



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
ZARAGOZA**

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE LA
HIDRODINÁMICA DE UN FOTOBIORREACTOR TUBULAR
PARA EL TRATAMIENTO DE EMISIONES DE CO₂**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO

P R E S E N T A:

EDGAR ORTIZ LOBATO



**DIRECTOR DE TESIS:
DR. ARMANDO GONZÁLEZ SÁNCHEZ**

CIUDAD DE MÉXICO, 2021



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

El trabajo experimental fue realizado en el Laboratorio de Ingeniería Ambiental del Instituto de Ingeniería de la UNAM que cuenta con certificado de conformidad otorgado por el organismo acreditado Certificación Mexicana, S.C., por haber implementado y mantener un Sistema de Gestión de la Calidad de conformidad con los requisitos de la norma internacional ISO 9001:2015 No. de Certificado CMX C SGC 155 2017, válido en el período del 09 de noviembre de 2017 al 09 de noviembre de 2020.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por todo el apoyo que me han brindado, tanto económico como emocional, por animarme a seguir adelante y aconsejarme cuando me sentí perdido.

Al Dr. Armando González Sánchez, por compartir su conocimiento, por su paciencia y por la asesoría en cada etapa de este proyecto.

A los profesores de mi facultad, quienes se esfuerzan por compartirnos su conocimiento y experiencias.

A Vanessa Hernández por estar a mi lado todo este tiempo y apoyarme cuando lo necesité.

A mis compañeros del Instituto de Ingeniería: Ángel Velázquez (Pet), Misael Ramírez, Elisa García y Arnold Ramírez, por las ideas que me aportaron y sobre todo por su amistad.

Y a Luis Cedillo por su amistad.

Al proyecto CEMIE-BIO Clúster Biocombustibles Gaseosos 247006 del fondo SENER-CONACyT por su apoyo financiero.

INDICE

RESUMEN	5
INTRODUCCIÓN.....	6
1. GENERALIDADES DEL CO₂	8
1.1 Origen.....	8
1.2 Propiedades fisicoquímicas.....	11
1.3 Equilibrio del sistema CO ₂ - agua.....	11
1.4 Constantes de equilibrio	13
1.5 Solubilidad.....	14
1.6 Absorción de CO ₂ en agua.....	16
1.7 Equipos utilizados en absorción.....	17
1.7.1 Torres empacadas.....	18
1.7.2 Torres de platos	19
1.7.3 Columnas de burbujeo	20
1.7.4 Airlift.....	22
1.7.5 Torres de aspersion.....	22
1.8 Absorción de CO ₂ en aminas.....	23
2 FOTOSÍNTESIS	25
2.1 Fase luminosa.....	25
2.2 Ciclo de Calvin	26
3 MICROALGAS	27
3.1 Aplicaciones.....	27
3.2 Nutrición.....	27
3.2.1 Nitrógeno.....	28
3.2.2 Fosforo	28
3.2.3 Carbono.....	29
4 FOTOBIOREACTORES	30
4.1 FACTORES QUE DETERMINAN SU DESEMPEÑO.....	33
4.1.1 Luz.....	33
4.1.2 Temperatura	33
4.1.3 pH.....	34
4.1.4 Mezclado	34
4.1.5 Oxígeno disuelto	34

5	EL AIRE INTERIOR Y SU TRATAMIENTO	36
5.1	Principales contaminantes	36
5.2	Eliminación de CO ₂	37
5.3	Eliminación de compuestos orgánicos volátiles.....	38
5.4	Eliminación de Material particulado	39
5.5	Eliminación de compuestos biológicos	40
6	BIOGÁS	41
7	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	45
8	HIPÓTESIS	45
9	OBJETIVOS	45
9.1	Objetivo General	45
9.2	Objetivos Específicos.....	45
10	MATERIALES Y METODOS	46
10.1	Fotobiorreactor airlift.....	46
10.2	Determinación del volumen máximo y mínimo de operación.....	47
10.3	Flujo de aire.....	48
10.4	Determinación del número de Reynolds (N_{Re}).....	50
10.5	Hold-up.....	50
10.6	Determinación del coeficiente volumétrico de transferencia de masa k_La	51
11	RESULTADOS	53
11.1	Velocidad y número de Reynolds.....	53
11.2	Hold-up.....	60
11.3	Coeficiente volumétrico de transferencia de masa K_La en función del flujo de aire	61
11.4	Medición de pH del fotobiorreactor inoculado con microalgas (prueba de concepto) ..	74
12	CONCLUSIONES	74
13	REFERENCIAS	76

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó el diseño, la construcción, y la caracterización hidrodinámica de un fotobiorreactor tubular de tipo airlift cuya capacidad es de 430 ml útiles, además de una prueba de concepto del fotobiorreactor con microorganismos para corroborar su funcionamiento, esto se pudo comprobar con el registro del aumento del pH producido por el consumo de carbono inorgánico por parte de los microorganismos. Para la caracterización hidrodinámica se hicieron pruebas de velocidad lineal del líquido en función de 4 flujos de aire, que fueron de 0.25, 0.5, 0.75 y 1 LPM , encontrando una relación directa entre el flujo de aire sobre la velocidad del líquido, logrando velocidades de 0.130, 0.170, 0.181 y 0.198 m/s y número de Reynolds de 806.38, 1025.66, 1073.89 y 1158.88 respectivamente para cada flujo, por otra parte se incrementó la altura de la columna 30 cm buscando un aumento en el número de Reynolds. Esto resulto exitoso registrando para el flujo de aire de 0.75 y 1 LPM un aumento en la velocidad lineal del líquido de 0.84 y 0.116 m/s respectivamente lo que se traduce en un aumento del número de Reynolds; De igual forma se determinó el coeficiente volumétrico de transferencia de masa k_{La} tanto para la columna de burbujeo del reactor aislada, así como para el sistema completo, que es, contemplando la recirculación por parte del airlift.

INTRODUCCIÓN.

Actualmente a nivel mundial, se considera que el cambio climático no es uno, sino el principal reto del siglo XXI, ya que a pesar de haberse creado formalmente instrumentos jurídicos a nivel internacional y a nivel nacional en nuestro país, no se han logrado implementar los diversos mecanismos propuestos para evitar alcanzar niveles más altos de gases de efecto invernadero, debido a esto las metas que se habían propuesto en el calendario para el 2050 no se han logrado, esto pronostica varios estragos que como humanos habremos de enfrentarnos a mediano y largo plazo. (Gamboa Montejo & Gutiérrez Sánchez, 2019); La influencia humana en el sistema climático es clara, y las emisiones antropógenas recientes de gases de efecto invernadero son las más altas de la historia (K. Pachauri, et al., 2015).

Si bien, es verdad que estos gases se producen de manera natural para la supervivencia de los seres vivos, también es cierto que en las últimas décadas se ha identificado un importante incremento en la concentración de gases de efecto invernadero (GEI) que alteran la composición química atmosférica. Esta concentración ha superado las 400 partes por millón, colocándose 40% por encima de los valores medios registrados en el último medio millón de años. (Guerra Abud, et al., 2013).

Uno de los factores que genera los problemas que vemos respecto al cambio climático es la demanda de energía y recursos que cada habitante del planeta presenta y que a partir de mediados del siglo XX ha aumentado exponencialmente.

Los sectores más demandantes de energía son el transporte, la industria y el sector doméstico-comercial, siendo el transporte el sector que más demanda energía y cuya demanda está creciendo más rápidamente; utiliza alrededor del 30% del consumo energético mundial (Molina, et al., 2017).

En este contexto se ha vuelto indispensable desarrollar tecnologías enfocadas a la reutilización de residuos, a la generación de energías limpias de bajo costo, así como tecnologías dedicadas al cuidado del medio ambiente (Hernández Pérez & I.Labbé, 2014). Entre estas tecnologías, los cultivos de microalgas adquieren un gran protagonismo, al ser considerados eco-amigables, ya que reciclan eficientemente contaminantes desde medios líquidos y gaseosos (Olguín, 2003), incorporándolos a su metabolismo para generación de biomasa.

Con el fin de proporcionar un crecimiento eficiente y aprovechar el potencial de las microalgas es necesario el uso de fotobiorreactores, sin embargo, la elección de dichos reactores dependerá de la situación ya que tanto las especies de algas disponibles y el destino final jugarán un papel importante (Ramírez Mérida, et al., 2013)

El presente trabajo tiene como finalidad el diseño, caracterización y construcción de un fotobiorreactor de tipo airlift en el que se pretende llevar a cabo un cultivo de microalgas alcalófilas,

que bien, podría tener diversas aplicaciones enfocadas a la eliminación del CO₂ y de ser posible de otros contaminantes. Por una parte, una posible aplicación es el enriquecimiento de biogás, cuya composición aunque es variable según la materias primas utilizadas para su producción así como de las condiciones en las que se llevó a cabo , de manera general contiene de un 50 a un 75% de metano y de un 25 a un 40% de CO₂ así como trazas de algunas otras sustancias, a pesar de que a esta composición puede tener algunas aplicaciones, es necesario que tenga una concentración de metano mayor al 98% para poder ser usado como sustituto del gas natural , esto implica, eliminar una gran cantidad de CO₂ .

A pesar de que existen tecnologías que pueden cumplir con esta función, tales como la absorción, adsorción, destilación criogénica y el uso de membranas. Estas resultan ser costosas debido a la alta demanda de energía necesaria para su operación, es por ello que la eliminación de este gas utilizando microalgas tiene un gran potencial debido a su alta fijación de carbono siendo una alternativa eficiente y económica.

1. GENERALIDADES DEL CO₂

El CO₂ es un gas incoloro e inodoro, está compuesto por un átomo de carbono unido a dos átomos de oxígeno mediante enlaces covalentes dobles (Anon., 2010). Es producto de factores como la respiración de organismos aerobios y la quema de combustibles principalmente de origen fósil. Está catalogado como un gas de efecto invernadero cuya composición en la atmosfera representa un .0314% volumen. (Tan, 2014)

En las últimas décadas se ha identificado un incremento en la concentración superando las 400 ppm, colocándose un 40% por encima de los valores medios registrados en el último medio millón de años. (Guerra Abud, et al., 2013). Según datos obtenidos en el observatorio de Mauna Loa en septiembre del 2020 se alcanzó una concentración global de 409.89 ppm (Observatorio Mauna Loa, 2020)

Se encuentra como una sustancia no deseada en el biogás representando de un 25 a un 40% en su composición. (Bohutskyi & Bower, 2013) Es un compuesto muy versátil, se emplea en extintores de incendios, bebidas carbonatada, como refrigerante entre otros usos. (Anon., 2010)

1.1 Origen

El CO₂ es producido mediante la fermentación de líquidos, la respiración humana y animal; los seres humanos exhalamos dióxido de carbono aproximadamente 4.4% volumen (Anon., 2010).

La principal fuente de emisiones de este gas es mediante la combustión de hidrocarburos cuyo objetivo es generar energía y ocasionalmente ser una fuente de luz (Tan, 2014).

En una reacción de combustión, los reactivos son combustibles y un oxidante, y los productos incluyen varios contaminantes del aire y dióxido de carbono donde La relación aire-combustible determina la química de combustión dando resultado a tres posibles escenarios.

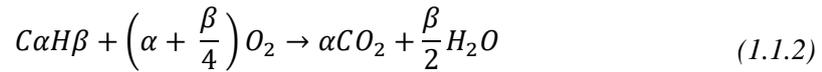
- Combustión estequiométrica: la cual se considera como una combustión ideal, se presenta cuando el aire y el combustible se mezclan en una proporción tal que tanto el combustible como el oxígeno del aire se consumen por completo

El proceso de este tipo de combustión se puede describir como:



Donde los valores de a, b y c dependen de α y β

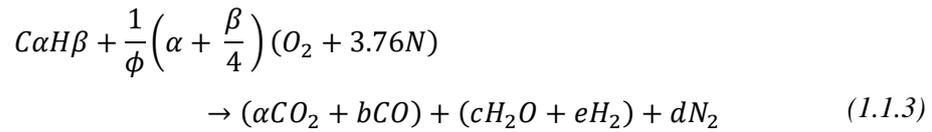
La ecuación en términos de α y β



En general, todos los combustibles fósiles líquidos y gaseosos son mezclas de múltiples componentes. Sin embargo, para facilitar el análisis de ingeniería, se pueden simplificar como una fórmula promedio $C_\alpha H_\beta$, donde α y β representan el número de átomos de carbono e hidrógeno en el combustible, respectivamente.

- Combustión rica en combustible donde se llevará a cabo una combustión incompleta producto de la falta de oxígeno para quemar el combustible y por ende quedará combustible sin reaccionar.

La siguiente reacción muestra el proceso de esta combustión.



Donde:

- $\alpha = a + b$
- $\beta = 2c + 2e$
- $\frac{2}{\phi} \left(\alpha + \frac{\beta}{4}\right) = 2a + b + c$
- $\frac{4.76}{\phi} \left(\alpha + \frac{\beta}{4}\right) * 0.79 = d$

a , b , c y e no se pueden determinar porque hay cuatro incógnitas en tres ecuaciones. Para resolver el problema, se necesita una ecuación más. Esta ecuación se puede derivar del equilibrio químico

- ϕ es un factor de equivalencia que relaciona la relación de aire-combustible ideal y una relación de aire-combustible real, cuando el valor de ϕ es mayor a 1 existe un exceso de combustible y si es menor a 1 representa una deficiencia del mismo.

$$\phi = \frac{(A/F)_s}{(A/F)_M} \quad (1.1.4)$$

Donde el subíndice s refiere a la relación estequiométrica (teórica) y el subíndice M refiere a la relación real.

La relación A/F a su vez es equivalente a una relación de cantidad de moles de aire y combustible.

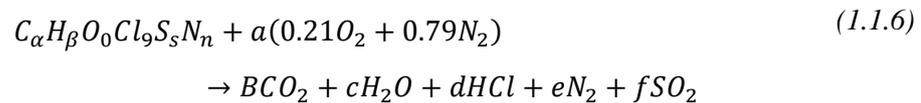
$$\frac{A}{F} = \frac{n_a}{n_f} \quad (1.1.5)$$

Donde el subíndice a y f representan la cantidad molar de, aire y combustible respectivamente.

El último escenario es que exista una combustión pobre en combustible, es decir, el oxígeno estará en exceso.

Sin embargo, es inusual tener combustible puro, siempre existirán átomos diferentes al hidrógeno y al carbono, por ejemplo, azufre y algunos aditivos en el petróleo y el gas, teniendo como resultado una complicación en la estequiometría.

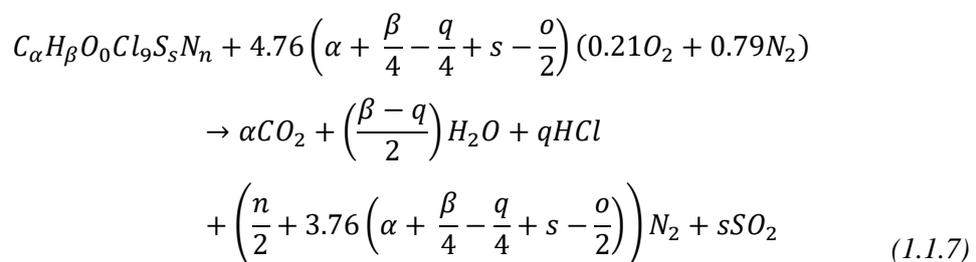
Para un combustible fósil general, la combustión estequiométrica correspondiente se puede describir cómo:



Donde:

- $\alpha = b$
- $\beta = 2c + d$
- $q = d$
- $s = f$
- $o + 2(0.21)a = 2b + c + 2f$
- $n + 2(0.79)a = 2e$

Al resolver las ecuaciones anteriores la fórmula de reacción química para la combustión estequiométrica del combustible complejo se convierte en:



(Tan, 2014).

1.2 Propiedades fisicoquímicas

El CO₂ tiene un peso molecular de 44.01 g/mol, una solubilidad en agua pura a 25°C y 1atm, de 1.45 g/L, un punto de ebullición de -57°C y un punto de fusión de -78° a 2 atm de presión.

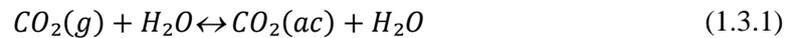
1.3 Equilibrio del sistema CO₂- agua.

Un sistema que está en equilibrio no experimenta cambios en sus propiedades, por lo cual estas pueden ser medidas y calculadas, si alguna de estas propiedades es modificada el estado de equilibrio también cambiara a uno diferente. (Çengel, 2012)

Existen diversos tipos de equilibrio tales como el térmico, mecánico, equilibrio de fases y equilibrio químico, donde este último es un estado dinámico en el cual no se observan cambios en el tiempo transcurrido, cuando una reacción química llega al equilibrio las concentraciones de reactivos y productos permanecen constantes al paso del tiempo sin que se produzcan cambios visibles en el sistema, sin embargo, a nivel molecular, sigue existiendo una gran actividad, debido a que los reactivos siguen formando moléculas de productos y viceversa. (Chang, 2002)

Un sistema no puede estar en equilibrio termodinámico hasta que todos los equilibrios antes mencionados sean satisfechos. (Çengel, 2012)

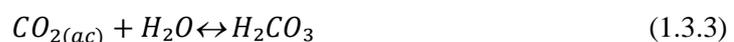
Para el caso del nuestro sistema, el proceso inicia cuando el CO₂ proveniente del ambiente penetra en el agua pasando a una fase acuosa donde se lleva a cabo una reacción ácido-base, fomentando así una mejor absorción del CO₂ en el medio.



El equilibrio entre las fases se cuantifica mediante la solubilidad molar K₀ (ley de Henry), aunque la concentración de CO_{2(ac)} excede la del H₂CO₃ se expresa toda la concentración del CO₂ mediante la concentración H₂CO₃.

$$K_o = \frac{[H_2CO_3]}{P_{CO_2}} \quad (1.3.2)$$

Una vez que el CO₂ se encuentra en fase acuosa, en primera instancia, genera ácido carbónico según la siguiente reacción.



Posterior a ello, el ácido carbónico se disocia formando iones bicarbonatos, carbonatos y protones.



Donde las condiciones de equilibrio se cuantifican mediante las constantes de disociación.

$$K_1 = \frac{[HCO_3^-][H^+]}{[H_2CO_3]} \quad (1.3.6)$$

$$K_2 = \frac{[CO_3^{2-}][H^+]}{[HCO_3^-]} \quad (1.3.7)$$

Por último, la disociación del agua obedece la condición de equilibrio K_w .

$$K_w = [H^+][OH^-] \quad (1.3.8)$$

La concentración de $[H^+]$ se expresa mediante un valor de pH. Definido como:

$$pH = -\log_{10}[H^+] \quad (1.3.9)$$

En el caso donde existe presencia de carbonatos, estos pueden hidrolizar al agua generando así la formación de iones OH^-



Pueden existir más procesos químicos que conllevan a la formación de bicarbonatos, como la reacción directa entre el ácido carbónico y el ion carbonato.



De igual manera el CO_2 puede reaccionar con los iones OH^- producto de la hidrólisis del carbonato. (IGME, 2002)



1.4 Constantes de equilibrio

Los valores de solubilidad y de las constantes de disociación dependen de la temperatura, aunque los valores de K también dependen de la concentración de soluto debido a que la formación de complejos entre los iones carbónicos y las moléculas e iones de la solución dificulta la participación de las moléculas carbónicas disueltas y de los iones en las reacciones de equilibrio termodinámico." (IGME, 2002) Debido a esto, en las constantes presentadas en las ecuaciones (1.3.6)(1.3.7)(1.3.2) las concentraciones son remplazadas por las actividades

$$k_0 = \frac{\alpha_{\text{H}_2\text{CO}_3}}{p_{\text{CO}_2}} = \gamma_\alpha \frac{[\text{H}_2\text{CO}_3]}{P_{\text{CO}_2}} \quad (1.4.1)$$

$$K^1 = \frac{\alpha_{\text{H}} * \alpha_{\text{HCO}_3}}{\alpha_{\text{H}_2\text{CO}_3}} = \frac{\gamma_{\text{H}}[\text{HCO}_3^-]\gamma_{\text{b}}[\text{H}^+]}{\gamma_{\text{a}}[\text{H}_2\text{CO}_3]} \quad (1.4.2)$$

$$K^2 = \frac{\alpha_{\text{H}} * \alpha_{\text{CO}_3}}{\alpha_{\text{HCO}_3}} = \frac{\gamma_{\text{H}}[\text{CO}_3^{2-}]\gamma_{\text{c}}[\text{H}^+]}{\gamma_{\text{b}}[\text{HCO}_3^-]} \quad (1.4.3)$$

En soluciones no ideales es más práctico utilizar las constantes de solubilidad aparente para describir la relación de las concentraciones reales medibles.

$$K'_0 = \frac{k_0}{\gamma_{\text{H}_2\text{CO}_3}} \quad (1.4.4)$$

$$k'_1 = \frac{\gamma_{\text{H}_2\text{CO}_3}}{\gamma_{\text{H}} * \gamma_{\text{HCO}_3}} k_1 \quad (1.4.5)$$

$$k'_2 = \frac{\gamma_{\text{HCO}_3}}{\gamma_{\text{H}} * \gamma_{\text{CO}_3^2}} k_2 \quad (1.4.6)$$

Los valores de las constantes de disociación se expresan como pK.

$$pk = -\log K \quad (1.4.7)$$

Para soluciones ideales (agua dulce) se puede calcular las constantes de disociación en rangos de temperaturas de 0 a 40°C según datos presentados tanto por Harned y sus colaboradores, así como por Millero y Roy (1997) siendo ambos datos prácticamente iguales.

$$pk_o = -2622.38T^{-1} - 0.0178471T + 15.5873 \quad (1.4.8)$$

$$pk_1 = 3404.71T^{-1} + 0.032786T - 14.8435 \quad (1.4.9)$$

$$pk_2 = 2902.39T^{-1} + 0.02379T - 6.4980 \quad (1.4.10)$$

$$\ln K_w = 148.9802 - 13847.26 T^{-1} - 23.6521 \ln T \quad (1.4.11)$$

Donde la T está dada en Kelvin.

Para el caso de agua salada se presentan datos obtenidos por Millero y Roy (1997) cuyos valores son prácticamente iguales a los publicados por Weiss (1974) y por Mehrbach et al (1973). Los datos presentes se encuentran en un rango de 0 a 40°C y salinidades de 0 a 40° (S=35%).

$$\ln k'_0 = -60.2409 + 9345.17T^{-1} + 23.3585 \ln(0.01T) + S[0.023656(0.01T) + 0.0047036(0.01T)^2] \quad (1.4.12)$$

$$pk'_1 = 3670.7T^{-1} - 62.008 + 9.7944 \ln T - 0.0118S + 0.000116S^2 \quad (1.4.13)$$

$$pk'_2 = 1394.7T^{-1} + 4.777 - 0.0184S + 0.000118S^2 \quad (1.4.14)$$

para los valores de K_0 la correlación es perteneciente a Weiss (1974) y para K'_1 y K'_2 es perteneciente a Mehrbach et al (1973). (IGME, 2002)

1.5 Solubilidad.

La solubilidad se define como la máxima cantidad de un soluto que se puede disolver en determinada cantidad de disolvente a una temperatura específica por lo que la temperatura afecta la solubilidad

de la mayor parte de las sustancias. Para los gases la solubilidad por lo general disminuye al aumentar la temperatura.

La presión, particularmente en el caso de los gases, tiene un gran efecto, cosa que no pasa para los estados sólido y líquido. La relación que existe entre la presión y la solubilidad de los gases está dada por la ley de Henry que establece que la solubilidad de un gas es proporcional a la presión del gas sobre la disolución. (Chang, 2002).

$$C = HP \quad (1.5.1)$$

Donde:

- C= concentración molar del gas disuelto (mol/L)
- H = constante de Henry que depende de la temperatura
- P = presión parcial del gas sobre la disolución (atm)

La mayor parte de los gases obedece a la ley de Henry, sin embargo, existen excepciones, por ejemplo, si el gas disuelto reacciona con el agua su solubilidad será mayor, sin embargo, cuando existen sales en soluciones acuosas, la solubilidad del gas usualmente disminuye. (Valecia, et al., 2012)

La solubilidad del CO₂ se puede calcular mediante la metodología desarrollada por Dirk Willem van Krevelen y Jan Hoftijzer la cual fue propuesto originalmente por Setchenow en 1892.

El método empírico relaciona la constante de la ley de Henry del CO₂ en agua pura, H₀, con la de la solución electrolítica H, mediante:

$$\log_{10}\left(\frac{H}{H_0}\right) = hI \quad (1.5.2)$$

Donde:

- h= suma de la suma de la contribución de los iones en (L/g) definida por:

$$h = h_+ + h_- + h_g \quad (1.5.3)$$

Donde:

- h_g es la especie iónica asociada con el gas.
- I es la fuerza iónica de la solución definida por:

$$I = \frac{1}{2} \sum C_i z_j^2 \quad (1.5.4)$$

Donde:

- C_i = concentración de iones
- Z_i es la carga de los iones

En la siguiente tabla se muestra algunos valores de h_g, h_+ y h_- necesarios para determinar la contribución de los iones en la ecuación(1.5.3). (Wilcox, 2012)

Valores de h y h_+ (L/g ion)			
h_+ (L/g ion)		h (L/g ion)	
H ⁺	0	NO ₃ ⁻	-0.001
NH ₄ ⁺	0.028	Br ⁻	0.012
Fe ²⁺	0.049	Cl ⁻	0.021
Mg ²⁺	0.0551	CO ₃ ²⁻	0.021
Ca ²⁺	0.053	SO ₄ ²⁻	0.022
Co ²⁺	0.058	OH ⁻	0.066
Ni ²⁺	0.059		
K ⁺	0.074		
Na ⁺	0.091		

Valores de h_g (L/g ion)	
T(°C)	h_g
0	-0.007
15	-0.01
25	-0.019
40	-0.026
50	-0.029

1.6 Absorción de CO₂ en agua

La absorción de gas es una operación unitaria de transferencia de masa en la que los componentes solubles de una mezcla de gases se disuelven en un líquido (Perry, et al., 1997) en este proceso participan por lo menos tres sustancias: el componente gaseoso a separar, el gas portador y el disolvente (absorbente). Es una operación utilizada con mucha frecuencia en la industria química con la finalidad de recuperar un componente gaseoso deseado, eliminar un componente gaseoso no deseado o la obtención de un líquido, por ejemplo, la producción de ácido sulfúrico por absorción de azufre gaseoso en agua.

La transferencia de masa se lleva cabo por el fenómeno de difusión el cual ocurre desde el seno del gas hasta la interfase donde alcanza su equilibrio de fases con el líquido (Wilcox, 2012), posteriormente se difunde a través de una película líquida, esta difusión se produce a una velocidad proporcional a la diferencia de concentraciones en el exterior e interior de la película líquida, luego de esto es difundida hasta el seno del líquido (Whitman, 1924)

La absorción se puede clasificar en dos tipos dependiendo de la interacción del gas y el absorbente:

- Absorción física: donde existen reacciones insignificantes.
- Absorción química: Esta absorción da como resultado nuevas sustancias producto de las reacciones que se generan.

Para nuestro caso en particular la absorción del CO_2 se lleva a cabo de la siguiente manera:

1. En este primer paso, la difusión de CO_2 tiene lugar en la fase gaseosa de una mezcla determinada hasta llegar a la interfase líquido-gas.
2. El segundo paso implica la disolución del CO_2 en una película líquida que separa las fases gaseosa y líquida. La concentración de CO_2 en la interfaz gas-líquido suele estar determinada por la ley de Henry.
3. El CO_2 se difunde a través del seno del líquido.

Para el caso de la absorción física pura este sería el último paso, sin embargo, en absorción química se añaden un paso más el cual consiste en la reacción del CO_2 con un agente aglutinante. En la figura 1.6.1 se muestran de manera gráfica los pasos descritos anteriormente. (Wilcox, 2012)

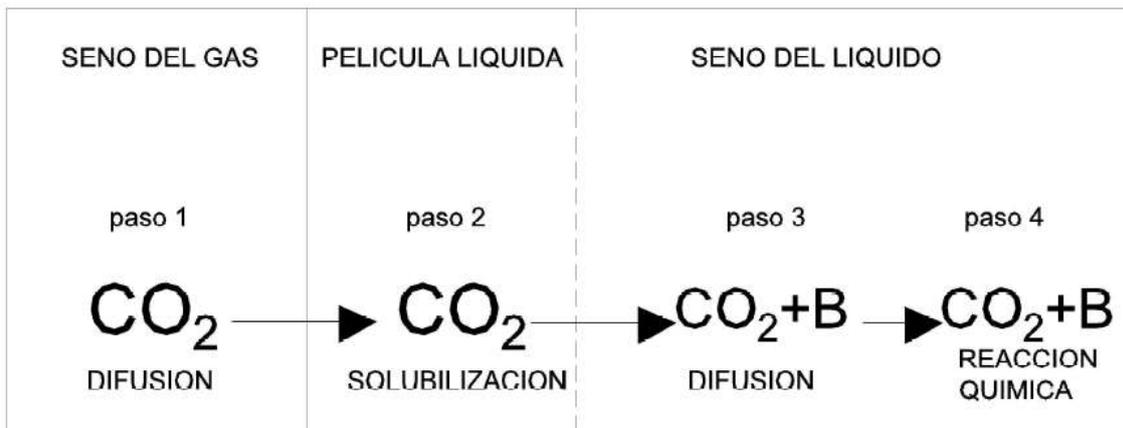


Figura 1.6. 1 Descripción gráfica de la absorción de CO_2 (Wilcox, 2012)

1.7 Equipos utilizados en absorción.

Para poder llevar a cabo una buena absorción de CO_2 es necesario tener en cuenta no solo la presión y la temperatura, también es necesario asegurar el área de contacto adecuada entre fases, para poder asegurar esta área de contacto se recurre a diversos equipos, estos pueden ser:

- Torres de relleno.
- Columnas de pulverización.
- Torres de platos.

- Columnas de burbujeo.
- Tanque agitado.

1.7.1 Torres empacadas

Este dispositivo consiste en una columna cilíndrica con una entrada y un distribuidor por donde ingresa el gas que contiene el soluto o “gas rico” por la parte inferior, una salida del gas en la parte superior por donde sale el gas diluido o “agotado”, una entrada de líquido y un distribuidor por la parte superior y una salida de líquido por la parte inferior por donde sale el líquido enriquecido en soluto llamado “licor concentrado” y una masa soportada de cuerpos sólidos inertes que recibe el nombre de torre empacada.

El empaque tiene la finalidad de proporcionar una gran área de contacto gas-líquido favoreciendo el contacto entre fases, se pueden clasificar en 2 tipos:

- Cargado de forma aleatoria: que consisten en unidades de 6 a 75mm, para laboratorios y plantas piloto generalmente son menores a 25mm. Se fabrican con materiales económicos e inertes como:
 - Arcilla.
 - Porcelana.
 - Diversos plásticos.
 - Acero y aluminio.
- Empaques estructurados: comprenden unidades de entre 50 a 200mm. Este tipo de empaques es menos utilizado que los cargados aleatoriamente debido a problemas de canalización. (McCabe, et al., 2007)

En la siguiente tabla se muestran algunos de los empaques más comunes.

Tabla 1.7.1 Características de empaques para torres (McCabe, et al., 2007)

Figura	Tipo	Material	Tamaño nominal (in)	Área total ft ² /ft ³	Porosidad ε
	Anillos Rasching	Cerámica	1/2	112	0.64
			1 1/2	58	0.74
			2	28	0.74
	Anillos Pall	Metal	1	63	0.94
			1 1/2	39	0.95
			2	31	0.96
		Plástico	1	63	0.9
			1 1/2	39	0.91
	Monturas Berl	Cerámica	1/2	142	0.62
			1	76	0.68
			1 1/2	46	0.71
	Monturas Intolax	Cerámica	1/2	190	0.71
			1	78	0.73
			1 1/2	59	0.76
			2	36	0.76
			3	28	0.79
	Monturas super intolax	Cerámica	1	-	-
			2	-	-

1.7.2 Torres de platos

Este tipo de torres cuenta con prácticamente los mismos elementos que la descrita con anterioridad, únicamente el elemento en el cual tiene lugar el contacto gas-líquido será en los platos. El tipo más común de este elemento son los platos perforados donde el vapor burbujea hacia arriba por los hoyos sencillos del plato a través del líquido que está fluyendo, parte del líquido se conserva en la superficie del plato sin embargo la energía cinética del gas no le permite fluir a través de los orificios; estos orificios tienen un tamaño que fluctúa entre 3 y 12 mm de diámetro.

Existen otro tipo de platos por ejemplo el plato de válvula, que es una modificación del plato perforado, al igual que este cuenta con aberturas en los platos, pero esta vez, tendrá una cubierta de válvulas con movimiento vertical para cada orificio, logrando de esta forma una abertura variable que estará en función del flujo de gas. También se han usado platos de capuchones, en este tipo platos el gas se eleva a través de las aberturas del plato hacia el interior de los capuchones, después el gas fluye por las ranuras y la periferia de cada tapa, las burbujas fluyen hacia arriba por el líquido, sin embargo, aunque estos platos se han usado desde hace más de 100 años, a partir de 1950 generalmente se han remplazado por alguno de los platos antes mencionados debido a que su costo es casi el doble que los platos perforados. (Geankoplis, 1998)

1.7.3 Columnas de burbujeo

Las columnas de burbujeo son estructuras muy simples, son recipientes cilíndricos con una relación diámetro y altura de 3:1, cuentan con un rociador para el suministro de aire comprimido que, además de cumplir con el objetivo de poner en contacto ambas fases, genera la agitación necesaria para tener una mejor transferencia de masa. Por lo que no es necesario el uso de agitadores mecánicos.

Las ventajas de este tipo de columnas son:

- Bajo costo de capital.
- Falta de partes móviles.
- Buena transferencia de calor y masa.

La hidrodinámica de la columna es compleja y dependen de los siguientes parámetros:

- Retención gaseosa.
- Área interracial.
- Coeficiente de transferencia de masa.

A su vez estos parámetros dependerán del patrón de flujo de las burbujas liberadas por el rociador. (Camacho & Alvarado, 1994)

Se pueden producir distintos tipos de flujos según la velocidad de los mismos, la viscosidad del fluido y el diámetro de la columna.

A bajas velocidades de la corriente gaseosa, se produce un flujo homogéneo debido a la distribución uniforme a lo largo de la columna de las burbujas suministradas por el rociador; cuando la velocidad del flujo de gas es alta, el flujo pasa a ser heterogéneo, desarrollándose un flujo circulatorio y caótico. El tiempo de mezclado del líquido depende del patrón de flujo; en un flujo heterogéneo se tiene la siguiente ecuación para columnas de diámetro de entre 0.1 y 7.5m y velocidades de flujo de gas de entre 0 a 0.4m/s

$$u_L = 0.9(gDu_G)^{0.33} \quad (1.7.3.1)$$

Donde:

- u_L es la velocidad lineal del líquido.
- D es el diámetro de la columna.
- g es la aceleración de la gravedad.
- u_G es igual al caudal volumétrico de gas a presión atmosférica dividido por el área de la sección transversal del reactor.

A partir de la ecuación anterior se puede obtener una ecuación para el tiempo de mezclado.

$$t_m = 11 \frac{H}{D} (gD^{-2}u_G)^{-0.33} \quad (1.7.3.2)$$

Donde:

- t_m es el tiempo de mezclado
- H es la altura de la columna

Un parámetro importante para determinar la eficiencia de la columna es el coeficiente de transferencia de masa, que guarda una dependencia con el diámetro de las burbujas y la retención lograda de gas, sin embargo, es difícil determinar tanto el patrón de flujo como el tamaño de las burbujas, por tanto, dificulta la estimación del coeficiente de transferencia de masa, debido a ello se ha propuesto una correlación para medios no viscosos en flujo heterogéneo:

$$K_L a \approx 0.32u_G^{0.7} \quad (1.7.3.3)$$

Donde:

- $K_L a$ es el coeficiente volumétrico de transferencia de masa

Cabe mencionar que esta ecuación es válida para burbujas de diámetro de aproximadamente 6mm, un diámetro de columna de 11.6m, una altura de entre 0.3m a 21m y una velocidad lineal del gas de 0 a 0.3m/s. (Doran, 2013).

1.7.4 Airlift

Estos equipos son muy similares a las columnas de burbujeo, no obstante, los reactores airlift cuentan con patrones de flujo de líquido mejor definidos, esto se debe a la separación física de las corrientes ascendentes y descendentes.

El gas se burbujea en solo una parte del reactor llamado tubo ascendente y a medida que las burbujas de gas se desprenden del líquido en la parte superior del recipiente se deja que el líquido sin burbujas y por tanto “más pesado” recircule a través del tubo descendente haciendo de este modo que la circulación sea producto de la diferencia de densidad (debido a la retención de gas en la parte ascendente) entre el tubo descendente y el ascendente.

Existen diversos tipos de airlift sin embargo todos siguen el mismo principio, algunos de los tipos más comunes son:

- Los concéntricos: en estos la parte ascendente y descendente se encuentran de forma concéntrica, pueden llevar cualquier orden, es decir, el tubo interno puede contener la parte ascendente o descendente, conformando así dos configuraciones distintas.
- Los de bucle externo: donde la parte ascendente y descendente están compuestos de tubos generalmente de diferentes diámetros en secciones separadas, pero están conectadas mediante vasos comunicantes.

En forma general los airlift muestran algunas ventajas tales como:

- Mezcla completa de los componentes.
- Diseño mecánico simple.
- Baja velocidad de cizallamiento.
- Ausencia de agitadores mecánicos.
- Bajo consumo de energía. (Kennes & Veiga, 2013).

1.7.5 Torres de aspersión

Estas torres consisten en cámaras vacías en forma cilíndrica o rectangular en las que un flujo de gas es puesto en contacto con un flujo de líquido en forma de gotas generadas por toberas de aspersión. El flujo de gas fluye de forma ascendente a través de un banco o bancos sucesivos de toberas. La energía de contacto requerida es obtenida por una combinación de la presión del líquido y proporción de flujo (Perry, et al., 1997).

1.8 Absorción de CO₂ en aminas

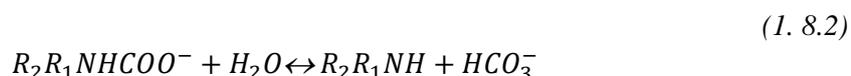
La absorción en aminas es una de las tecnologías más empleadas para la captura de CO₂ a nivel industrial (Baird & Cann, 2018), esta tecnología fue patentada por primera vez en la década de 1930 como proceso de purificación de gas a pequeña escala, eliminando CO₂ y otros gases ácidos (Attalla, 2012). y se basa en la reversibilidad de las reacciones de neutralización ácido-base (Romero & Bolea, 2015).

Las aminas más utilizadas son: monoetanolamina (MEA), dietanolamina (DEA) y metil dietanolamina (MDEA) siendo una amina primaria secundaria y terciaria respectivamente. (Mohd & Shuaib, 2017) se encuentran en medio acuoso en una concentración de entre 15 a 30% en peso de aminas (Baird & Cann, 2018).

Las aminas primarias y secundarias difieren en su comportamiento con las aminas terciarias respecto a su interacción con el CO₂ debido a la falta de átomos de hidrógeno unidos al nitrógeno en las aminas terciarias y por lo tanto sus mecanismos de reacción son diferentes (Dag, 2014).

El CO₂ reacciona con las aminas primarias y secundarias formando carbamatos, posterior a ello los carbamatos pueden ser hidrolizados para producir bicarbonatos y una amina libre que puede reaccionar nuevamente con el CO₂ (Mohd & Shuaib, 2017).

Aunque las relaciones entre la amina y el CO₂ son bastante complejas las reacciones se pueden representar de manera general de la siguiente manera.



El grado de formación de carbamatos frente a la formación de bicarbonatos afectara la capacidad de absorción de CO₂, cuando la amina forma carbamatos estables tiende a presentar velocidades de reacción más rápidas, sin embargo, su capacidad de absorción es limitada y requiere una mayor energía para la regeneración (Attalla, 2012).

El equilibrio de la reacción anterior 1.8.1 se desplaza a la derecha en condiciones de alta presión y baja temperatura por lo que a estas condiciones se puede absorber el CO₂, en condiciones contrarias

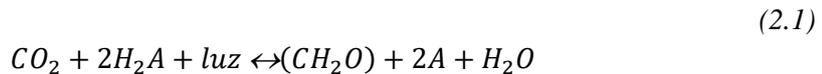
se lleva a cabo la etapa de regeneración del solvente, es decir, la desorción del CO₂; Esta etapa demanda una gran cantidad de energía equivalente al 80% de todo el proceso.

Las aminas terciarias no reaccionan directamente con el CO₂ para formar carbamatos, en cambio, se cree que se comportan como catalizadores, facilitando la hidrólisis del CO₂ generando bicarbonatos. Cabe mencionar que estas aminas tienen una menor reactividad a las primarias y secundarias (Dag, 2014).

2 FOTOSÍNTESIS

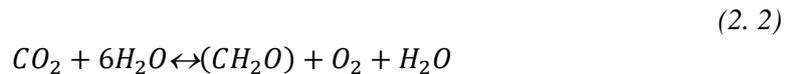
La fotosíntesis se define como un proceso físico-químico-biológico por el cual los organismos fotótrofos utilizan la energía luminosa para sintetizar compuestos orgánicos (Perez & Urria, 2009).

De manera general se puede describir mediante la siguiente ecuación:



Donde H_2A puede ser alguna sustancia cuyos electrones puedan ser donados por A.

La fotosíntesis puede o no liberar oxígeno dependiendo de la fuente donadora de electrones, cuando la fuente donadora es agua se libera oxígeno como subproducto, y es llamada fotosíntesis oxigénica



de modo que la ecuación anterior pasa a ser la ecuación 2.2 (Campbell & Jane, 2007)

Cuando no se libera oxígeno, se lleva a cabo una fotosíntesis anoxigénica, en ella la fuente donadora de protones puede ser un compuesto de azufre reducido como el sulfuro de hidrógeno (H_2S).

La fotosíntesis se lleva a cabo en 2 fases: una fase luminosa donde de manera general la energía luminosa es convertida en energía química en forma de adenosín trifosfato (ATP) y NADPH (forma oxidada de la nicotina mida adenina dinucleótido fosfato); una fase oscura que posteriormente a la fase anterior, aprovechara las formas de energía antes mencionadas para poder fijar el carbono mediante enzimas para producir carbohidratos en el ciclo de Calvin (Madigan, et al., 2008).

2.1 Fase luminosa

En la primera fase, la luz es absorbida gracias a diversos pigmentos presentes en la célula, tales como carotenos, ficobilinas, clorofila a y b, entre otras. La clorofila a tiene estructuras policíclicas planas con un anillo de porfirina que contiene un Mg^+ en la posición central, y una cadena larga de fitol (Nelson & Cox, 2009); tiene la capacidad de absorber luz Roja y azul presentando una fuerte absorbancia en un espectro cercano los 680 nm y los 430 nm (Madigan, et al., 2008). Estos pigmentos se encuentran en sistemas membranosos celulares y la ubicación de estas membranas fotosintéticas difiere en procariontas y en eucariotas. En el caso de las eucariotas la fotosíntesis tiene lugar en los

orgánulos llamados cloroplastos, donde las clorofilas están unidas a las membranas tilacoidales. En el caso de las procariotas los pigmentos están integrados en la membrana plasmática o membranas derivadas de ella (Curtis & Barnees, 2006).

Cabe mencionar que solo una pequeña cantidad de moléculas de pigmento participan directamente en la reacción que conduce a la síntesis de ATP a estas se les llama centros de reacción, estos centros están rodeados por un número mayor de pigmentos cuya función es capturar luz y canalizar parte de la energía a los centros de reacción, a este mayor número de pigmentos se les conoce como pigmentos antena. En conjunto, los centros de reacción y los pigmentos antena forman un fotosistema (Campbell & Jane, 2007).

Los electrones viajan a través de dos fotosistemas: El fotosistema I (PSI o P700) y fotosistema II (PSII o P680). La clorofila del PSII es muy electropositivo y gracias a esto se da el primer paso del flujo de electrones que es la escisión del agua done en oxígeno (este oxígeno es liberado a la atmosfera) y electrones, un electrón de PSII es lanzado a un nivel de energía más alto, el electrón cedido pasa cuesta abajo al PSI que previamente ha absorbido energía lumínica y ha donado un electrón que provocara la reducción de NADP^+ a NADPH, además las reacciones de transporte generan un gradiente de protones a través de la membrana tilacoidal, este gradiente se usa para la formación de ATP a partir de ADP, este mecanismo de síntesis recibe el nombre de fotofosforilación (Madigan, et al., 2008).

2.2 Ciclo de Calvin

En la segunda etapa de la fotosíntesis, el NADPH y el ATP, se usan para reducir el gliceraldehido fosfato que es un compuesto de tres carbonos, la fijación de carbono se lleva a cabo mediante la enzima RuBP carboxilasa, esta enzima combina una molécula de CO_2 con Ribulosa fosfato que es una azúcar de 5 carbonos.

Por cada ciclo completado ingresa una molécula de CO_2 por lo que son necesarios 6 ciclos para elaborar 2 moléculas de gliceraldehido-fosfato que equivale a una azúcar de 6 carbonos que pueden combinarse para formar una molécula de glucosa (Curtis & Barnees, 2006).

3 MICROALGAS

El término microalga hace referencia a microorganismos que van desde los 2µm a 50µm, que contienen clorofila a y otros pigmentos fotosintéticos, y son capaces de realizar fotosíntesis oxigénica. Este término hace referencia a grupos heterogéneos de eucariontes y procariontes, en el caso de los eucariontes se encuentran agrupadas bajo el dominio *Eukarya* y los procariontes como las cianobacterias se encuentran en el dominio *Bacteria* (Ramirez R., 2018).

Crece comúnmente en el agua, sin embargo, algunas especies pueden crecer en rocas, suelos y plantas y contribuyen aproximadamente con el 50% de la productividad fotosintética en la tierra (Andersen, 2004).

Las cianobacterias son las más antiguas de las algas, desempeñaron un papel importante en el desarrollo de la vida en la tierra, en la que al principio había poca cantidad de oxígeno libre que pudiera sostener formas de vida como las que conocemos ahora (Tortora, et al., 2007), actualmente suponen una de las principales contribuciones para la biotecnología microalgal (Gomez & Liliana, 2007).

3.1 Aplicaciones

Las microalgas presentan un gran potencial en la biorremediación ya que reciclan eficientemente contaminantes desde medios líquidos, así como gaseosos, incorporándolos a su metabolismo para la generación de biomasa (Hernandez & José, 2014).

La biomasa generada por las microalgas puede ser utilizada como materia prima para otros procesos por ejemplo para la producción de biodiesel, bioetanol, puede tener uso en la industria alimenticia como biopigmentos utilizados como colorantes para mermeladas, estos pigmentos también tienen aplicación en la industria textil y papelera así como en la medicina ya que han mostrado propiedades antiinflamatorias, antibacterianas y antioxidantes, de igual manera se usa como alimento animal. (Alam & Wong, 2019) (Hernandez & José, 2014).

3.2 Nutrición

En el medio de cultivo existen diferentes nutrientes como el nitrógeno (N), fósforo (P), carbono (C) y minerales que afectan la composición bioquímica de las microalgas, así como su crecimiento en los siguientes apartados se describen a detalle.

3.2.1 Nitrógeno

El nitrógeno es uno de los nutrientes fundamentales debido a que es el componente principal de proteínas, enzimas, monedas de energía y otros materiales genéticos de las microalgas. El contenido de lípidos, el crecimiento celular y el contenido de carbohidratos están influenciados directamente por el contenido de nitrógeno en el medio de cultivo, en un ambiente pobre en nitrógeno, las microalgas minimizan la síntesis rutinaria de proteínas celulares y comienzan a acumular lípidos y disminuye la tasa de crecimiento celular (Qin, et al., 2019).

Este nutriente se suministra principalmente como nitrato (NO_3^-), pero a menudo también se utilizan amoníaco (NH_4^+) y urea, registrándose tasas de crecimiento similares. El nitrógeno amoniacal es a menudo la fuente de nitrógeno preferida para los microorganismos, la asimilación de NO_3 o NH_4^+ está relacionada con el pH de los medios de cultivo, cuando se usa amoníaco como única fuente de N, el pH podría caer significativamente debido a la liberación de iones H^+ , por el contrario, si se utiliza nitrato como única fuente de carbono el pH aumentara (Grobbelaar, 2013).

El óxido nítrico (NO) que es uno de los principales causantes de la lluvia acida y es el mayor componente de los NO_x en los gases de combustión (más del 90%) puede ser utilizado como fuente de nitrógeno (Nagase, et al., 1997), sin embargo, su limitante es la baja solubilidad en el medio de cultivo lo que implica un mayor tiempo de retención de gas y un gran volumen en el reactor para una remoción significativa de NO (Jin, et al., 2008), no obstante, es importante resaltar la capacidad de las microalgas para la remoción de este contaminante.

3.2.2 Fosforo

Es esencial para muchos procesos celulares como la transferencia de energía, la biosíntesis de ácidos nucleicos etc. (Grobbelaar, 2013) sin este nutriente el crecimiento celular sería imposible (Paul J. Harrison, 2005).

El fosforo influye en la composición de la biomasa producida, especialmente en el contenido de lípidos y carbohidratos.

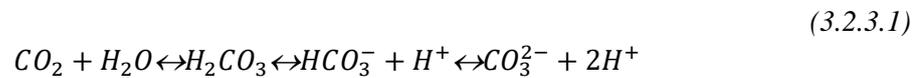
La forma en que se suministra es como ortofosfato y debe guardar una relación con el nitrógeno de 16N:1P (Grobbelaar, 2013).

3.2.3 Carbono

Después del nitrógeno y el fósforo, el carbono es otro nutriente vital, es el principal elemento de biomasa microalgal, aunque el contenido varía según la especie, las microalgas contienen aproximadamente el 50% de carbono en su biomasa (Grobbelaar, 2013).

Las microalgas pueden tomar como fuente de carbono el CO₂ del ambiente, aunque también, pueden fijar el carbono de gases de combustión provenientes de la industria o centrales eléctricas (Shaid, et al., 2019) , y de carbonatos que se proveen por lo general en forma de Na₂CO₃ y NaHCO₃ (Ramirez R., 2018).

Para poder ser aprovechado el CO₂ de la atmósfera primero debe disolverse en el medio, reaccionando con el agua formando un sistema buffer de la siguiente manera



Conforme se realiza la fijación de CO₂ los iones OH se acumulan lo que ocasiona un incremento en el pH.

4 FOTOBIORREACTORES

Si bien los organismos fotótrofos tienen un gran potencial en diversos campos mencionados en el capítulo anterior también es necesario proveer condiciones de cultivo que favorezcan el crecimiento óptimo de los mismos, estas condiciones son:

- Intensidad de luz
- pH
- temperatura
- mezclado
- disponibilidad de nutrientes

estas condiciones pueden ser controladas en sistemas llamados Fotobiorreactores.

Un fotobiorreactor se define como un recipiente para la producción fototrófica de microorganismos donde la energía se suministra por medio de luces eléctricas (Angeles, 2016). En estos recipientes el cultivo tiene poco o nulo contacto con la atmosfera y exhiben algunas ventajas como:

- Facilidad para cosechar la biomasa
- Mantenimiento del cultivo sin contaminación
- Mejor control de las condiciones de cultivo
- Menor inversión de capital (Contreras, et al., 2003).

La elección del fotobiorreactor depende de la situación, ya que tanto la especie de algas disponibles y el destino final jugara un papel importante (Ramírez, et al., 2013), sin embargo, se recomiendan las siguientes consideraciones heurísticas para el diseño de un fotobiorreactor:

- La trayectoria de la luz debe ser pequeña (<10 cm)
- Mantener una alta densidad celular (> 8-15 g/L base húmeda)
- Mezclado vigoroso para asegurar ciclos de recirculación de alta frecuencia y garantizar la exposición lumínica homogénea de todas las células
- Para columnas de burbujeo, la altura de la columna debe ser por lo menos 2 veces mayor que su diámetro (Contreras, et al., 2003).

Existen diversos diseños de fotobiorreactores con propiedades específicas como:

- Reactores de superficie plana (flat plate)
- Reactores tubulares
- Reactores de tanque agitado

Los fotobiorreactores de superficie plana (flat plate) se han fabricado comúnmente con materiales transparentes para un óptimo uso de la radiación solar, consisten en dos paneles con una fina capa de micro algas fluyendo entre ellos y se logra una alta eficiencia de transferencia de luz con una pequeña separación entre estos paneles, usualmente son construidos de PVC, policarbonato, polimetilmetacrilato, vidrio o polietileno, tienen como principal ventaja su gran superficie de iluminación y su geometría simple.

Los de tipo tubular son los más fáciles de escalar incrementando la longitud y el número de tubos, (Ramírez, et al., 2013), suelen estar hechos de tubos de vidrio o plástico en los que se realiza el cultivo. La circulación se efectúa mediante bombas o corrientes de aire (airlift), estos fotobiorreactores tienen una alta relación superficie-volumen que permite trabajar cultivos de alta concentración de biomasa.

La longitud y el diámetro de los tubos deben estar correctamente diseñados para evitar la acumulación de O_2 que puede ser perjudicial en altas concentraciones para las microalgas.

En general los fotobiorreactores tubulares se pueden dividir en tres principales grupos (Zittelli et al., 2003):

- Serpentes
- Colectores (mainfold)
- Helicoidales

Los de tipo serpentín (figura 4.1) consisten en tubos rectos conectados por curvas en “U”, pueden tener una disposición vertical tanto como horizontal, el intercambio de gas, así como el suministro de nutrientes se realizan en un recipiente separado, la circulación, que, tiene un rango de velocidad de entre 20 y 30 cm/s se puede proveer mediante bombas o por un sistema airlift.



Figura 4. 1 Fotobiorreactor de tipo serpentín

Los fotobiorreactores de tipo manifold (figura 4.2) consisten en una serie de tubos paralelos donde en los extremos están conectados por dos colectores, uno con la finalidad de distribución y el otro con el propósito de recoger las suspensiones del cultivo, estos fotobiorreactores tienen la ventaja de tener una menor pérdida de carga y una concentración de oxígeno disuelto más baja que los fotobiorreactores de serpentín.

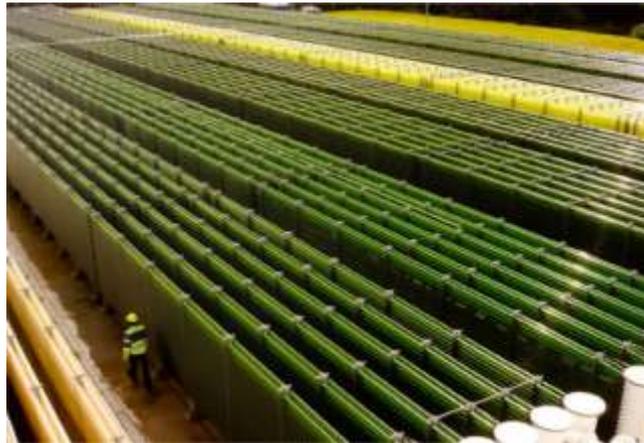


Figura 4. 2 Fotobiorreactor tipo manifold

Por último, tenemos los fotobiorreactores helicoidales (figura 4.3) que constan de tubos flexibles de diámetro pequeño enrollado en una estructura de soporte vertical, el diseño más utilizado es el de Biocoil propuesto inicialmente por Robinson, que está constituido por un conjunto de tubos de polietileno de 3cm de diámetro interior enrollado alrededor de una estructura cilíndrica vertical, acoplado a una columna de intercambio de gas.



Figura 4. 3 Fotobiorreactor tipo helicoidal

4.1 FACTORES QUE DETERMINAN SU DESEMPEÑO

4.1.1 Luz

La intensidad lumínica es uno de los principales parámetros que afectan en el crecimiento, en ausencia de limitación por nutrientes la fotosíntesis se incrementa aumentando la intensidad de la luz, pasado de este punto pasa a un estado de foto-inhibición (Hernandez & José, 2014).

Se ha demostrado que la intensidad de la luz es un factor clave que regula la acumulación de lípidos en las microalgas (Hernandez & José, 2014). Una tendencia común de la respuesta celular a la disminución de la intensidad de la luz es aumentar la clorofila a y otros pigmentos captadores de luz, por el contrario, en respuesta a la alta intensidad de luz, la clorofila a, junto con los pigmentos captadores de luz que participan directamente en la fotosíntesis disminuyen, mientras que los carotenoides secundarios que sirven como agentes fotoprotectores, aumentan actuando así como un "bloqueador solar" para reducir y prevenir el exceso de luz (Amos & Qiang, 2013).

La intensidad de luz puede afectarse por factores como la distancia entre la fuente de luz y el fotobiorreactor, la geometría del fotobiorreactor, longitud de onda, aumento de concentración celular, formación de biopelículas en las paredes lo que puede generar un efecto de sombreado reduciendo de esta manera la eficiencia fotosintética. Una forma de reducir el efecto planteado es disminuir la distancia entre la fuente de luz y el reactor, sin embargo, esto puede llevar a un aumento de temperatura lo que podría dañar a los microorganismos (Ramírez, et al., 2013).

4.1.2 Temperatura

La temperatura es una variable importante debido a que influye directamente en la actividad metabólica y enzimática de las microalgas (Qin, et al., 2019) aumentando la producción algal con el aumento de la temperatura hasta alcanzar una temperatura óptima para cada cepa, (microalgas beneficios) por encima de esta la respiración se eleva significativamente disminuyendo la eficiencia fotosintética (Pulz, 2001).

Todos los organismos fotosintéticos generan calor debido a la ineficiencia de la fotosíntesis en convertir la energía lumínica en energía química, la conversión teórica de luz roja es apenas el 31% mientras que el 69% se pierde como calor (Bebrens, 2005), es por ello que debe tenerse un control sobre esta variable, sin un control el fotobiorreactor puede llegar a incrementar de 10 a 30°C de la temperatura ambiental.

La temperatura se puede controlar por varios mecanismos, tales como rociadores de agua, reactor dentro de un invernadero, etc. (Hernandez & José, 2014).

4.1.3 pH

El pH afecta significativamente el cultivo de microalgas en lo que se refiere a la disponibilidad y asimilación de nutrientes (Qin, et al., 2019).

Los requerimientos de pH varían según la especie sin embargo el pH para la mayoría de los cultivos está en un rango de 7 a 9 y un óptimo de 8.2 a 8.7 (Valdés, et al., 2012).

El pH se incrementa continuamente debido al consumo de carbono, sin embargo, se puede controlar con la inyección controlada de CO₂ o la adición de algunos ácidos o bases según sea el caso (Hernandez & José, 2014).

4.1.4 Mezclado

Una vez que en el fotobiorreactor se alcancen las proporciones adecuadas del medio de cultivo y los parámetros fisicoquímicos requeridos, el sistema de mezclado llega a convertirse en un punto fundamental cuya importancia radica en lo siguiente (Ramírez, et al., 2013).

El mezclado debe permitir condiciones homogéneas favoreciendo la dispersión uniforme de microorganismos entre las zonas oscuras e iluminadas asegurando una iluminación óptima, de igual manera debe permitir una buena transferencia de masa, transferencia de energía, transferencia de nutrientes, así como una buena desorción del oxígeno generado en la fotosíntesis, evitando una inhibición por alta concentración (Contreras, et al., 2003).

Si se cuenta con un buen mezclado se puede aumentar la productividad en un fotobiorreactor tubular, de lo contrario, mezclas inadecuadas promueven la formación de aglomerados celulares que disminuyen la transferencia de masa y por tanto la productividad del sistema. (Hernandez & José, 2014) (Contreras, et al., 2003).

El mezclado se puede promover de diferentes formas, sin embargo, los sistemas de aireación se usan comúnmente por su sencillez y su bajo esfuerzo de corte que no casusa daño mecánico a las células.

4.1.5 Oxígeno disuelto

El oxígeno disuelto, que es producto de la fotosíntesis de las microalgas, puede ser dañino en altas concentraciones, aunque se requiere mayor investigación sobre su toxicidad se cree que una concentración de O₂ disuelto superior a los 20 mg/L afecta negativamente el crecimiento de las microalgas (Qin, et al., 2019) por ello es necesario tener un control sobre este parámetro.

Los principales procesos que pueden ocurrir a altas concentraciones de oxígeno disuelto (O₂) se atribuyen generalmente a la fotorrespiración y la fotoinhibición (Kazbar, et al., 2019).

5 EL AIRE INTERIOR Y SU TRATAMIENTO

El término “calidad del aire interior” se aplica a ambientes interiores no industrializados como: edificios de oficinas, edificios públicos (colegios, lugares de ocios, etc.) y hogares (Guardino, 1998) donde debido a las actividades diarias pasamos más del 80% de nuestro tiempo (Carazo, et al., 2013) por lo que la calidad del aire dentro de estos espacios puede afectar nuestra salud, es por ello que debe estar libre de varios contaminantes y olores o al menos estar en límites admisibles incluidos los gases que exhalamos, como el dióxido de carbono (CO₂) e incluso óxidos de nitrógeno (Tan, 2014).

En países desarrollados la contaminación del aire interior puede estar influenciada por factores como: el diseño arquitectónico de los edificios, las fuentes de contaminación exterior, los materiales de construcción y los sistemas de ventilación y aire acondicionado (Carazo, et al., 2013).

En los países menos desarrollados una de las principales fuentes de contaminación es el uso de la biomasa como fuente combustible para cocinar o calentar los hogares, según la OMS cada año más de 4 millones de personas mueren prematuramente por enfermedades atribuibles a la mala calidad del aire interior debido al uso de combustibles sólidos para cocinar (OMS, 2018).

Las infecciones de tracto respiratorio inferior en niños, así como la enfermedad pulmonar obstructiva (EPOC) y los tumores de vías respiratorias en adultos son las principales patologías causantes de muertes debido a la mala calidad del aire interior.

Por otra parte, en la actualidad nos enfrentamos a una pandemia causada por un coronavirus altamente contagioso, el SARS-CoV-2; se considera que la principal vía de contagio es persona a persona mediante el contacto directo, gotas de saliva y actualmente existe evidencia de la transmisión aérea a partir de aerosoles en espacios interiores. Esto es, debido a que inmediatamente que se exhalan las gotitas de saliva, el líquido comienza a evaporarse logrando que la gota original que bien podría haberse depositado en una superficie, se haga tan pequeña que el transporte por aire la afecte más que la gravedad, permitiendo que esta pequeña partícula contenedora del virus viaje libremente por el aire teniendo la oportunidad de contagiar a alguien (Morawska & Cao, 2020).

5.1 Principales contaminantes

Los contaminantes del aire comprenden dos tipos: los primarios y secundarios, los contaminantes primarios son aquellos que se emiten directamente de una fuente, por ejemplo: material particulado dióxido de azufre, entre otros; los contaminantes secundarios son aquellos que son producto de reacciones entre dos o más contaminantes primarios (Tan, 2014).

Los principales contaminantes presentes en el interior de los espacios cerrados son:

- Monóxido de carbono
- Compuestos orgánicos volátiles (VOC)
- Dióxido de azufre (SO₂)
- Material particulado
- Óxidos de nitrógeno (NO_x)
- Contaminantes biológicos

Existen otros factores que como tal no son contaminantes, sin embargo, si están relacionados con la calidad del aire interior y sus efectos sobre la salud, tal es el caso de la temperatura y la humedad (Silvestre, 2016).

5.2 Eliminación de CO₂

Aunque el CO₂ no está catalogado como un contaminante ya que no es un gas tóxico, puede producir asfixia por desplazamiento de oxígeno a muy altas concentraciones, la concentración normal de CO₂ al aire libre es de 250-350 ppm, mientras que el aire interior puede alcanzar 1000 ppm. Después de este límite, los niveles de CO₂ comienzan a influir en el estado de salud de los seres humanos. hasta 2000 ppm, la sensación de aire pobre se combina con la somnolencia, entre 2000 y 5000 ppm; los síntomas son somnolencia, dolores de cabeza, pérdida de atención e incluso náuseas o aumento de la frecuencia cardíaca. Más de 5000 ppm, el CO₂ podría considerarse un potencial gas tóxico (Vergara, et al., 2008).

Existen tres opciones tecnológicas principales para captura de CO₂: captura de postcombustión a través de absorción química, captura de pre combustión y oxifueelling.

En el proceso de postcombustión, el CO₂ se captura de los gases de combustión que contienen del 4% al 8% de CO₂ en volumen para las centrales eléctricas de gas natural y del 12% al 15% en volumen para las centrales eléctricas de carbón. El CO₂ se captura normalmente mediante el uso de disolventes y la posterior regeneración del mismo, a veces en combinación con la separación por membrana. La tecnología básica (que utiliza disolventes a base de aminas) se ha utilizado a escala industrial durante décadas, pero el desafío es recuperar el CO₂ con un gasto mínimo de energía y a un costo aceptable.

En el proceso de pre combustión el combustible se hace reaccionar primero con oxígeno y luego se procesa adicionalmente en un reactor para producir una mezcla de hidrógeno y CO₂. El CO₂ se captura a partir de una mezcla de gases a alta presión que contiene entre un 15% y un 40% de CO₂. El hidrógeno se utiliza para generar electricidad y calor en una turbina de gas de ciclo combinado.

El proceso de oxidación implica la eliminación de nitrógeno del aire en la corriente oxidante utilizando una unidad de separación de aire, luego, el combustible fósil se quema con oxígeno casi puro (International Energy Agency, 2008).

El uso de micro algas presenta una alternativa eficiente en la transformación de CO₂ en productos valorizados (González, et al., 2011).

5.3 Eliminación de compuestos orgánicos volátiles

Los compuestos orgánicos volátiles (COV) son todos aquellos hidrocarburos que se presentan en estado gaseoso a la temperatura ambiente o que son muy volátiles a esta temperatura. Estos compuestos son una de las principales emisiones atmosféricas junto con el material particulado; algunos de los COV's más comunes son:

- Alcoholes
- Cetonas
- Hidrocarburos alifáticos
- Hidrocarburos aromáticos (benceno, isómeros del tolueno, etilbenceno y xileno) (Vergara, et al., 2008).

Existen diversas tecnologías para el control de estos compuestos sin embargo las propiedades de los mismos determinaran el método para su captura u oxidación, tomando como parámetro principal el punto de inflamabilidad que nos dirá si la mezcla aire-COV se puede inflamar o no.

Las tecnologías para el control de COV's son las siguientes:

- Adsorción: los COV's de baja concentración pueden ser adsorbidos físicamente por carbón activado y otros adsorbentes, tiene un buen funcionamiento en un rango de 0.05 a 30 m³/s para gases con concentración de COV de 20 a 5000 ppm logrando una eficiencia de remoción del 90% al 98%.
- Oxidación de COV's: estos compuestos pueden oxidarse y convertirse en productos químicos menos tóxicos, existen tres tipos de procesos de oxidación de COV's según su concentración.
 - Flaring: se utiliza generalmente para corrientes de gas que tienen una concentración de vapor superior a 2-3 veces el límite inferior de inflamabilidad
 - Oxidación térmica: se utiliza para corrientes de gas que tienen una concentración de vapor orgánico del 25-50% del límite inferior de inflamabilidad.
 - Oxidación catalítica: se utiliza para corrientes que tienen unas concentraciones menores al 25% del límite inferior de inflamabilidad (Tan, 2014).

También existen tecnologías alternativas como la biofiltración que consiste en hacer pasar una corriente de aire a través de un material filtrante como: compost, suelo, roca volcánica etc. en el que

se encuentran alojados ciertos microorganismos capaces de degradar los compuestos orgánicos. Esta tecnología constituye una alternativa altamente eficiente y de bajo costo en comparación con las tecnologías anteriores (Vergara, et al., 2008).

5.4 Eliminación de Material particulado

El material particulado se puede definir como una pequeña masa sólida o líquida en suspensión en la atmósfera. Las partículas primarias se emiten directamente desde una fuente contaminante, mientras que las partículas secundarias se forman en la atmósfera como resultado de reacciones o interacciones entre contaminantes y/o compuestos presentes en el ambiente. Normalmente, el diámetro de estas partículas puede variar entre aproximadamente 10-2 μm , aunque también se pueden encontrar partículas más pequeñas y más grandes (Tan, 2014).

El material particulado se clasifica como PM_{10} para tamaños de hasta 10 μm y $\text{PM}_{2.5}$ para tamaños más pequeños de hasta 2 μm . El efecto de las partículas sobre la salud es más importante en caso de las partículas más pequeñas, por ejemplo, aquellas por debajo de 2.5 μm , ya que pueden llegar más fácilmente a los pulmones que las partículas de mayor tamaño (Kennes, et al., 2013).

Las tecnologías de ciclones, precipitación electrostática y filtración se utilizan ampliamente para el control de las emisiones de material particulado.

Los ciclones remueven el material particulado de la corriente gaseosa debido a la fuerza centrífuga, estos equipos son adecuados para separar partículas con diámetros mayores a 5 μm con eficiencias hasta del 90% (Echeverri, 2006).

Los precipitadores electrostáticos se utilizan ampliamente para el control de las emisiones de partículas de la quema de combustibles fósiles, estos separadores implican tres etapas para la separación de las partículas:

- Carga de partículas
- Movimiento de partículas en relación con el flujo de gas
- Deposición de partículas en una superficie de recolección

En la última etapa, las partículas depositadas en la superficie de recolección se pueden eliminar mediante vibración, sin embargo, esto llevaría a un arrastre de algunas partículas nuevamente hacia el ambiente, también se puede llevar a cabo una remoción en húmedo, mediante rociadores de agua.

Los separadores electrostáticos presentan los siguientes problemas:

- Resistencia de temperatura baja
- Corrosión por alto contenido de polvo y gases de combustión con alto contenido de azufre
- La contaminación del agua que posteriormente necesitara un tratamiento (Tan, 2014).

La filtración, de manera general consiste en recoger las partículas sólidas que arrastrara una corriente gaseosa haciéndolas pasar a través de un medio poroso, primeramente, es necesario considerar los materiales filtrantes de acuerdo a las propiedades del gas, algunos medios filtrantes más comunes son las fibras textiles y plásticas, también existen filtros de barrera rígida hechos de metales o cerámica (Echeverri, 2008).

5.5 Eliminación de compuestos biológicos

Existe una amplia variedad de partículas de origen biológico en el aire interior, como virus, bacterias, hongos protozoos (Guardino, 1998) que pueden proceder de los sistemas de ventilación y aire acondicionado, falta de mantenimiento de las instalaciones, las propias personas etc. las condiciones ambientales como la temperatura, la humedad, luz pueden favorecer a la proliferación de estos contaminantes. Y debido a que estos microorganismos necesitan nutrientes como la materia orgánica, los materiales de construcción pueden servir como sustrato para ellos (Maroto, 2016).

El control de este contaminante requiere un mantenimiento apropiado de los edificios manteniendo condiciones que no ayuden a la proliferación de los microorganismos, se recomienda mantener una humedad relativa de los espacios cerrados en un nivel inferior al 70% y a una temperatura ambiente para que no permita la condensación del agua evitando el crecimiento de hongos hidrófilos e incluso bacterias. (Guardino, 1998)

6 BIOGÁS

El biogás es un combustible gaseoso, limpio, barato, versátil y amigable con el medio ambiente, producto de la digestión anaeróbica de la biomasa, mediante una serie de reacciones bioquímicas. Está constituido principalmente por metano (50 -75% vol) (Bohutskyi & Bower, 2013) y dióxido de carbono(25-40% vol) además de contener algunas trazas de otros compuestos como sulfuro de hidrógeno (H₂S, 0.005 -2% vol) que deben ser removidos (FAO, 2011).

El H₂S es un gas peligroso para el ser humano y animales, desprende un olor a huevo podrido, con una concentración de 15 a 75 ppm irrita los ojos y las vías respiratorias, provoca náuseas, vómitos y dolores de cabeza; en concentraciones de 374 ppm causa la muerte (Arellano, et al., 2017) Es un gas corrosivo para los equipos donde es utilizado (pilas de combustible, refrigeradores, calentadores, motores y otros dispositivos); para los motores de combustión interna, por encima de 1000mg/Nm³ acortan la vida del aceite del motor y ponen en riesgo el sistema de combustión, y al quemarse forma SO₂ y SO₃ que son aún más peligrosos que el H₂S, es por ello que es necesario eliminar este compuesto del biogás, por su parte el CO₂ debe ser removido para ajustar el valor calorífico y la densidad relativa para así cumplir con los índices de Wobbe.

La tecnología para la purificación de biogás que se utilice dependerá del uso de energético que se le dé al combustible.

En la tabla 6.1 se muestran los estándares que se deben cumplir según la finalidad del biogás.

Tabla 6. 1 Estándares de contaminantes según la aplicación del biogás

Contaminantes a eliminar según el uso del biogás						
utilización	agua	H ₂ S	Polvo	siloxanos	CO ₂	O ₂
calentador directo (calderas de gas / quemadores)	si	sí, debe ser menor a 1000ppm	si	no	no	
cocina	si	no	no	no	no	
electricidad (motor estacionario a gas)	si	sí, debe ser menor a 1000ppm	si	si	si	
combustible para vehículos	si	si	si	si	si	si
inyección en la red de gas natural	si	si	si	si	si	si

Al igual que el gas natural, el biogás tiene como principal componente el metano, cuando el biogás es purificado hasta una concentración aproximadamente de 98% de metano, tiene propiedades similares al gas natural por lo que puede ser utilizado en las mismas aplicaciones (Beil & Beyrich, 2003).

Para poder purificar biogás con una pureza similar a la del gas natural es necesario utilizar más de una de las tecnologías de purificación que dependerán de la naturaleza de los materiales de partida para la producción del mismo, así como de las condiciones de operación durante su producción puesto que de esto dependerá su composición y características. Además de considerar factores económicos como lo son los costes de inversión y producción.

Existen diversas tecnologías para la eliminación de estos contaminantes teniendo cada una de ellas ventajas y desventajas respecto a las otras, en la tabla 6.2 se muestran algunos métodos de eliminación de cada contaminante.

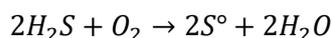
Tabla 6. 2 Tecnologías de eliminación de H₂S

Procesos de eliminación de H ₂ S		
Método	Ventajas	Desventajas
Biológico	Costes baratos de inversión y explotación: bajos requerimientos de electricidad y calor. Operación y mantenimiento simples	La concentración de H ₂ S aún es alta 100-300pmv
Absorción en agua	Es barato cuando el agua está disponible (no regeneración) También puede eliminar CO ₂	La operación es cara debido a las altas presiones y bajas temperaturas requeridas
Absorción química NaOH FeCl ₃	Menor demanda de electricidad, menor volumen, menor bombeo. Bajas perdidas de CH ₄	Inversión y operación caras. No regenerativa

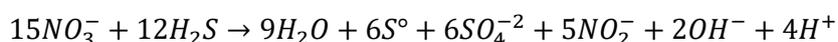
Absorción química Fe(OH) ₃ Fe-EDTA	Eliminación de 95 hasta un 100% Operación es barata Se requiere poco volumen Bajas pérdidas de CH ₄	Dificultad técnica El paso de CO ₂ a H ₂ CO ₃ (utilizando EDTA) conduce a precipitaciones.
Membranas	Es posible una remoción superior al 98% Elimina CO ₂	Operación y mantenimientos caros
Biofiltros	Es posible eliminar más del 97% de H ₂ S Bajos costes de operación	Tratamiento extra del H ₂ S para alcanzar la calidad deseada
Adsorción sobre carbón activado	Tasas de purificación altas temperatura de operación baja Proceso compacto Alta carga	La inversión y la operación son caras Pérdidas de CH ₄ Regeneración a 450 °C

Los procesos químicos para la eliminación de H₂S son caros debido a las necesidades de reactivos, así como los altos costes de energía, debido a ello, los tratamientos biológicos tienen el potencial de superar estas desventajas de los procesos químicos.

Los biofiltros percoladores son una tecnología emergente que ha demostrado la viabilidad del proceso biológico en la desulfuración, estos dispositivos consisten en un dispositivo impulsor que suministra el aire que hay que tratar a través de un reactor lleno de un material de soporte generalmente inerte, donde en forma de biopelícula crece una serie de microorganismos azufre oxidantes que se encargan de convertir el H₂S en azufre elemental y sulfatos, ya sea en presencia de oxígeno como se muestra en la siguiente ecuación.



O en ausencia del mismo, donde el nitrato funciona como aceptor de electrones en lugar del oxígeno.



El sistema tiene una fase líquida la cual es alimentada de forma continua por la parte superior del equipo mediante recirculación desde la parte inferior del equipo.

Después de la eliminación del H_2S es necesario eliminar el CO_2 , a medida que este es eliminado, el poder calórico del biogás incrementa.

Las tecnologías para la eliminación de CO_2 pueden resumirse en 4 grupos: adsorción, absorción, separación con membranas y separación criogénica. Sin embargo, estas tecnologías son costosas, por lo que métodos de eliminación biológica suelen ser una buena opción,

Las microalgas debido a su alta capacidad de fijación de CO_2 presentan un alto potencial para la eliminación de esta sustancia indeseada en el biogás.

El biogás purificado permite reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y tiene otros beneficios ambientales cuando es utilizado como combustible para vehículos ya que emite menos óxido de nitrógeno, monóxido de carbono e hidrocarburos que las gasolinas o el diésel.

7 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Debido a la actividad humana, la concentración de CO₂ en la atmosfera ha aumentado causando problemas climáticos que a su vez se traducen en un riesgo para el bienestar humano.

A pesar de los acuerdos internacionales que se han elaborado para la disminución de emisiones de gases de efecto invernadero, aún existe una resistencia por parte de los países más industrializados.

Por tales motivos surge la necesidad de disminuir la concentración de CO₂ utilizando nuevas tecnologías amigables con el ambiente.

8 HIPÓTESIS

Un nuevo diseño de fotobiorreactor tipo airlift cumplirá con las necesidades de mezclado para favorecer el crecimiento de las microalgas, así como un buen coeficiente de transferencia de masa para la eliminación de CO₂ y la desorción del O₂.

9 OBJETIVOS

9.1 Objetivo General

Desarrollar un nuevo fotobiorreactor airlift de bajo costo, que pueda proporcionar condiciones favorables para el cultivo de microalgas utilizando el CO₂.

9.2 Objetivos Específicos

- Diseño y construcción de un nuevo fotobiorreactor airlift aplicado para la eliminación de CO₂ del aire
- Evaluación del coeficiente volumétrico de transferencia de masa en el fotobiorreactor airlift construido.
- Evaluación hidrodinámica y de los rangos de operación del fotobiorreactor airlift.

10 MATERIALES Y METODOS

10.1 Fotobiorreactor airlift

El fotobiorreactor que se muestra en la Figura 10.1.1 tiene un volumen total de 460 ml siendo útiles solo 430 ml. Para describir este fotobiorreactor se dividirá en 4 secciones:

1. Sección ascendente: consta de una columna de PVC transparente de 74 cm de altura y 1.5 cm de diámetro interno, donde por la parte inferior se suministra aire, el cual aumentará el nivel del líquido en esta columna llevándolo hasta la intersección con la siguiente sección.
2. Sección Descendente: consta de una columna paralela a la sección ascendente constituida por los mismos materiales, sin embargo, su altura es de apenas 22 cm y está acoplada a una espiral con una geometría cónica que se muestra en la Figura 10.1.1, cabe mencionar que en esta columna se encuentra el sensor de pH, así como el dispensador de agua que comprende la sección 4.
3. Sección espiral: Esta sección es una continuación de la sección 2, por lo que es perteneciente a la parte descendente, con la diferencia que en esta sección la manguera de PVC cuyo diámetro interno es de 0.6 cm y una longitud de 6 m mencionada anteriormente se encuentra enrollada en el interior de una estructura metálica con forma cónica conteniendo 16 espirales ,cuya espiral superior tiene un diámetro de 28 cm y la espiral inferior un diámetro de 10 cm, la altura total del cono es de 30 cm, la espiral tiene un paso de 2 cm y el grado de inclinación de cada espiral es de 3° con respecto a la horizontal . Esta sección reintegra el fluido a la sección 1 por la parte inferior de la columna.
4. Dispensador de agua: Por último, tenemos una sección de compensación de agua, debido a la evaporación y arrastre de la misma, causada por diversos factores entre ellos el mismo suministro de aire en la columna. La pérdida varía según las condiciones ambientales (Temperatura y humedad del aire), lo que provoca que, en el fotobiorreactor sin una compensación de agua, funcionaria menos de un día, por ello se implementó un sistema que provea un suministro constante de agua. El sistema consta de una jeringa de 60 ml en la que por la parte inferior se ha agrandado el orificio hasta un diámetro interior de 0.6 mm y un diámetro exterior de 0.9 mm conectada a una manguera de diámetro interior de 0.9mm y un diámetro exterior de 12.7 mm (1/2 in), esta manguera es conectada al fotobiorreactor en la sección 2 como se muestra en la figura 10.1.1. Es importante resaltar que para que el

dispensador pueda funcionar, ya sea el recipiente que sea, necesita un diámetro mínimo de 0.9 mm, de lo contrario el líquido se quedará retenido en el recipiente

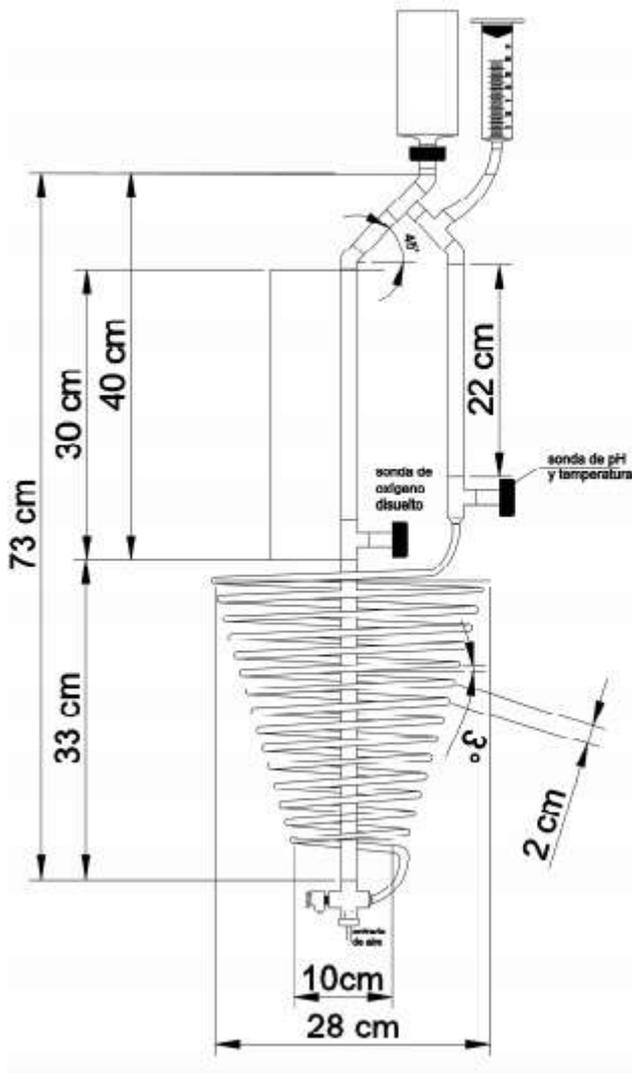


Figura 10.1. 1 Esquema del fotobiorreactor construido



Figura 10.1. 1 Fotobiorreactor en funcionamiento con microalgas

10.2 Determinación del volumen máximo y mínimo de operación

Se inundó completamente el reactor con agua del grifo determinando de esta manera el volumen total del reactor, posteriormente se puso en funcionamiento burbujando aire a diferentes flujos y se

recolectó el líquido derramado en una probeta de 100 ml registrando la diferencia de volúmenes, determinando así el volumen máximo de operación.

$$V_{max} = V_T - V_D \quad (10.2.13)$$

Donde:

V_{max} = volumen máximo de operación.

V_T = volumen total

V_D = volumen derramado

Una vez en operación se retiró líquido hasta que el fotobiorreactor comenzó a tener problemas operativos, registrando la diferencia de volúmenes entre el volumen máximo de operación y el volumen retirado obteniendo de esta manera el volumen mínimo de operación; el volumen de líquido fue retirado por la válvula encontrada en la parte inferior de la columna y recolectado en un vaso de precipitados de 100 ml.

$$V_{min} = V_{max} - V_R \quad (10.2.2)$$

Dónde:

V_{max} = volumen máximo de operación.

V_{min} = volumen mínimo de operación

V_R = volumen retirado

10.3 Flujo de aire

El flujo de alimentación de aire del fotobiorreactor fue suministrado por la línea de aire del laboratorio de ingeniería ambiental, fue controlado y medido por un rotámetro cole parmer con un rango de operación de hasta 1LPM y fueron usados 4 flujos para las determinaciones de los parámetros presentados en este trabajo, los flujos fueron: 0.25, 0.5, 0.75 y 1LPM.

Flujo y velocidad del líquido

El flujo de líquido, así como la velocidad del mismo son función del flujo de aire.

La velocidad del flujo se determinó mediante 2 métodos:

1. Determinando el flujo de recirculación hacia la parte descendente y posteriormente dividiendo estos valores entre el área transversal de la tubería, calculando así la velocidad del líquido según la ecuación de continuidad.

$$Q = u_L * A \quad (10.3.1)$$

Donde:

Q = flujo volumétrico

u = velocidad lineal del líquido

Para determinar el flujo de recirculación se separó por la parte superior la sección descendente como se muestra en la figura 10.2.1, y se procedió a mantener el nivel de operación, esto es, al nivel donde se encuentra el dispensador de agua, ahí, se le suministró agua con un vaso de precipitados y se midió en una probeta la cantidad de fluido expulsada por la parte superior.

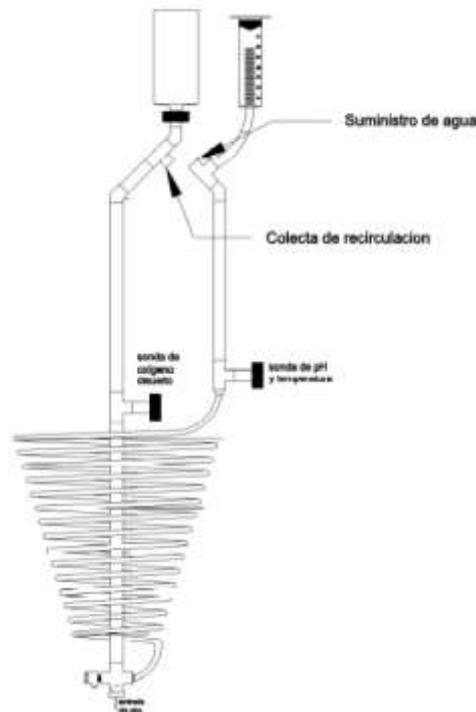


Figura 10.3.1 Representación de la separación de la parte descendente para la medición del flujo de recirculación

2. Determinando la velocidad de una partícula suspendida en el líquido, haciendo la suposición que la partícula tiene la misma densidad que el líquido.

10.4 Determinación del número de Reynolds (N_{Re})

Con base en los resultados anteriores se calculó el número de Reynolds para identificar el régimen de flujo en el que se encuentra el líquido. Esto se calculó con la siguiente ecuación

$$N_{Re} = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (10.4.14)$$

Donde:

ρ = densidad del líquido (Kg/m³)

v = velocidad del fluido (m/s)

d = diámetro de la tubería (m)

μ = viscosidad dinámica (Pa.s)

10.5 Hold-up

La cantidad de gas retenido se define como la fracción de volumen de gas en el volumen total de una mezcla líquido-gas dentro de la columna

$$\varepsilon_g = \frac{V_m - V_l}{V_m} \quad (10.5.1)$$

Donde:

ε_g = retención de gas

V_m = volumen de la mezcla gas-líquido

V_l = volumen del líquido

Sin embargo, debido a que el área transversal es la misma, esta ecuación queda simplificada a medir únicamente las alturas.

$$\varepsilon g = \frac{A * h_m - A * h_l}{A * h_m} \quad (10.5.2)$$

$$\varepsilon g = \frac{h_m - h_l}{h_m} \quad (10.5.3)$$

Donde:

εg = retención de gas

h_m = altura del líquido mientras existe burbujeo

h_l = altura del líquido sin burbujeo

Tomando esto en consideración se determinó la retención de gas mediante la técnica de gas retirado (Majumder, 2019) que consiste en mantener en operación el reactor, midiendo la altura hasta donde se alcanza a apreciar el líquido, posterior a ello se interrumpe el suministro de gas y se procede a medir la altura del líquido.

10.6 Determinación del coeficiente volumétrico de transferencia de masa $k_L a$

Se determinó el coeficiente volumétrico de transferencia de masa $k_L a$ utilizando la técnica de eliminación de gas (Gassing-out) que consiste en inyectar nitrógeno al fotobiorreactor el cual fue inyectado mediante una bomba peristáltica (Cole-Parmer, 755905, Chicago) conectada a una bolsa teflar de 10 L, llevando la concentración de oxígeno disuelto dentro del FBR cercana a cero.

Una vez alcanzada una baja concentración de oxígeno disuelto se desconectó de la bomba peristáltica la línea de alimentación de N_2 del FBR y se conectó a la línea de aire del laboratorio, previamente abierta con el flujo de aire a utilizar en cada determinación.

Los datos del porcentaje de oxígeno disuelto fueron medidos mediante un sensor de oxígeno disuelto y registrados.

El coeficiente volumétrico de transferencia $k_L a$ se obtuvo al graficar $\ln((C_g^* - C_L)/(C_g^* - C_{L0}))$ vs tiempo (s) esto producto de la solución del balance de oxígeno en un cultivo Batch como se muestra a continuación.

$$\frac{dC_L}{dt} = K_L a (C_g^* - C_L) \quad (10.6.1)$$

Linealizando la ecuación anterior da como resultado:

$$\ln \left(\frac{C_g^* - C_L}{C_g^* - C_{L0}} \right) = -K_L a dt \quad (10.6.4)$$

Dónde:

C_{L0} = Concentración de oxígeno inicial en el líquido al tiempo $t = 0$

C_L = Concentración de oxígeno en el líquido al tiempo t

C_g^* = Concentración de oxígeno disuelto en equilibrio

$K_L a$ = Coeficiente volumétrico de transferencia de masa

Medición de pH

Se monitoreó el pH durante 21.5 horas con ayuda de un medidor multiparamétrico ThermoFisher Orion Star A326

11 RESULTADOS

11.1 Velocidad y número de Reynolds

La velocidad del fluido se determinó con dos métodos, primero tomando en cuenta el flujo de recirculación del fluido dividiéndolo entre el área de la tubería que conforma la sección cónica y por donde circula el fluido, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 11. 1. 1 Velocidad del líquido calculado mediante el flujo de recirculación en función de un flujo de aire de 0.25 LPM

Flujo de aire 0.25 LPM		
Ensayo	Flujo de líquido (ml/min)	V promedio (m/s)
1	230	0.134
2	224	
3	230	
Promedio	228	

Tabla 11.1. 2 Velocidad del líquido calculado mediante el flujo de recirculación en función de un flujo de aire de 0.5 LPM

Flujo de aire 0.5 LPM		
Ensayo	Flujo de líquido (ml/min)	V promedio (m/s)
1	292	0.171
2	292	
3	286	
Promedio	290	

Tabla 11.1. 3 Velocidad del líquido calculado mediante el flujo de recirculación en función de un flujo de aire de 0.75 LPM

Flujo de aire 0.75 LPM		
Ensayo	Flujo de líquido ml/min	V promedio (m/s)
1	306	0.180
2	310	
3	300	
Promedio	305.333	

Tabla 11.1.4 Velocidad del líquido calculado mediante el flujo de recirculación en función de un flujo de aire de 0.25 LPM

Flujo de aire 1 LPM		
Ensayo	Flujo de líquido ml/min	V promedio (m/s)
1	327	0.193
2	328	
3	328	
promedio	327.666	

Al comparar estos resultados podemos notar la dependencia del flujo de líquido que es, directamente proporcional al flujo de aire, esto es más notorio en la siguiente grafica.

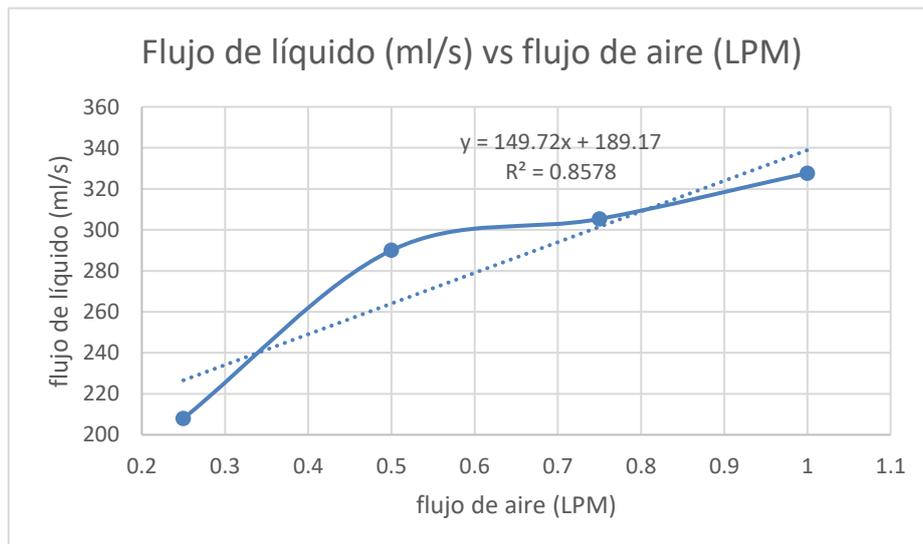


Figura 11.1.1 Comportamiento del flujo de líquido en función del tiempo.

Por tanto, podemos afirmar que, en este rango de flujos, a mayor flujo de aire mayor velocidad del líquido, esto puede explicarse haciendo un análisis de las columnas hidrostáticas.

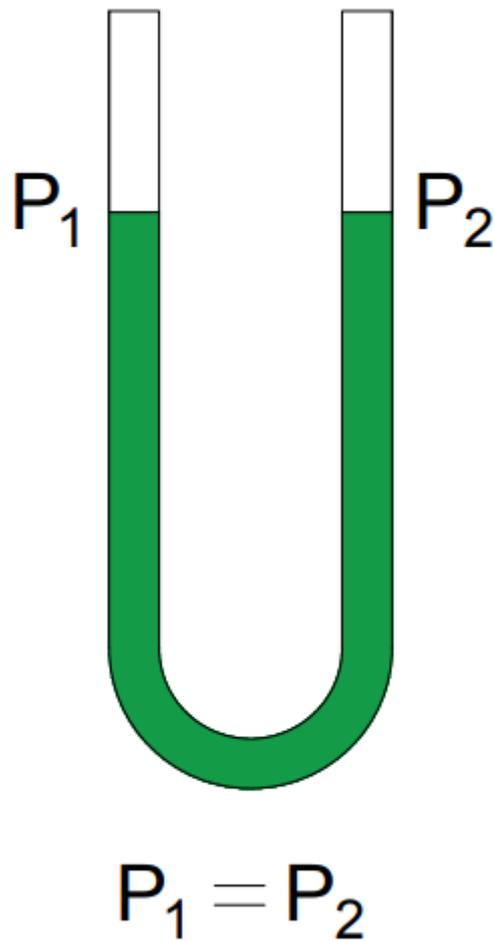


Figura 11.1. 2 Ejemplificación de las columnas hidrostáticas en un sistema de vasos comunicantes.

Donde al ser vasos comunicantes la presión en el punto P1 y la presión en el punto P2 son iguales, por definición la presión hidrostática es igual a:

$$P_H = \rho gh \quad (11.1.1)$$

por tanto, en este punto todos los términos son equivalentes.

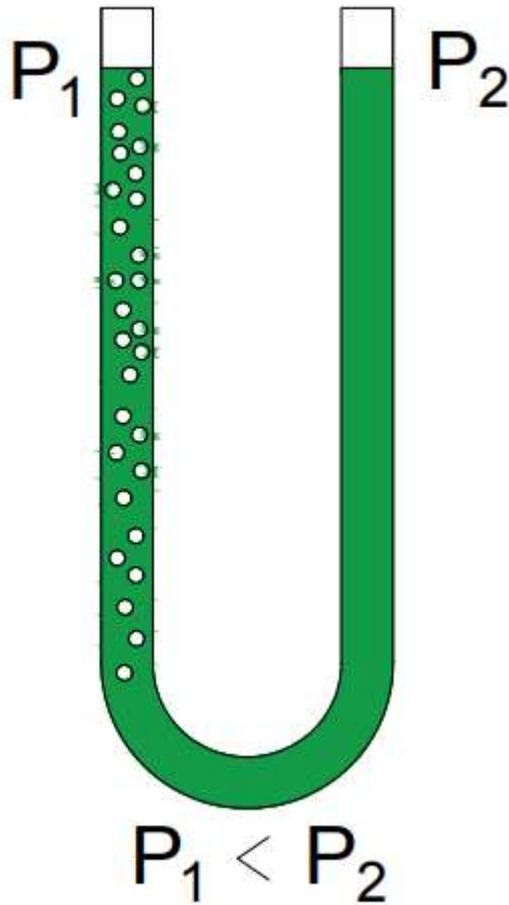


Figura 11.1. 3 Ejemplificación de las columnas hidrostáticas en un sistema de vasos comunicantes cuando se inyecta un gas en alguno de los tubos

Al inyectar aire las condiciones cambian, la densidad resultante de la mezcla líquido-gas de la sección burbujeada será el parámetro que difiere en ambas secciones.

$$P_1 < P_2 \quad (11.1.2)$$

$$(\rho_{g-L})gh < \rho_L gh \quad (11.1.3)$$

Mientras la fracción de gas aumenta la densidad resultante disminuye con respecto a la densidad del líquido aumentando de esta forma el efecto convectivo. (Piedra, et al., 2009), tomando en cuenta que al aumentar el flujo de aire aumenta la fracción de gas retenida como se muestra en los resultados de retención de gas presentados más adelante, la densidad resultante de la sección burbujeada es cada

vez menor al aumentar el flujo de gas, provocando un gradiente mayor de densidad lo que se traduce en un gradiente mayor de velocidad del fluido.

Sin embargo, esto no es siempre favorable, si bien puede aumentar la velocidad del flujo llevándola hasta un régimen turbulento, un flujo alto (para nuestro caso superior a 2 LPM) existe coalescencia de las burbujas, lo que lleva a tener burbujas de gran tamaño teniendo como consecuencia una baja transferencia de masa del gas de interés.

El segundo método para la determinación de la velocidad es la medición de la velocidad de una partícula suspendida en el líquido, haciendo la suposición que esta partícula tiene una densidad similar a la del agua. Los resultados se muestran a continuación.

Tabla 11.1. 5 Cálculo de la velocidad de una partícula con densidad similar a la del agua, la determinación se llevo a cabo bajo un flujo de aire de 0.25 LPM

Velocidad de partícula a un flujo de 0.25 LPM			
Ensayos	Tiempo(s)	Distancia (cm)	Velocidad(m/s)
1	9.2	118	0.128
2	9	118	0.131
3	8.9	118	0.133
Velocidad promedio(m/s)			0.131

Tabla 11.1. 6 Cálculo de la velocidad de una partícula con densidad similar a la del agua, la determinación se llevo a cabo bajo un flujo de aire de 0.5 LPM

Velocidad de partícula a un flujo de 0.5 LPM			
Ensayos	Tiempo(s)	Distancia (cm)	Velocidad(m/s)
1	7.2	118	0.164
2	7	118	0.169
3	6.68	118	0.176
Velocidad promedio (m/s)			0.170

Tabla 11.1. 7 Cálculo de la velocidad de una partícula con densidad similar a la del agua, la determinación se llevo a cabo bajo un flujo de aire de 0.75 LPM

Velocidad de partícula a un flujo de 0.75 LPM			
Ensayos	tiempo(s)	distancia (cm)	Velocidad(m/s)
1	6.49	118	0.181
2	6.49	118	0.181
3	6.6	118	0.179
Velocidad promedio(m/s)			0.181

Tabla 11.1. 8 Cálculo de la velocidad de una partícula con densidad similar a la del agua, la determinación se llevo a cabo bajo un flujo de aire de 1 LPM

Velocidad de partícula a un flujo de 1 LPM			
Ensayos	Tiempo(s)	Distancia (cm)	Velocidad(m/s)
1	5.8	118	0.203
2	6.03	118	0.196
3	6	118	0.197
Velocidad promedio(m/s)			0.199

Tabla 11.1. 9 Comparación de resultados en ambos métodos para la determinación de la velocidad del líquido

Flujo de aire (LPM)	Velocidad promedio (m/s)	
	Método 1	Método 2
0.25	0.135	0.130
0.5	0.171	0.170
0.75	0.180	0.181
1	0.193	0.198

Como se puede observar en la tabla 11.1.9 ambas determinaciones de velocidad nos muestran valores similares por lo que usar cualquiera de los dos métodos servirá para determinar la velocidad del líquido, siempre y cuando se utilice una partícula con una densidad similar a la del fluido de trabajo.

Una vez determinado esto, se calculó el número de Reynolds, mostrando el tipo de flujo en el que se encuentra el fluido.

Tabla 11.1. 10 Resultados de números de Reynolds en función con el flujo de aire suministrado

Flujo de aire (LPM)	N_{Re}
0.25	806.385
0.5	1025.665
0.75	1079.895
1	1158.884

Como se puede ver, todos los números de Reynolds son menores a 2000 por lo que se encuentra en un régimen laminar, según la literatura, se recomienda un régimen turbulento para la prevención de formaciones de flóculos de materia orgánica, debido a esto se buscó una alternativa para aumentar aún más la velocidad, analizando el efecto del aumento de altura de la columna de burbujeo, añadiendo 30 cm a la original utilizando solamente 2 flujos de aire: 0.75 y 1 LPM.

Tabla 11.1.11 Comparación de la velocidad y el número de Reynolds con un cambio en la altura de la columna, donde en la segunda sección se muestran los resultados al aumentar 30 cm a la columna original.

N_{Re} y velocidad en función de la altura				
Flujo (LPM)	Altura inicial		Altura inicial +30 cm	
	Velocidad (m/s)	N_{Re}	Velocidad (m/s)	N_{Re}
0.75	0.180	1079.895	0.264	1585.092
1	0.193	1158.883	0.309	1855.246

Como se muestra en la tabla 11.1.11 al existir un aumento de altura en la columna de burbujeo existe un aumento de velocidad esto puede explicarse con los valores de retención de gas nuevamente, debido a que según los valores que se presentaran más adelante, la retención de gas aumentó con la adición de los 30 cm extra en la columna de burbujeo por lo que, al aumentar la fracción de gas disminuyó la densidad, provocando un gradiente aun mayor que en la altura original del fotobiorreactor.

(De los Cobos, et al., 2015) caracterizaron un fotobiorreactor tubular de tipo airlift de 550 ml reportando velocidades de 20.6 cm/s a un flujo de aire de 0.72 LPM mientras que en este estudio se obtuvo una velocidad promedio de 26.4 cm/s en un rango similar de flujos de aire sin embargo, mientras que ellos obtuvieron un número de Reynolds de 4361 en este estudio se obtuvo un número de Reynolds de apenas 1079.89 esto puede deberse a diversos factores en los que resaltan, la alta caída de presión debido a la espiral, la diferencia del material con el que se trabajó, cambiando de esta forma la rugosidad que influye directamente en el factor de fricción y por ende en la caída de presión.

11.2 Hold-up

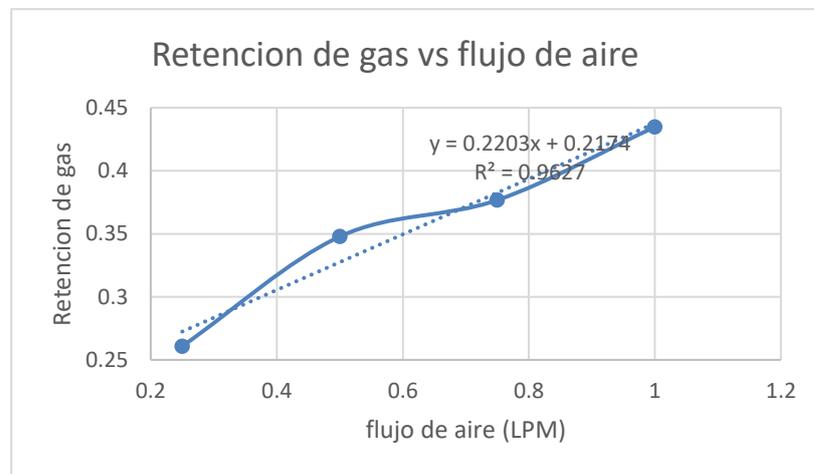


Figura 11.2.1 Representación gráfica del cambio de la fracción de gas en función del flujo de aire suministrado

En la figura 11.2.1 se puede observar la relación directa de la retención de gas en función del flujo de aire, que concuerda con Ishibashi et al. (2001) quien concluyó que la retención de gas aumenta casi linealmente con la velocidad superficial del aire, igualmente Behkish et al. (2006) concluyeron que la retención total de gas aumenta con la presión, la velocidad del gas y la temperatura.

Se realizaron mediciones de retención de gas en función de la altura de la columna de burbujeo encontrándose un incremento, lo que podría representar una disminución de la densidad resultante de la mezcla L-g en el reactor lo que puede explicar que a un aumento de altura existe un aumento en la velocidad del líquido como se planteó anteriormente, los resultados se muestran en la tabla 11.2.1

Tabla 11.2.1 Mediciones de fracción de gas retenida en dos diferentes flujos de aire con el incremento de la altura en la columna inicial.

Flujo (LPM)	Retención de gas	
	Altura inicial	Altura inicial + 30 cm
0.075	0.3768	0.4736
1	0.4347	0.5263

11.3 Coeficiente volumétrico de transferencia de masa K_{La} en función del flujo de aire

Se llevó a cabo la determinación del coeficiente volumétrico de transferencia de masa K_{La} para 4 flujos de aire en un rango que va desde 0.25 LPM hasta 1 LPM dentro de la columna donde se lleva a cabo el burbujeo, así como del sistema completo, esto es, tomando en cuenta la recirculación de líquido. Se encontró una significativa diferencia.

Se realizaron 2 repeticiones por cada flujo de aire, los resultados se muestran a continuación.

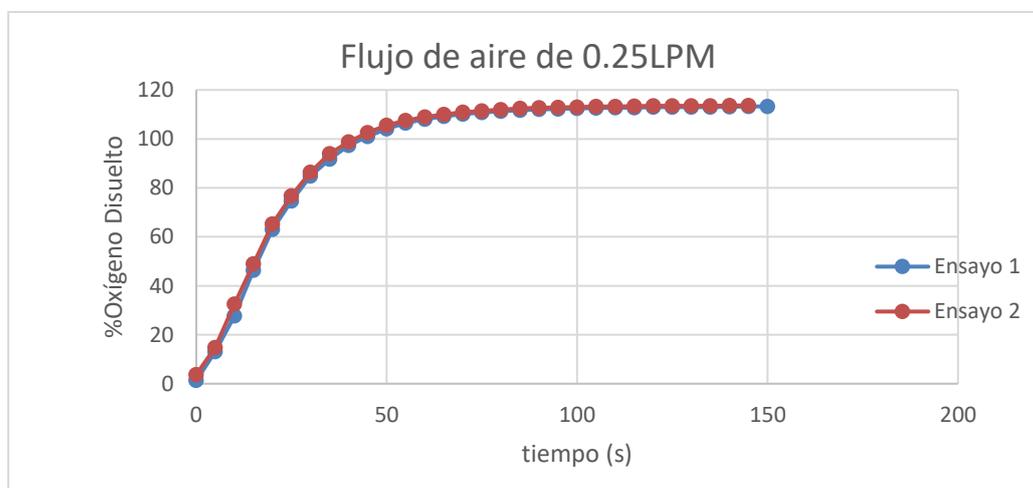


Figura 11.3. 1 Medición del incremento del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en agua en función del tiempo y con un flujo de aire de 0.25 LPM

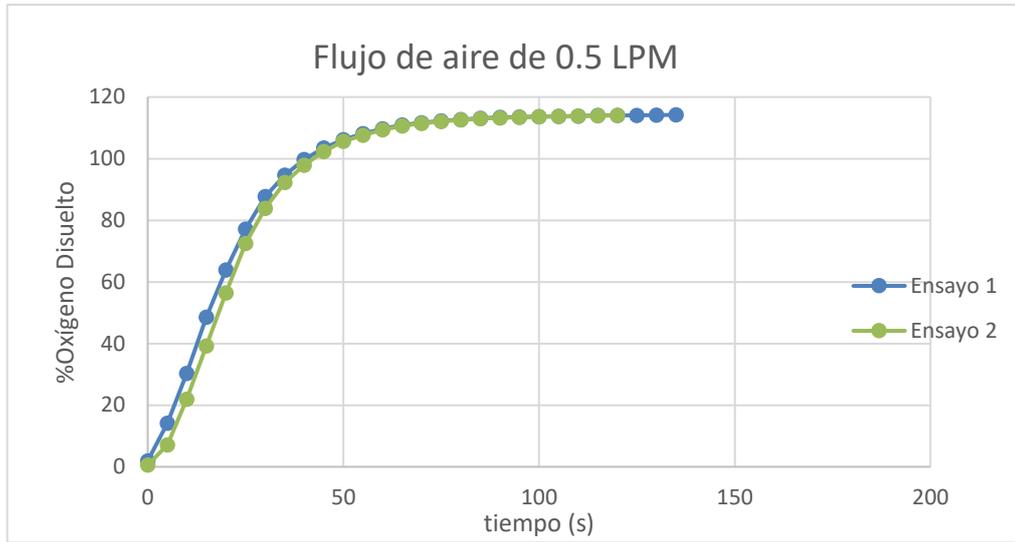


Figura 11.3. 2 Medición del incremento del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en agua en función del tiempo y con un flujo de aire de 0.5 LPM

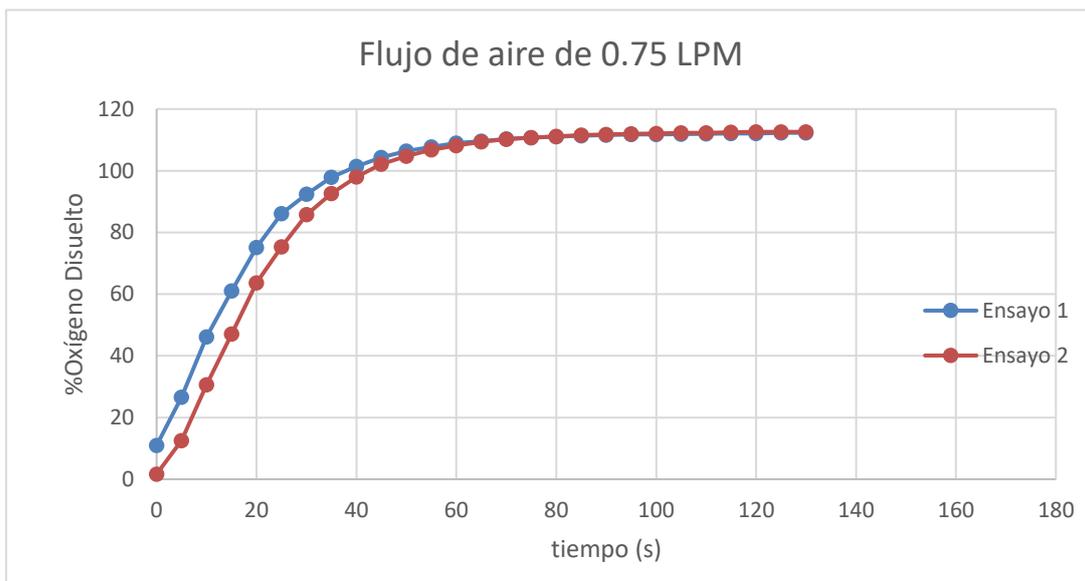


Figura 11.3. 3 Medición del incremento del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en agua en función del tiempo y con un flujo de aire de 0.75 LPM

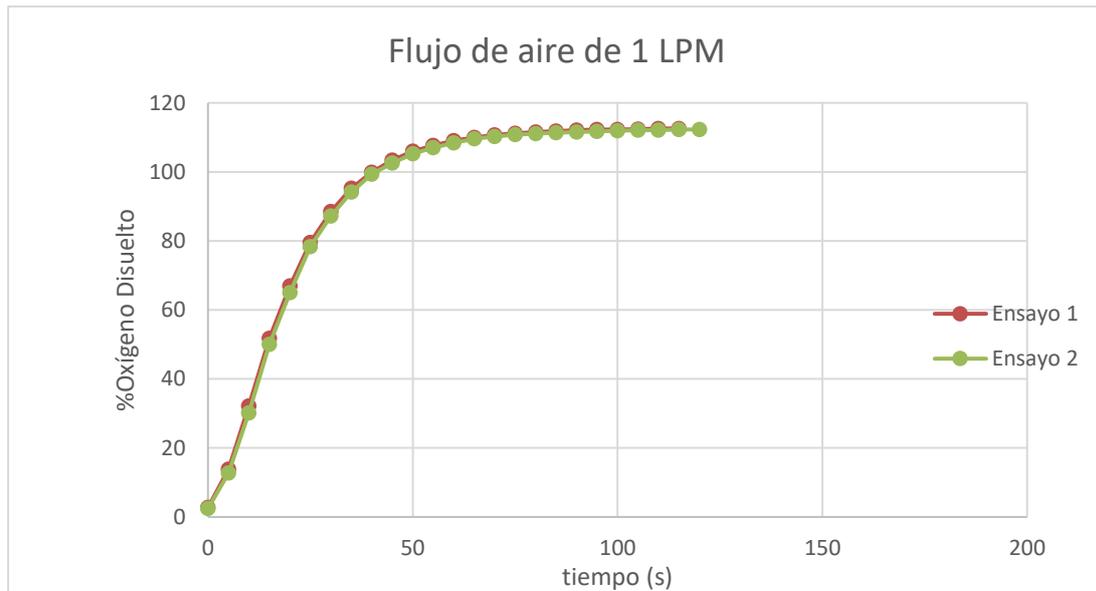


Figura 11.3. 4 Medición del incremento del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en agua en función del tiempo y con un flujo de aire de 1 LPM

En las gráficas de la 11.3.1 a la 11.3.4 se muestra el comportamiento del porcentaje de oxígeno disuelto en función del tiempo a determinado flujo de aire en la columna de burbujeo solamente, como se puede apreciar todas las gráficas se muestran con un comportamiento similar.

En las siguientes gráficas se muestra la linealización de las gráficas anteriores, para la determinación del coeficiente volumétrico de transferencia de masa.

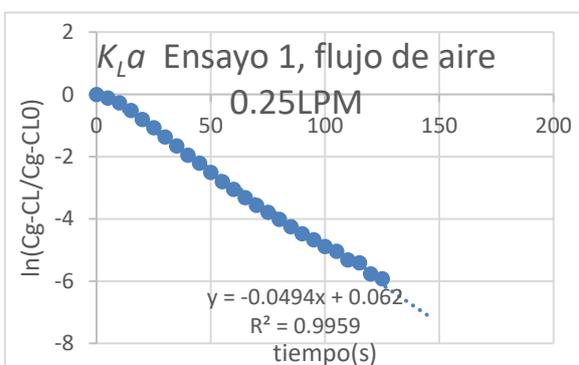


Figura 11.3. 5 Determinación de $K_L a$ para el primer ensayo con un flujo de 0.25 LPM, la $K_L a$ es únicamente de la columna

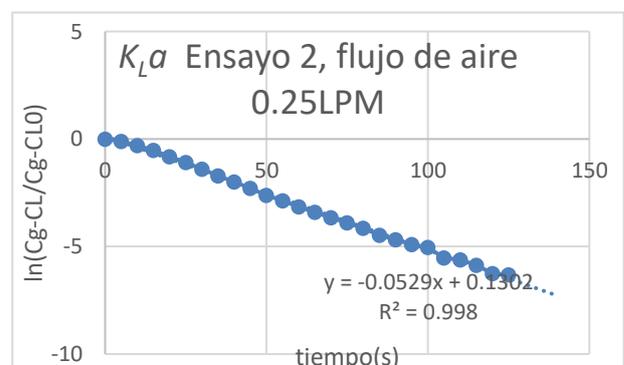


Figura 11.3.6 Determinación de $K_L a$ para el segundo ensayo con un flujo de 0.25 LPM, la $K_L a$ es únicamente de la columna

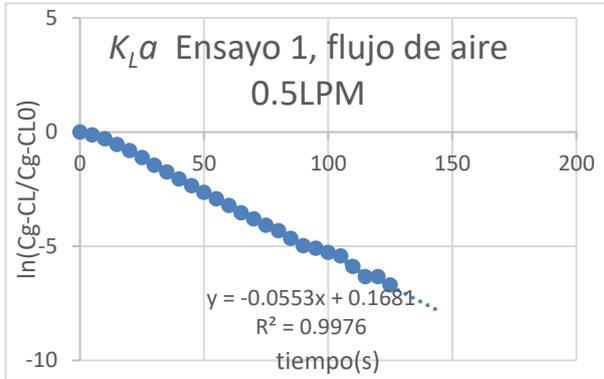


Figura 11.3. 7 Determinación de $K_L a$ para el primer ensayo con un flujo de 0.5 LPM, la $K_L a$ es únicamente de la columna

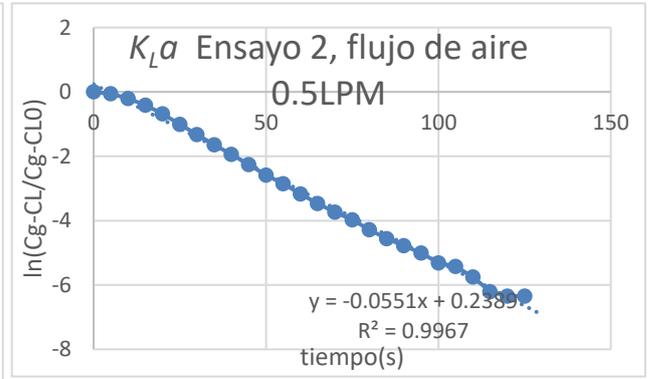


Figura 11.3.8 Determinación de $K_L a$ para el segundo ensayo con un flujo de 0.5 LPM, la $K_L a$ es únicamente de la columna

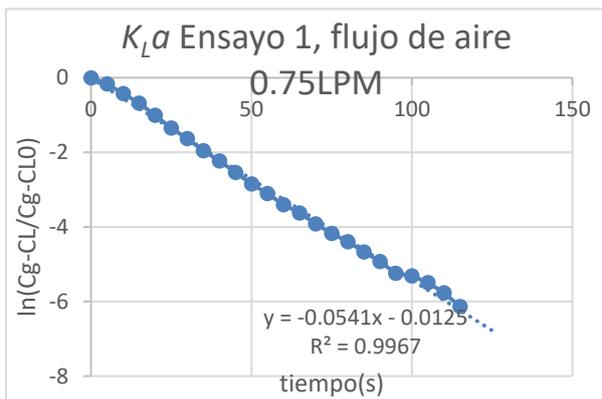


Figura 11.3.9 Determinación de $K_L a$ para el primer ensayo con un flujo de 0.75 LPM, la $K_L a$ es únicamente de la columna

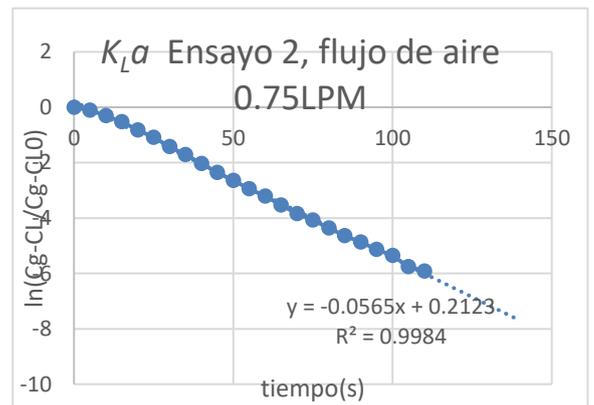


Figura 11.3.10 Determinación de $K_L a$ para el segundo ensayo con un flujo de 0.5 LPM, la $K_L a$ es únicamente de la columna

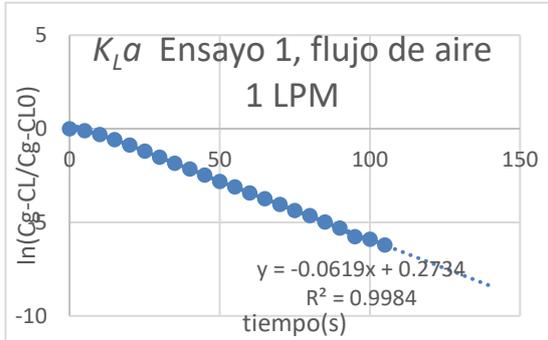


Figura 11.3.11 Determinación de K_La para el segundo ensayo con un flujo de 1LPM, la K_La es únicamente de la columna

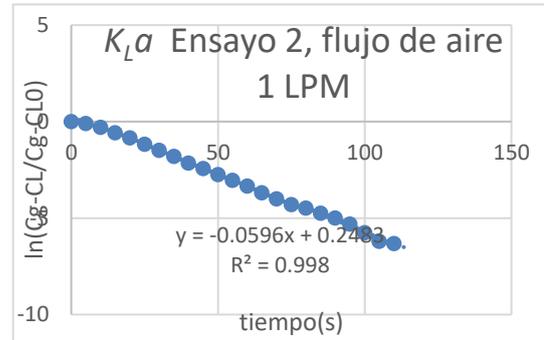


Figura 11.3.12 Determinación de K_La para el primer ensayo con un flujo de 1 LPM, la K_La es únicamente de la columna

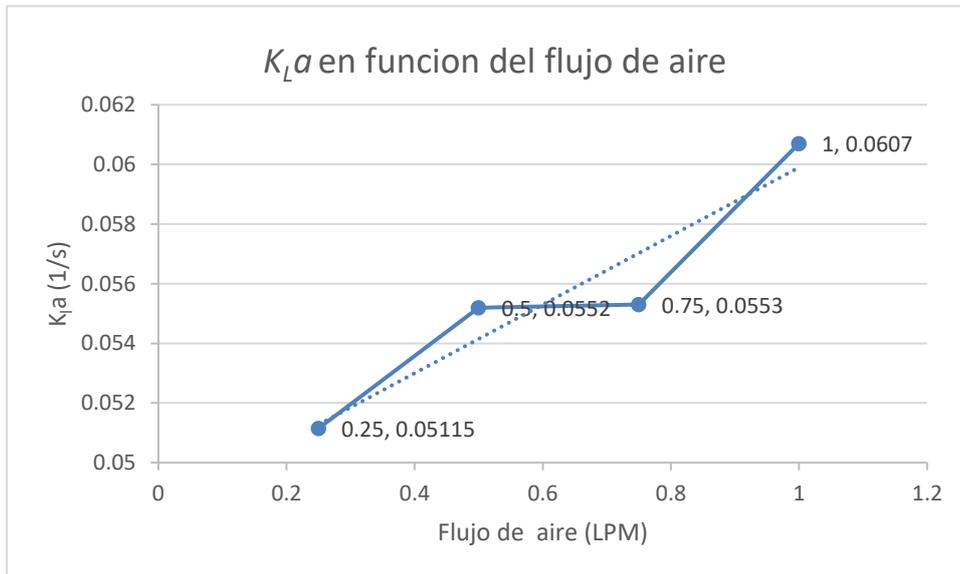


Figura 11.3.13 Muestra la dependencia que tiene coeficiente volumétrico de transferencia K_La en la columna de burbujeo aislada respecto al flujo de aire

La pendiente de las figuras 11.3.5 hasta 11.3.12 muestran el resultado de los coeficientes volumétricos de transferencia de masa determinando una K_La promedio. En la figura 11.3.13 se muestran los coeficientes de transferencia de masa y comparándolos podemos observar que existe una relación directa entre el coeficiente de transferencia de masa y el flujo de aire al menos en este rango de flujos que va desde 0.25 a 1LPM, cabe recalcar que estos resultados son únicamente de la columna de burbujeo.

De igual forma se determinó el coeficiente volumétrico de transferencia de masa K_{LA} en el sistema completo, es decir, tomando en cuenta la recirculación, lo que tuvo un comportamiento diferente a los ensayos presentados anteriormente.

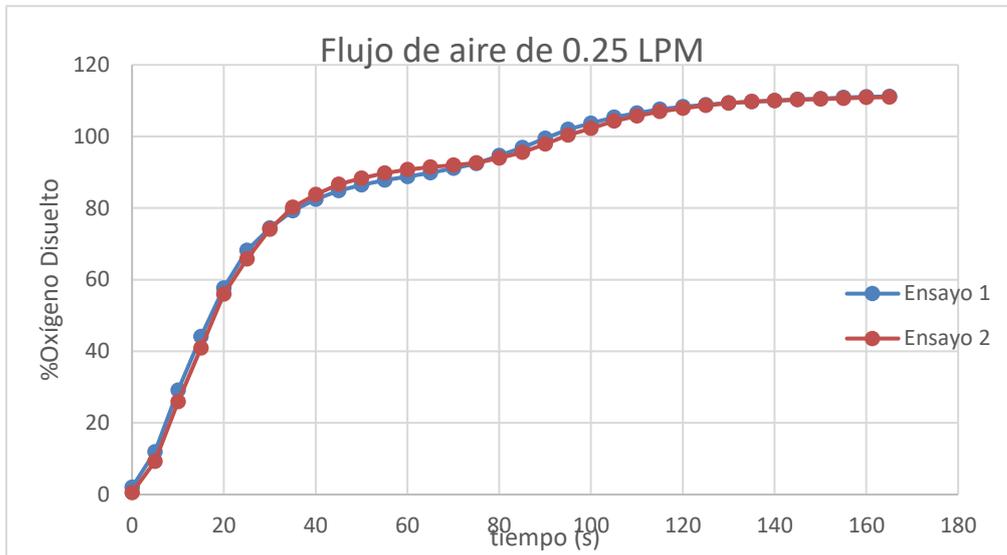


Figura 11.3.14 Medición del incremento del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en agua en función del tiempo y con un flujo de aire de 0.25 LPM tomando en cuenta el sistema con recirculación.

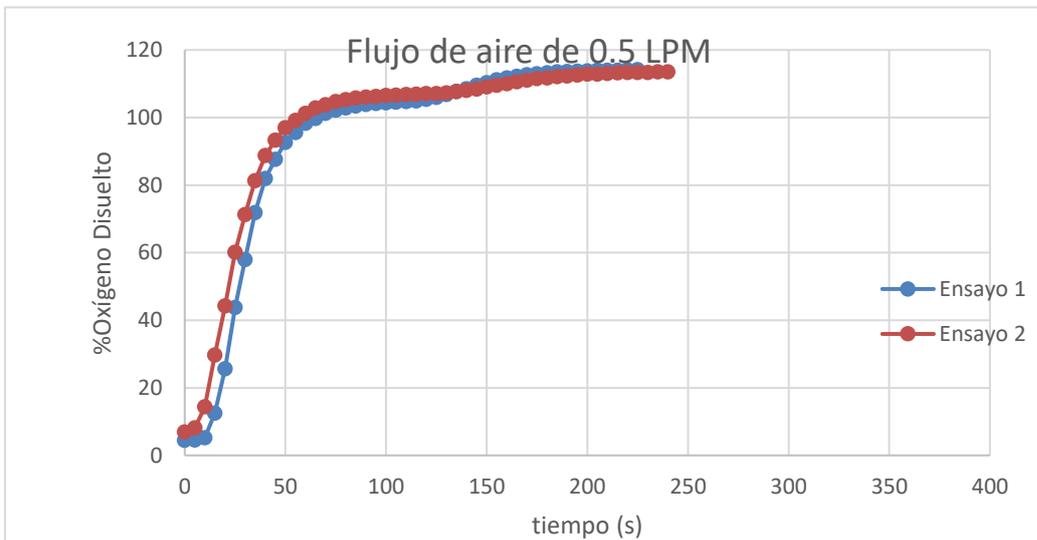


Figura 11.3.15 Medición del incremento del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en agua en función del tiempo y con un flujo de aire de 0.5 LPM tomando en cuenta el sistema con recirculación.

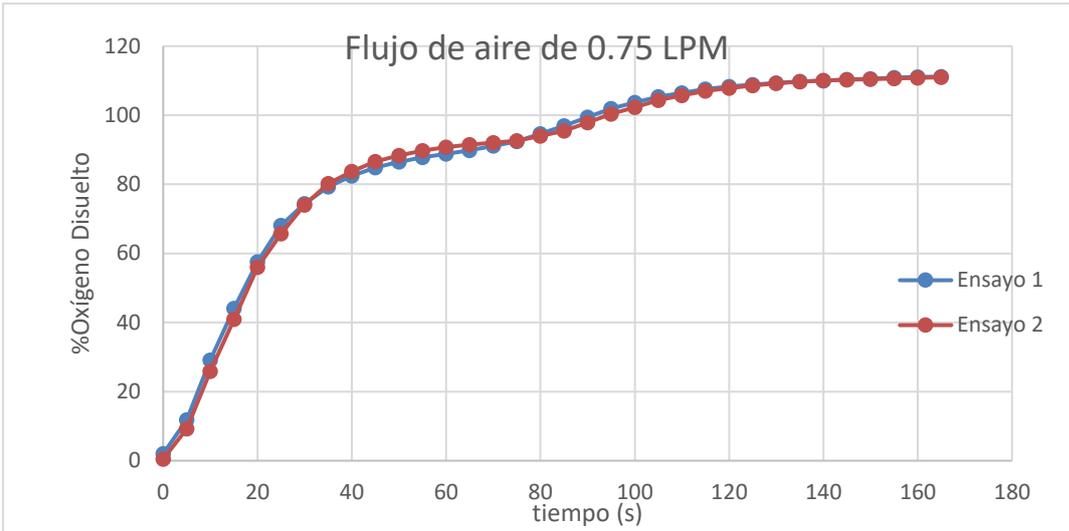


Figura 11.3.16 Medición del incremento del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en agua en función del tiempo y con un flujo de aire de 0.75 LPM tomando en cuenta el sistema con recirculación.

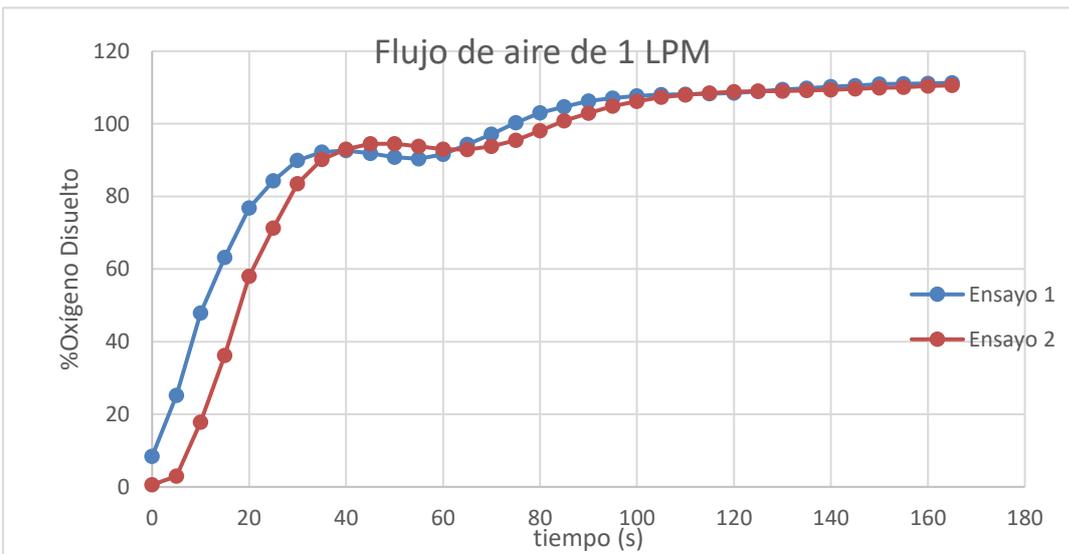


Figura 11.3.17 Medición del incremento del porcentaje de saturación de oxígeno disuelto en agua en función del tiempo y con un flujo de aire de 1 LPM tomando en cuenta el sistema con recirculación.

En las gráficas desde 11.3.14 hasta 11.3.17 se muestra el comportamiento del sistema completo y como se puede ver existe una diferencia al comportamiento de la columna de burbujeo si se encontrara sola.

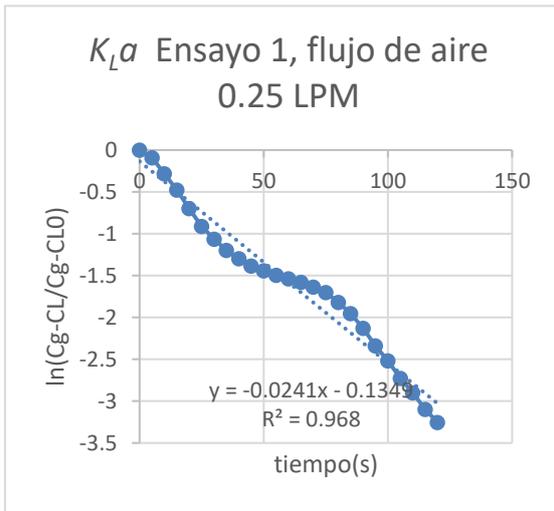


Figura 11.3.18 Determinación de $K_L a$ para el primer ensayo con un flujo de 0.25 LPM considerando la recirculación del sistema.

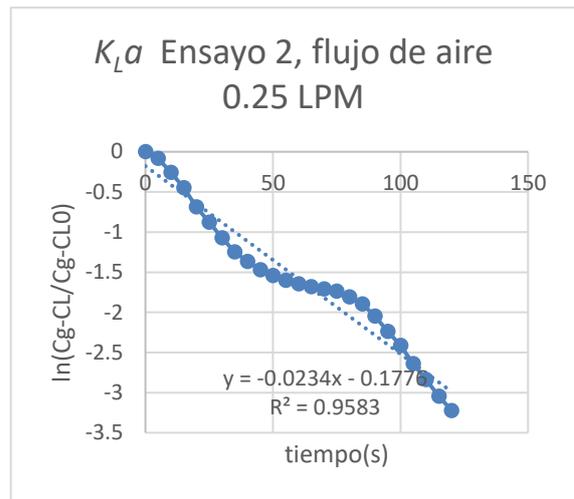


Figura 11.3.19 Determinación de $K_L a$ para el segundo ensayo con un flujo de 0.25 LPM considerando la recirculación del sistema.

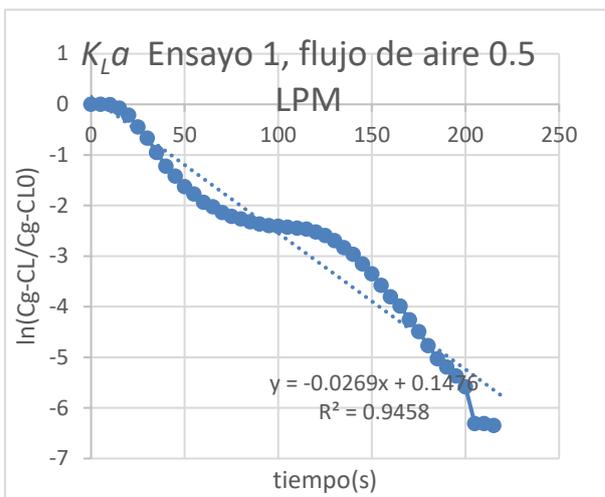


Figura 11.3. 20 Determinación de $K_L a$ para el primer ensayo con un flujo de 0.5 LPM considerando la recirculación del sistema.

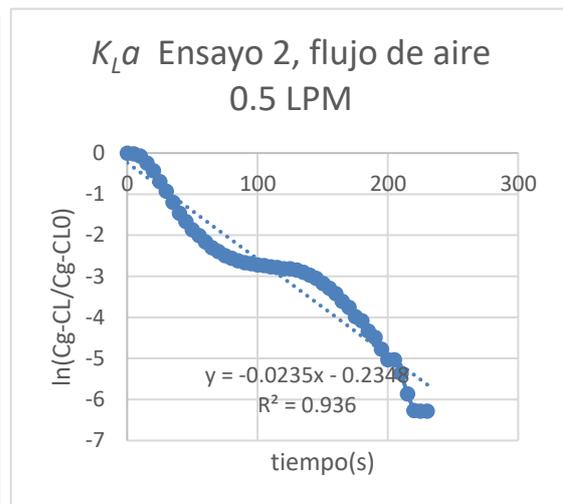


Figura 11.3. 21 Determinación de $K_L a$ para el segundo ensayo con un flujo de 0.5 LPM considerando la recirculación del sistema.

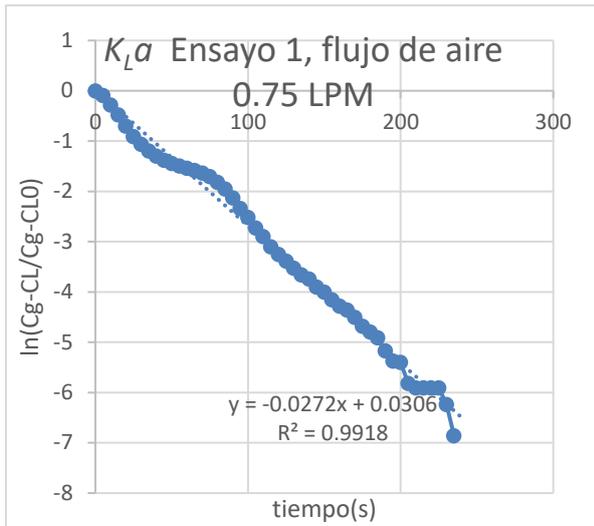


Figura 11.3. 22 Determinación de $K_L a$ para el primer ensayo con un flujo de 0.75 LPM considerando la recirculación del sistema.

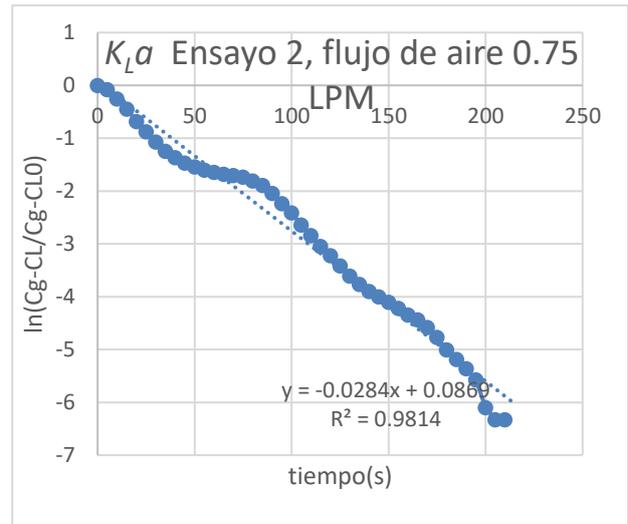


Figura 11.3.23 Determinación de $K_L a$ para el segundo ensayo con un flujo de 0.75 LPM considerando la recirculación del sistema.

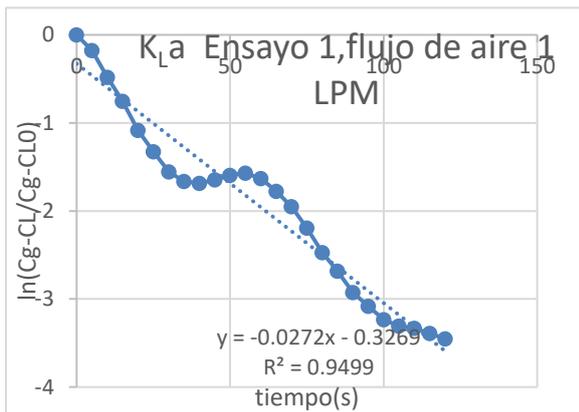


Figura 11.3. 24 Determinación de $K_L a$ para el primer ensayo con un flujo de 1 LPM considerando la recirculación del sistema.

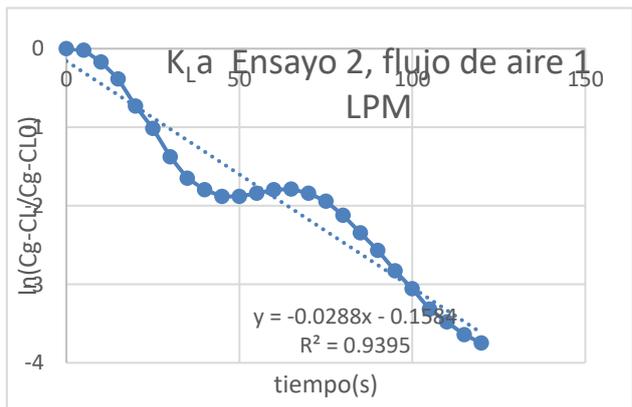


Figura 11.3.25 Determinación de $K_L a$ para el segundo ensayo con un flujo de 1 LPM considerando la recirculación del sistema.

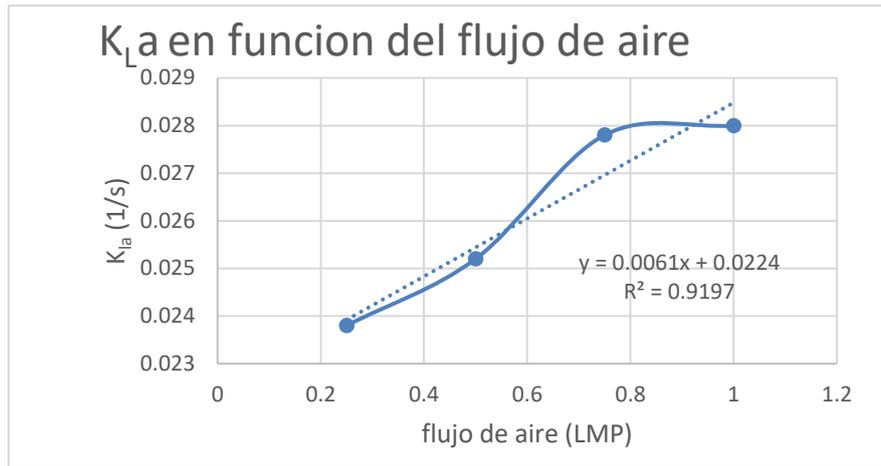


Figura 11.3. 26 Representación gráfica del cambio de K_{La} en el sistema con recirculación en función del flujo de aire

Como se puede observar en las gráficas anteriores a partir de la figura 11.3.14 el comportamiento del sistema airlift parece ser diferente a la columna aislada, por lo que es necesario hacer una comparación entre cada sistema, pero con el flujo de aire similar.

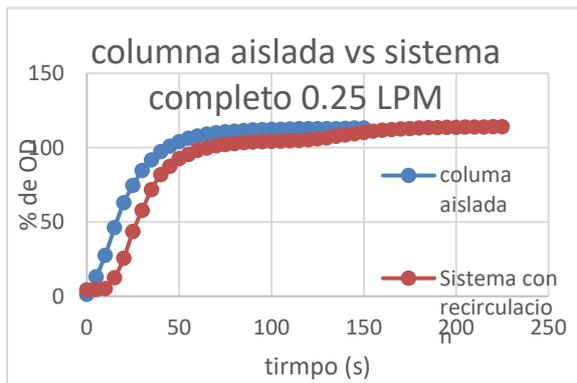


Figura 11.3. 27 comparación entre el sistema con recirculación (airlift) y la columna aislada con un flujo de aire de 0.25 LPM

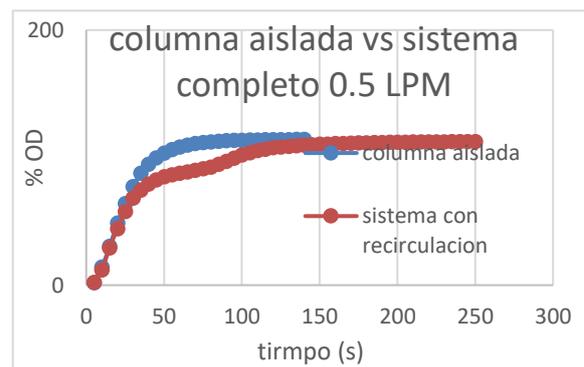


Figura 11.3. 28 comparación entre el sistema con recirculación (airlift) y la columna aislada con un flujo de aire de 0.5 LPM

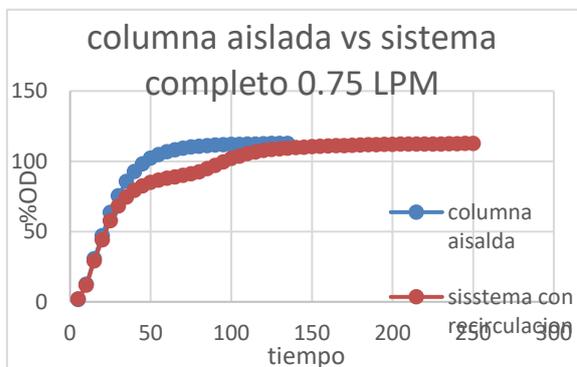


Figura 11.3. 29 comparación entre el sistema con recirculación (airlift) y la columna aislada con un flujo de aire de 0.75 LPM

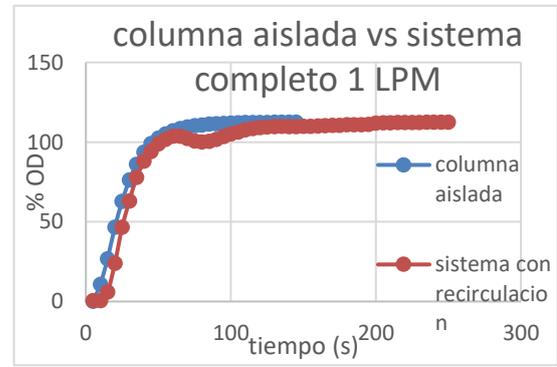


Figura 11.3. 30 comparación entre el sistema con recirculación (airlift) y la columna aislada con un flujo de aire de 1 LPM

Analizando las gráficas desde la figura 11.3.27 hasta la figura 11.3.30 podemos observar que tanto el sistema con recirculación y la columna aislada en un tiempo determinado su comportamiento es similar, llegando un punto donde divergen ambas funciones, posterior a ello vuelven a tener un punto de convergencia, por lo que inferimos primeramente que en el primer lapso de tiempo donde son similares las gráficas, el sensor de OD colocado a mitad de la columna de burbujeo esta únicamente obteniendo los valores de saturación de la columna.

Se intenta dar una posible explicación del comportamiento del líquido basándonos en la comparación de las gráficas, esta posible explicación es la siguiente.

En primera instancia todo el líquido está libre de oxígeno como se muestra en la figura 11.3.31

Después es inyectado el gas y comienza a saturar la columna de O₂ subiendo el nivel en la columna de burbujeo, lo que provoca que una pequeña cantidad de líquido sea enviada a la sección descendente, esta pequeña cantidad de líquido es aún libre de oxígeno debido a que no ha tenido contacto con el gas inyectado como se muestra en la figura 11.3.32

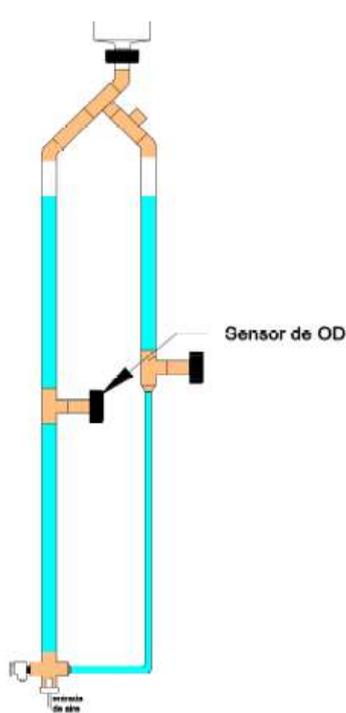


Figura 11.3. 31 Esquema del reactor airlift sin inyección de aire, se ha eliminado del esquema la espiral, debido que solo es para ejemplificar el comportamiento del líquido en determinada longitud de tubería,

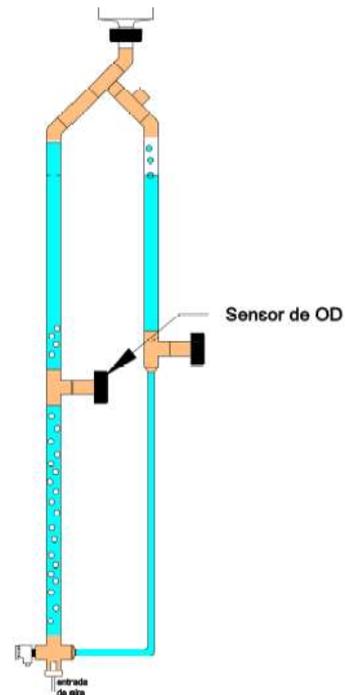


Figura 11.3. 32 Esquema del FBR una vez iniciando la operación

Gracias a la disminución de la densidad resultante de la mezcla líquido-gas y al volumen de fluido desplazado a la parte descendente, el líquido comienza a circular.

Sin embargo, concentrándonos en la primer parte diferencial del volumen que ha entrado al reactor por la parte de la hélice, este volumen tardara un determinado tiempo en llegar hasta donde será contemplado por el sensor, en el transcurso de este tiempo, se mezclara con el líquido en la columna que ya cuenta con una concentración determinada de oxígeno que previamente ya ha sido registrada por el sensor, esta concentración que ya ha sido registrada corresponde únicamente a la K_{La} de la columna siendo de este modo la primer pendiente que se puede observar en las gráficas desde la 11.3.27 hasta la 11.3.30 que como lo hemos mencionado anteriormente, se ven prácticamente iguales hasta el punto de divergencia de las funciones.

La disminución de la pendiente puede deberse a la mezcla entre el líquido presente en la columna con cierta concentración de oxígeno y el líquido procedente de la hélice, que tiene una concentración 0 de O_2 y que se está saturando tanto con la corriente de aire que está ingresando al reactor y con el oxígeno ya disuelto en líquido que se encontraba en la columna previamente, por lo que el líquido no puede llegar a una saturación del 100 %

Con respecto a la parte descendente al estar la columna cada vez más saturada de oxígeno enviara una cierta cantidad de volumen cada vez más saturada a la parte descendente, por lo que, en esta parte, considerando un flujo pistón tendremos que la concentración de oxígeno en la espiral cambiara en función de la longitud de la espiral.

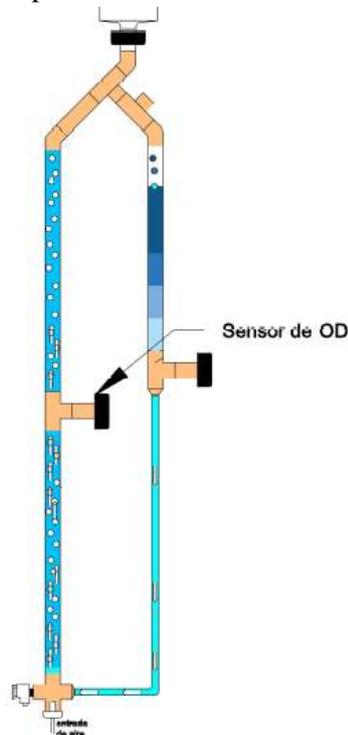


Figura 11.3. 33Esquemización de la variación de concentraciones en la parte descendente en función de la longitud.

La última sección de la gráfica, donde vuelve a haber un crecimiento significativo en la saturación del líquido, ocurre una vez que todo el líquido libre de oxígeno de la espiral es expulsado hacia la columna de burbujeo, entonces en la espiral solo tendremos líquido con diferentes concentraciones de oxígeno disuelto que variaran según la longitud donde se encuentren.

Al ingresar este líquido poco saturado, se podrá saturar aún más, lo que permitirá llegar a una saturación por encima del 100%.

Haciendo una comparación entre las gráficas 11.3.27 hasta 11.3.30 podemos notar que a un mayor flujo de aire que se traduce en una mayor velocidad del líquido, el efecto que planteamos es más notorio, en la figura 11.3.30 podemos observar que la concentración de oxígeno disuelto incluso bajó, respecto a la concentración ya registrada y llegó de nuevo al punto de convergencia más pronto, esto puede deberse a que hubo mayor flujo de líquido no saturado hacia la columna de burbujeo, diluyendo el oxígeno disuelto que ya se encontraba la columna, por lo que la concentración que ya se tenía registrada, disminuyó.

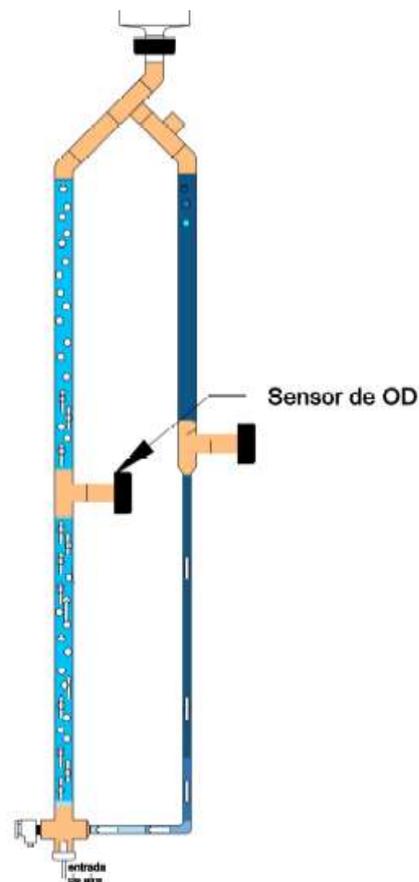


Figura 11.3. 34Ejemplificación de la diferencia de concentraciones según la longitud en la espiral cuando el líquido libre de oxígeno ha sido desplazado por completo.

11.4 Medición de pH del fotobiorreactor inoculado con microalgas (prueba de concepto)

El fotobiorreactor se llenó con un consorcio alcalófilo de microalgas activas pasando desde un pH de 9.8 hasta 10.2 en 21.5 horas a continuación se muestra el registro de pH en el tiempo mencionado con anterioridad.

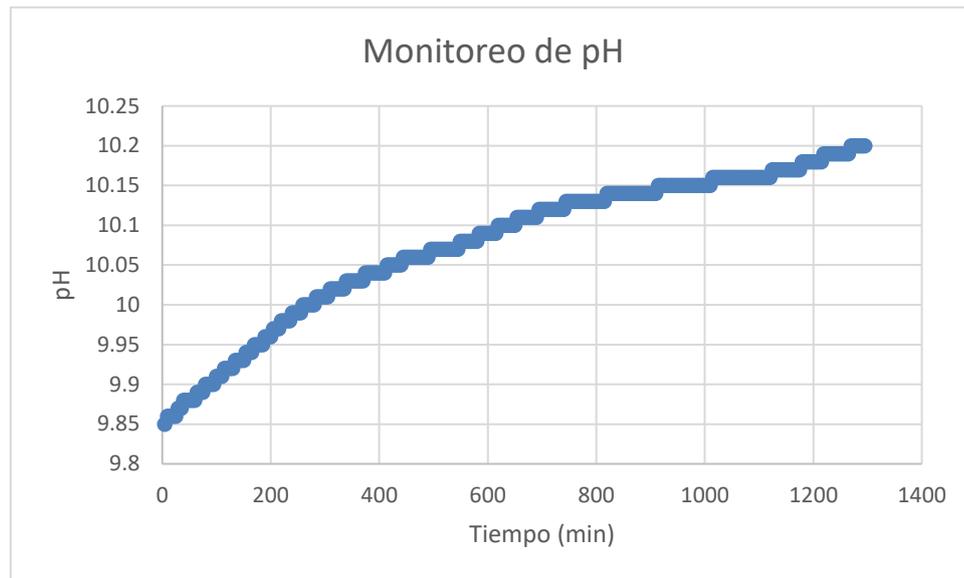


Figura 11.4.1.- Monitoreo de pH durante 21.5 horas dentro del fotobiorreactor airlift.

Como se muestra en esta grafica el pH aumento lo que significa que los microorganismos están consumiendo carbono promoviendo la concentración de iones OH lo que a simple vista podría significar una alta actividad biológica producto de buenas condiciones de cultivo. (Ramirez, et al., 2020)

12 CONCLUSIONES

- Con base en los resultados obtenidos se comprobó que la velocidad del líquido es proporcional al flujo de gas.
- La velocidad del fotobiorreactor presentado en este trabajo no cumplió con un régimen turbulento, en comparación con el fotobiorreactor caracterizado por (De los Cobos, et al., 2015), aunque la velocidad es superior al mismo, esto puede ser debido a la geometría del reactor, a la alta pérdida de carga en la espiral del reactor.
- Basándonos en crecimiento de pH podemos decir que el fotobiorreactor sirve para el cultivo de microalgas.

- El fotobiorreactor ha cumplido con la función de proveer las condiciones de mezclado para el crecimiento de los microorganismos
- La retención de gas que es un parámetro importante en la caracterización de columnas de burbujeo como de reactores de tipo airlift, según los resultados obtenidos es proporcional al flujo de aire con el que se trabaja, concordando con Ishibashi y Behksih (Majumder, 2019) quienes afirman que la retención de gas es casi linealmente proporcional a la velocidad del gas.
- El aumento de altura de la columna de burbujeo puede aumentar la velocidad del líquido.
- Al comparar los coeficientes volumétricos de transferencia de masa K_{La} notamos una diferencia entre el sistema completo y la columna aislada, esto es, debido a la interacción del líquido contenido en la espiral, que en primera instancia no se mezcla con el líquido que permanece en la columna de burbujeo, por lo que el valor que se debería tomar en cuenta es el de la columna aislada, ya que por concepto, el K_{La} es propiamente de la transferencia de entre fases l-g y únicamente existe esta interacción dentro de la columna.

13 REFERENCIAS

- K. Pachauri, R. y otros, 2015. *Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo*, Ginebra, Suiza: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- Alam, A. & Wong, Z., 2019. *Microalgae biotechnology for development of biofuel and wastewater treatment*. s.l.:Springer.
- Amos, R. & Qiang, H., 2013. Environmental Effects on Cell Composition. En: *Handbook of Microalgal Culture, Applied Phycology and Biotechnology*. s.l.:WILEY Blackwell, p. 130.
- Andersen, R. A., 2004. The Microalgal Cell with Reference to Mass Cultures. En: *Handbook of microalgal culture, applied phycology and biotechnology*. s.l.:John Wiley & Sons, pp. 3-21.
- Angeles, V., 2016. *Evaluación de la actividad fotosintética de un consorcio de microalgas en presencia de amoníaco en un fotobiorreactor tubular cerrado bajo condiciones alcalinas.* Mexico: s.n.
- Anon., 2010. *Good plant desing and operation for onshore carbon* , London: Energy institute London.
- Arellano, L. y otros, 2017. Tecnologías de purificación de Biogas. En: *Purificación y usos del Biogas*. Barcelona: Universidad de Barcelona, pp. 39-85.
- Attalla, I. M., 2012. *Recent advances in post-combustion CO2 capture chemistry*. washinton D.C.: American Chemical Society.
- Baird, C. & Cann, M., 2018. Uso de la energía, combustibles fósiles, emisiones de CO2 y cambio climático global. En: *Química Ambiental*. s.l.:Reverte, pp. 223-267.
- Bebrents, P., 2005. Photobioreactors and Fermentors: The Light and Dark Sides of Growing Algae. En: *Algal Culturing Techniques*. USA: ELSEVIER, pp. 189-205.
- Beil, M. & Beyrich, W., 2003. Biogas upgrading to biomethane. En: *The Biogas Handbook*. s.l.:Woodhead Publishing, pp. 342-375.
- Bohutskyi, P. & Bower, E., 2013. Biogas Production from algae and Cyanobacteria Through Anaerobic Digestion: A review, analysis, and research needs. *Springer science*, pp. 873-976.
- Camacho, H. & Alvarado, P., 1994. Caracterización de una columna de burbujeo. *Ingeniería, Revista de la universidad de Costa Rica, Vol4*, pp. 21-27.
- Campbell, N. & Jane, R., 2007. Fotosíntesis. En: *Biología*. España: Panamericana Medica, pp. 183-199.
- Carazo, L., Fernández, R., González, F. & Rodríguez, J., 2013. Contaminación del aire interior y su impacto en la patología respiratoria. *Archivos de Bronconeumología*, pp. 22-27.
- Çengel, Y. A. a. M. A. B., 2012. state and equilibrium. En: *Termodinámica*. s.l.:MCGRAW-HILL, pp. 14-15.
- Chang, R., 2002. Equilibrio químico. En: *Química*. s.l.:MCGRAW-HILL, pp. 562-565.

- Chang, R., 2002. Propiedades Físicas de las disoluciones. En: *Química*. s.l.:MCGRAWHILL, pp. 475-479.
- Contreras, C., Peña, J., Flores, L. & Cañizares, R., 2003. Avances en el diseño conceptual de fotobiorreactores para el cultivo de microalgas. *Interciencia*, pp. 450-456.
- Curtis, H. & Barnees, S., 2006. Biología. En: España: Panamericana Medica.
- Dag, E., 2014. Chemistry in Acids Gas Treating. En: *Gas Treating, Absorption Theory and Practice*. s.l.:Wiley, pp. 55-74.
- De los Cobos, D., Garcia, E., Morgado, F. & Armando, G., 2015. *Short-term evaluation of the photosynthetic activity of an alkaliphilic microalgae consortium in a novel tubular closed photobioreactor*. Mexico: springer.
- Doran, P. M., 2013. Reactor Engineering. En: *Bioprocess Engineering Principles*. Oxford: Elsevier, pp. 767-771.
- Echeverri, C., 2006. Diseño óptimo de ciclones. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, pp. 123-139.
- Echeverri, C., 2008. Diseño de filtros de talegas. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, pp. 43-60.
- FAO, 2011. *Manual del biogas*. Santiago: FAO.
- Gamboa Montejó, C. & Gutiérrez Sánchez, M., 2019. *CAMBIO CLIMÁTICO: PRINCIPALES ACCIONES DE ADAPTACIÓN Y MITIGACIÓN EN MÉXICO*, Mexico: camara de diputados,.
- García, E., 2015. *Evaluación del crecimiento de consorcios de microalgas alcalófilas en fotobiorreactores con potencial de aplicación en el enriquecimiento de biogas*. Mexico: s.n.
- Geankoplis, C. J., 1998. Procesos de separación gas-líquido por etapas y continuos. En: *Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias*. Minesota : s.n., pp. 679-698.
- Gomez, L. & Liliana, M., 2007. Microalgas : Aspectos ecológicos y biotecnológicos. *Revista Cubana de Química*, pp. 3-20.
- González, C., Ación, F., Fenández, J. & Molina, E., 2011. Uso de microalgas como alternativa a las tecnologías disponibles de mitigación de emisiones antropogénicas de CO₂. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal*, pp. 93-106.
- Grobbelaar, J., 2013. Inorganic Algal Nutrition. En: *Handbook of Microalgal Culture*. s.l.:WILEY Blackwell, pp. 123-134.
- Guardino, X., 1998. Calidad del aire interior. *Enciclopedia de Salud y Seguridad en el Trabajo*, pp. 44.2-44.28.
- Guerra Abud, J. J. y otros, 2013. *Estrategia Nacional de Cambio Climático.*, Mexico: SEMARNAT.
- Guerra Abud, J. J. y otros, 2013. *ENCC 2013. Estrategia nacional de cambio climático. Vision 10-20-40 Gobierno de la Republica*, Mexico: s.n.
- Hernández Pérez, A. & I.Labbé, J., 2014. Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de Biología Marina y Oceanografía.*

Hernandez, A. & José, I., 2014. Microalgas, cultivo y beneficios. *Revista de biología Marina y Oceanografía*, pp. 157-173.

IGME, 2002. Química del ácido carbónico del agua. En: *Isótopos ambientales en el ciclo hidrológico: principios y aplicaciones*. s.l.: Instituto Geológico y Minero de España, pp. 101-111.

International Energy Agency, 2008. CO₂ Capture Technologies. En: *CO₂ Capture and Storage*. Francia: OECD/IEA, pp. 45-51.

Jin, H.-F., Santiago, D., Jongmin, P. & Lee, K., 2008. Enhancement of Nitric Oxide Solubility Using Fe(II)EDTA and Removal by Green Algae *Scenedesmus* Sp.. *Biotechnology and Bioprocess Engineering*, pp. 48-52.

Kazbar, A. y otros, 2019. Effect of dissolved oxygen concentration on microalgal culture in photobioreactors. *Algal Research*.

Kennes, C., Abubackar, H. & Veiga, M., 2013. Biodegradation and Bioconversion of Volatile Pollutants. En: *Air Pollution Prevention and Control*. España: WILEY, pp. 19-25.

Kennes, C. & Veiga, M., 2013. Innovative Bioreactors and Two-Stage Systems. En: *Air Pollution Prevention and Control*. 227-228: John Wiley & Sons.

Lee, J., 2013. *Advanced Biofuels and Bioproducts*. Nueva York: Springer.

Madigan, M. y otros, 2008. Diversidad metabólica de los microorganismos. En: *Brock, Biología de los microorganismos*. España: Pearson, pp. 404-414.

Majumder, S., 2019. Gas Hold-up Characteristics. En: *Hydrodynamics and Mass Transfer in downflow slurry bubble columns*. s.l.: Apple Academic Press, Inc, pp. 64-78.

Maroto, P., 2016. El papel de los materiales de construcción en la calidad. En: *Guía de la calidad del aire interior*. Madrid: Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad, pp. 33-35.

McCabe, W. L., Smith, J. C. & Harriot, P., 2007. Absorción de Gases. En: *Operaciones Unitarias en Ingeniería química*. s.l.: McGRAW-HILL, pp. 593-604.

Mohd, A. & Shuaib, M., 2017. Amine-Blends screening and characterization for CO₂ post-combustion capture. En: *Energy Efficient Solvents for CO₂ capture by Gas-Liquid Absorption, Compounds, Blends and Advanced Solvent System*. s.l.: Springer, pp. 177-197.

Molina, M., Sarukhán, J. & Cabras, J., 2017. *El cambio climático: Causas, efectos y consecuencias*. México: fondo de cultura económica.

Morawska, L. & Cao, J., 2020. logrando que la gota original que bien podría haberse depositado en una superficie, se haga tan pequeña que el transporte por aire la afecte más que la gravedad, permitiendo que esta pequeña partícula contenedora del virus viaje libremente por el aire. *Environment International*, Volumen 139, pp. 1-3.

Nagase, H. y otros, 1997. Characteristics of Biological NO_x Removal from Flue Gas in a *Dunaliella tertiolecta* Culture System. *JOURNAL OF FERMENTATION AND BIOENGINEERING*, pp. 461-465.

Nelson, D. & Cox, M., 2009. En: *Principios de Bioquímica*. Nueva York: Omega, S.A., pp. 742-760.

Observatorio Mauna Loa, 2020. *Global Monitoring Laboratory*. [En línea] Available at: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/obop/mlo/>

- Olgúin, E., 2003. *Phycoremediation: key issues for cost effective nutrient removal processes*. s.l.:s.n.
- OMS, 2018. [En línea] Available at: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/household-air-pollution-and-health>
- Paul J. Harrison, J. A. B., 2005. Marine Culture Media. En: *Algal Culturing Techniques*. s.l.:Elsevier, pp. 21-32.
- Perez, E. & Urria, 2009. Fotosíntesis, Aspectos básicos. *Fisiología Vegetal*, pp. 1-47.
- Perry, R. H., Green, D. W. & O. Maloney, J., 1997. GAS ABSORPTION AND GAS-LIQUID SYSTEM DESIGN. En: *Perry's chemical Engineers' handbook*. s.l.:McGraw-Hill, pp. 14-5.
- Piedra, M. y otros, 2009. Caracterización hidrodinámica de una columna de burbujeo agua aire. *ingeniería mecánica*, pp. 27-36.
- Pulz, O., 2001. Photobioreactors: production systems for phototrophic microorganisms. *Applied Microbiology and Biotechnology*, pp. 287-292.
- Qin, L., Alam, A. & Wang, Z., 2019. Open Pond Culture Systems and Potobioreactors for Microalgal Biofuel Production. En: *Microalgae Biotechnology for Development of Biofuel and Wastewater Treatment*. s.l.:Springer, pp. 45-75.
- Ramírez Mérida, L. G., Queiroz Zepka, L. & Jacob Lopes, E., 2013. Fotobiorreactor:herramienta para cultivo de Cianobacterias.. *Ciencia y Tecnología*..
- Ramirez R., A., 2018. *Evaluación cinética de un sistema alcalino-microalgal aplicado en el tratamiento de biogas*. CDMX: s.n.
- Ramirez, A., Velasco, A. & Gonzáles, A., 2020. The Effect of Chemical Sulfide Oxidation on the Oxygenic Activity of an Alkaliphilic Microalgae Consortium Deployed for Biogas Upgrading. *sustainability*, pp. 1-13.
- Ramírez, L. G., Queiroz, L. & Lopes, E., 2013. Fotobiorreactor:herramienta para cultivo de Cianobacterias.. *Ciencia y Tecnología*., pp. 9-19.
- Romero, L. & Bolea, I., 2015. Captura de CO2 en procesos post combustión. *Boletín del Grupo Español del Carbon*, pp. 8-12.
- Shaid, A. y otros, 2019. The Culture Technology for Freshwater and Marine Microalgae. En: *Microalgae Biotechnology for Development of Biofuel and Wastewater Treatment*. s.l.:Springer, pp. 21-45.
- Silvestre, E., 2016. *Guía de Calidad del Aire Interior*. Madrid: Dirección General de Industria, Energía y Minas de la Comunidad de Madrid.
- Tan, Z., 2014. Air Emissions. En: *Air Pollution and Greenhouse Gases, From Basic Concepts to Engineering Applications for Air Emission Control*. Waterloo, ON, Canada: Springer, pp. 2-3.
- Tan, Z., 2014. Air Emissions. En: *Air pollution and greenhouse gases*. s.l.:Springer, pp. 1-5.
- Tan, Z., 2014. Basics of Gas Combustion. En: *Air Pollution and Greenhouse Gases: From basic concepts to Engineering applications for Air Emission Control*. Waterloo ON, Canada: Springer, pp. 59-61.

Tan, Z., 2014. Post-Combustion Air Emission Control. En: *Air Pollution and Greenhouse Gases*. s.l.:Springer, pp. 298-304.

Tortora, G., Funke, B. & Case, C., 2007. *introduccion a la microbiologia*. s.l.:Medica Panamericana.

Valdés, B. y otros, 2012. Tecnología de Cultivo de Microalgas en Fotobiorreactores. *Revista Científica de la Universidad Autónoma de Coahuila*.

Valecia, M., Cerón, I. & Cardona, C., 2012. Calculo de la solubilidad del dióxido de carbono en sistemas iónicos acuosos. *AVANVES Investigacion en Ingenieria Vol 9*, pp. 82-86.

Vergara, A., Quiroz, E., Aroca, G. & Alarcón, N., 2008. Biological treatment of contaminated air with toluene in an airlift reactor. *Electronic Journal of Biotechnology*, pp. 1-7.

Whitman, W. K. L. a. W. G., 1924. Principles of Gas Absorption. *INDUSTRIAL AND ENGINEERING CHEMISTRY*, pp. 1215-1218.

Wilcox, J., 2012. Absorption. En: *Carbon Capture*. Stanford,CA: Springer, pp. 57-58.

