M., & Jeison, D. (2015). Photosynthetic CO<sub>2</sub> uptake by microalgae: An attractive tool for biogas upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 73, 102–109. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.10.032>
- Miyamoto, K., Wable, O., & Benemann, J. R. (1988). Vertical tubular reactor for microalgae cultivation. *Biotechnology Letters*, 10(10), 703-708. <https://doi.org/10.1007/BF01025286>
- ONU. (19 de Noviembre de 2021). *un.org*. Obtenido de <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/energy/>
- Pabuena, M. A., & Pasqualino, J. (2014). Potencial de Uso de Biogás en Colombia Potential Uses of Biogas in Colombia. *Teknos*, 14(1900–7388), 27–33.



- Pawlita-Posmyk, M., Wzorek, M., & Placzek, M. (2018). The influence of temperature on algal biomass growth for biogas production. *MATEC Web of Conferences*, 240, 04008. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201824004008>
- Shah, G., Ahmad, E., Pant, K. K., & Vijay, V. K. (2021). Comprehending the contemporary state of art in biogas enrichment and CO<sub>2</sub> capture technologies via swing adsorption. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(9), 6588–6612. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.116>
- Serra-Maia, R., Bernard, O., Gonçalves, A., Bensalem, S., & Lopes, F. (2016). Influence of temperature on *Chlorella vulgaris* growth and mortality rates in a photobioreactor. *Algal Research*, 18, 352-359. <https://doi.org/10.1016/j.algal.2016.06.016>
- Tang, D., Han, W., Li, P., Miao, X., & Zhong, J. (2011). CO<sub>2</sub> biofixation and fatty acid composition of *Scenedesmus obliquus* and *Chlorella pyrenoidosa* in response to different CO<sub>2</sub> levels. *Bioresour. Technology*, 102(3), 3071-3076. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.10.047>
- Tredici, M. R., & Zittelli, G. C. (1998). Efficiency of sunlight utilization: Tubular versus flat photobioreactors. *Biotechnology and Bioengineering*, 57(2), 187-197. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0290\(19980120\)57:2<187::AID-BIT7>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0290(19980120)57:2<187::AID-BIT7>3.0.CO;2-J)
- Zhou, K., Chaemchuen, S., & Verpoort, F. (2017). Alternative materials in technologies for Biogas upgrading via CO<sub>2</sub> capture. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 79(April), 1414–1441. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.198>
- Wang, B., Lan, C. Q., & Horsman, M. (2012). Closed photobioreactors for production of microalgal biomasses. *Biotechnology Advances*, 30(4), 904-912. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2012.01.019>