



EL SABER DE MIS HIJOS
HARÁ MI GRANDEZA

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
Y METALURGIA**

**COEFICIENTE VOLUMÉTRICO DE
TRANSFERENCIA DE MASA DEL DIÓXIDO DE
CARBONO Y OXÍGENO EN RECIPIENTES CON
AIREACIÓN Y AGITACIÓN SIMULTÁNEA**

Tesis

Que para obtener el título de:

INGENIERO QUÍMICO

Presenta

Juan Carlos Islas Laurean

Hermosillo, Sonora

Abril de 2017

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess



EL SABER DE MIS HIJOS
HARÁ MI GRANDEZA

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
Y METALURGIA**

**COEFICIENTE VOLUMÉTRICO DE
TRANSFERENCIA DE MASA DEL DIÓXIDO DE
CARBONO Y OXÍGENO EN RECIPIENTES CON
AIREACIÓN Y AGITACIÓN SIMULTÁNEA**

Tesis

Que para obtener el título de:

INGENIERO QUÍMICO

Presenta

Juan Carlos Islas Laurean

Hermosillo, Sonora

Abril de 2017

UNIVERSIDAD DE SONORA

VOTOS APROBATORIOS

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA

DIVISION DE INGENIERIA

Por medio de la presente, nos permitimos informar que se ha revisado detalladamente y se han hecho correcciones necesarias al trabajo de tesis de la carrera de Ingeniería Química que lleva por título “**COEFICIENTE VOLUMETRICO DE TRANSFERENCIA DE MASA DEL CO₂ Y O₂ EN RECIPIENTES CON AIREACIÓN Y AGITACIÓN SIMULTANEA**”, el cual fue realizado por:

JUAN CARLOS ISLAS LAUREAN

En base a lo anterior acordamos dar nuestra aprobación para la impresión de dicho trabajo.

ATENTAMENTE

JURADO

Dr. Abraham Rogelio Martín García
Presidente

Dr. José Ronaldo Herrera Urbina
Secretario

Dr. Jesús Fernando Hinojosa Palafox
Vocal

Dr. Manuel Pérez Tello
Suplente

Hermosillo, Sonora

Abril del 2017

Con todo mi cariño
A mis padres y hermanos

AGRADECIMIENTOS

A mis padres por brindarme su apoyo, cariño, comprensión y por todos esos consejos que me dieron, les dedico este logro.

A mis hermanos por estar siempre a mi lado, por su apoyo, comprensión y cariño, gracias.

A la Universidad de Sonora y al Departamento de Ingeniería Química por todos los conocimientos que me brindaron a lo largo de mi carrera.

Agradezco especialmente al Dr. Abraham Rogelio Martín García. Sin su apoyo, paciencia y grandes consejos no hubiera sido posible cumplir esta meta.

A Dios por permitirme lograr esta meta tan importante en mi vida, por la bendición que me ha brindado durante estos años y por estar siempre a mi lado.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Página
ÍNDICE DE CONTENIDO	v
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE TABLAS	ix
Resumen	x
I. Introducción.....	1
II. Objetivos.....	3
II.1. Objetivo general	4
II.1.1. Objetivos particulares	4
III. Solubilidad de CO ₂ y O ₂ en agua	5
III.1. Ley de Henry	6
III.2. Correlaciones de solubilidad de CO ₂ y O ₂ en agua	8
IV. Transferencia de Masa.....	9
IV.1. Difusividad de CO ₂ y O ₂ en agua.....	10
IV.2. Números adimensionales en transferencia de masa	12
IV.3. Coeficiente de transferencia de masa	13
V. Sistema experimental	16
V.1. Equipo e Instrumentos.....	17
V.2. Experimentos de absorción y desorción de CO ₂ y O ₂	22
VI. Análisis de resultados y discusión	24
VI.1. Coeficiente de transferencia de masa volumétrico de CO ₂ durante aireación simultanea.....	25
VI.2. Coeficiente de transferencia de masa volumétrico de CO ₂ durante alimentación de una corriente pura de CO ₂	27
Discusión para determinar el coeficiente volumétrico del CO ₂	29
VI.3. Coeficiente de transferencia de masa volumétrico de O ₂ durante alimentación simultanea de CO ₂ y flujo constante de aire.....	30

VI.4. Coeficiente de transferencia de masa volumétrico de O ₂ durante alimentación de una corriente pura de CO ₂	32
Discusión para determinar el coeficiente volumétrico del O ₂	34
VI.5. Correlación del Coeficiente de transferencia de masa volumétrico de O ₂ y CO ₂ en función del flujo de gases alimentados.	34
VI.6. Correlación del Coeficiente de transferencia de masa volumétrico de O ₂ y CO ₂ en función del flujo de gases alimentados y números adimensionales....	36
CONCLUSIONES.....	40
APÉNDICES	43
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Solubilidades en agua de varios gases a la presión de 5 atm o inferiores. (Schmidt & List, 1962.) [5].....	8
Figura 2. Muestra el tanque en donde se lleva a cabo los experimentos.....	17
Figura 3. Medidores de flujos de los gases aire y CO ₂	18
Figura 4. Medición del flujo de gas suministrado.....	18
Figura 5. Deflector utilizado en el trabajo de investigación.....	19
Figura 6. Distribución de los deflectores y distribución de los agitadores (Rushton).....	19
Figura 7. Agitadores (Rushton).....	20
Figura 8. Transmisor M400 muestra la concentración de CO ₂ en el agua en distintas unidades (se requiere el uso del InPro 5000 sensor de CO ₂).	20
Figura 9. Muestra el sistema totalmente conectado, agitación encendida (sin suministro de gas).....	21
Figura 10. Muestra el sistema totalmente conectado, agitación encendida (con suministro de gas).....	21
Figura 11. Variación del porcentaje de CO ₂ con el tiempo para diferentes flujos de alimentación.	26
Figura 12. Variación del porcentaje de CO ₂ con el tiempo para diferentes flujos de alimentación de puro CO ₂	28
Figura 13. Variación del porcentaje de O ₂ con el tiempo para diferentes flujos de alimentación.	31
Figura 14. Variación del porcentaje de O ₂ con el tiempo para diferentes flujos de alimentación de puro CO ₂	33
Figura 15. Resultados con condiciones de aireación.....	35
Figura 16. Resultados teniendo un flujo de alimentación al recipiente de puro CO ₂	35

Figura 17. Correlaciones para cálculo de kLa para CO_2 y O_2 durante alimentación simultánea de aire y de CO_2 38

Figura 18. Correlaciones para cálculo de kLa para CO_2 y O_2 durante alimentación de una corriente pura de CO_2 39

LISTA DE TABLAS

	Página
Tabla I. Condiciones experimentales con alimentación de aire y CO ₂	25
Tabla II. Valores de k_{La} del CO ₂ durante aireación simultánea.	26
Tabla III. Condiciones experimentales que incluyen solo suministro de CO ₂	27
Tabla IV. Valores de k_{La} del CO ₂ sin aireación simultánea.....	28
Tabla V. Condiciones experimentales para determinar el coeficiente de transferencia de masa volumétrico de O ₂	30
Tabla VI. Valores de k_{La} del O ₂ durante alimentación simultanea de CO ₂ y aireación simultánea.....	31
Tabla VII. Condiciones experimentales teniendo una alimentación pura de CO ₂	32
Tabla VIII. Valores de k_{La} del O ₂ durante alimentación simultanea de CO ₂	33
Tabla IX. Tabla de viscosidades y densidades a diferentes temperaturas	36
Tabla X. Valores adimensionales.....	37

Resumen

El presente trabajo de tesis se basa en un proyecto de investigación Universidad de Sonora-Mexicana de Cobre titulado “Maximización de la Producción de Biomasa” realizado entre Febrero de 2014 y Febrero de 2015. Para maximizar la producción de biomasa, uno de los parámetros a determinar fue la alimentación de gases al biorreactor (CO_2 y O_2). Para determinar este parámetro, fueron realizados una serie de experimentos con distintos arreglos de suministro de gases, los flujos contenían aire y CO_2 a distintas concentraciones. Los datos experimentales de la concentración de CO_2 y O_2 se obtuvieron a diferentes tiempos. También se obtuvieron las propiedades del líquido a distintas condiciones de temperatura, densidad, viscosidad y difusividad, esta última dependiendo del compuesto de interés (pudiese ser CO_2 o del O_2) aplicando la ecuación apropiada también se obtuvieron números adimensionales, para desarrollar correlaciones para la obtención de los coeficientes de transferencia de masa volumétricos en fase líquida. En base a los coeficientes locales de transferencia de masa del CO_2 (bióxido de carbono) y del O_2 (oxígeno), se puede recomendar una concentración de flujos de alimentación para obtener el óptimo crecimiento de los microorganismos para la obtención de minerales.

I. Introducción

I. Introducción

En el crecimiento de microorganismos aerobios quimioautótrofos a gran escala es necesario alimentar oxígeno y CO_2 [1]. Entre este tipo de microorganismos están los microorganismos que presentan actividad biolixivante. Mediante su metabolismo son capaces de liberar elementos de interés de minerales refractarios [2]. En un proyecto de investigación entre la Universidad de Sonora y Mexicana de Cobre titulado “Maximización de la Producción de Biomasa” realizado entre Febrero de 2014 y Febrero de 2015, fue recomendado una alimentación de oxígeno y CO_2 a un fermentador para el crecimiento de estos microorganismos. La alimentación recomendada fue con un flujo de 0.5 volúmenes del fermentador por minuto; con un contenido de gases de 6.25% (v/v) de CO_2 y el resto de aire. Para llegar a esta recomendación fue utilizado un flujo total de gases de 0.5 volúmenes del fermentador por minuto y composiciones de 3.22, 6.25, 9.09 y 11.76% (v/v) de CO_2 . La selección del flujo local fue realizada con base en el coeficiente local de transferencia de masa del O_2 y la selección de la composición del CO_2 en la corriente de alimentación fue realizada con base en la respuesta a la velocidad de crecimiento de los microorganismos. Conviene mencionar, que el coeficiente de transferencia de masa del CO_2 no fue determinado durante la realización del proyecto de investigación, por lo que será obtenido y reportado en el presente estudio.

II. Objetivos

II. Objetivos

II.1. Objetivo general

Determinar el coeficiente volumétrico de transferencia de masa del CO₂ y O₂ en agua y su relación con el flujo total de suministro de gases al sistema.

II.1.1. Objetivos particulares

1. Determinar el valor del coeficiente volumétrico de transferencia de masa del CO₂ en varias condiciones de flujo total de suministro de gases y composiciones de CO₂ en la corriente de gases.
2. Determinar el valor del coeficiente volumétrico de transferencia de masa del O₂ en varias condiciones de flujo total de suministro de gases y composiciones de CO₂ en la corriente de gases.
3. Establecer un modelo para el cálculo del coeficiente volumétrico de transferencia de masa del CO₂ y O₂.

III. Solubilidad de CO₂ y O₂ en agua

III. Solubilidad de CO₂ y O₂ en agua

La solubilidad es la capacidad que tiene un soluto de disolverse en un determinado disolvente, la solubilidad está relacionada con la temperatura y la presión, dependiendo de estas condiciones nos resultara una determinada solubilidad. [3]

La solubilidad tiene distinto comportamiento dependiendo si se trata de un sólido o un gas, en los sólidos al aumentar la temperatura se incrementa la energía del movimiento o energía cinética de las partículas de ambos compuestos del soluto y solvente, se debilitan las fuerzas moleculares y favorece la solubilidad. En el caso de los gases tiene diferente comportamiento al aumentar la temperatura y al debilitar las fuerzas moleculares del gas se liberan las moléculas y escapan del recipiente esto hace que disminuya la solubilidad.

La solubilidad tiene mucha importancia en este trabajo, ya que se relaciona con la transferencia de masa y ella se puede determinar mediante las condiciones de temperatura y presión que tengamos en nuestro sistema experimental.

III.1. Ley de Henry

La Ley de Henry nos dice “A una temperatura constante, la cantidad de gas disuelta en un líquido es directamente proporcional a la presión parcial que ejerce ese gas sobre el líquido” [4].

En este trabajo durante la experimentación con CO₂, la Ley de Henry indica que si tenemos un recipiente con líquido (agua) y en el ambiente CO₂ con presión parcial en equilibrio, vamos a tener una mayor cantidad de CO₂ disuelto en el agua. Se debe de tomar en cuenta que este gas tiene una mayor solubilidad en agua que el O₂.

En el caso de los experimentos del presente estudio, para la medición de la concentración de O_2 , la Ley de Henry nos permite saber que al tener el mismo sistema con presiones parciales en equilibrio, vamos a tener una menor cantidad de O_2 disuelto en el líquido ya que la solubilidad del O_2 es mucho menor que la del CO_2 .

III.2. Correlaciones de solubilidad de CO₂ y O₂ en agua

La solubilidad de CO₂ y O₂ en agua en función de temperatura y presión se calcula mediante valores de la constante de Henry obtenidos a varias temperaturas; en particular la Figura 1 muestra las constantes de Henry de estos gases de 0 a 80°C, validas hasta presiones de 5 atm.

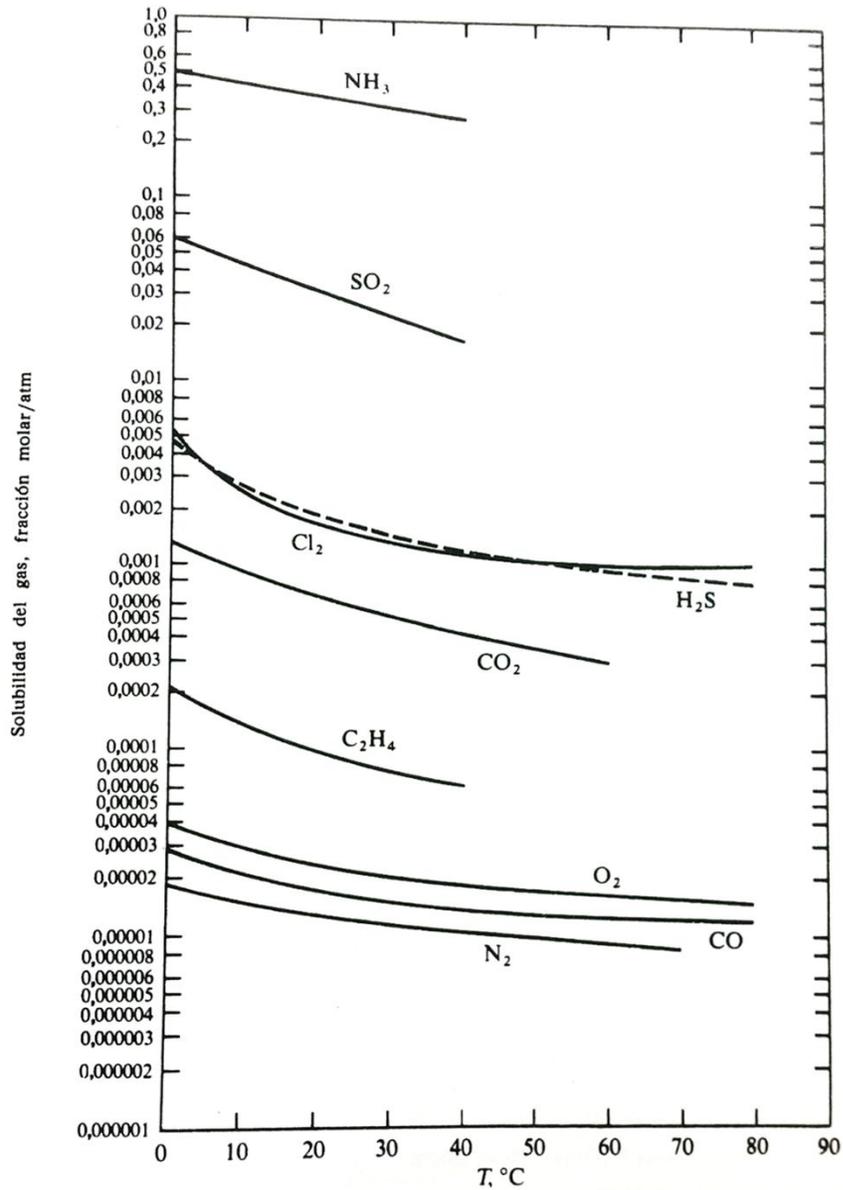


Figura 1. Solubilidades en agua de varios gases a la presión de 5 atm o inferiores. (Schmidt & List, 1962.) [5].

IV. Transferencia de Masa

IV. Transferencia de Masa

IV.1. Difusividad de CO₂ y O₂ en agua

La ley de Fick de la difusión, que describe el movimiento de una especie química A a través de una mezcla binaria de A y B debido a un gradiente de concentración de A.

El movimiento de una especie química desde una región de alta concentración hacia una región de baja concentración puede observarse al dejar caer un pequeño cristal de permanganato de potasio en un vaso de precipitado que contenga agua. El KMnO₄ empieza a disolverse en el agua, y muy cerca del cristal hay una solución concentrada púrpura oscura de KMnO₄. Debido al gradiente de concentración que se establece, el KMnO₄ se difunde lejos del cristal. El avance de la difusión puede seguirse entonces al observar el crecimiento de la región púrpura oscura [6].

Un gradiente de concentración tiende a mover el componente en una dirección tal que iguale las concentraciones y anule el gradiente. Cuando el gradiente se mantiene mediante el suministro continuo de los componentes de baja y alta concentración, el flujo del componente que se difunde es continuo.

La difusión no está restringida a la transferencia molecular a través de capas estacionarias de sólido o fluidos. También tiene lugar en fases fluidas debido a la mezcla física o a los remolinos del flujo turbulento, de la misma forma que el calor puede fluir en un fluido por convección. Este hecho recibe el nombre de difusión en régimen turbulento [7].

La difusividad másica es una propiedad que tiene el sistema para el desplazamiento molecular de especies químicas y esta depende de la temperatura, presión y de la naturaleza de los componentes. Esto es un mecanismo de transferencia de masa [8].

Las difusividades se dan mediante una diferencia de concentración de los componentes, y la rapidez con la cual se da depende del gradiente de concentración en un punto y en una dirección dada. Las ecuaciones utilizadas en este trabajo de investigación para determinar difusividades, se muestran a continuación.

Para estimar la difusividad del CO₂, se utilizó la siguiente ecuación:

$$D_{AB} = \frac{1.17 \times 10^{-13} (\xi_B M_B)^{1/2} T}{V_A^{0.6} \mu} \quad (1)$$

Dónde:

ξ_B = Factor de asociación del solvente, 2.6 para el agua [9].

M_B = Peso molecular del solvente, kg/kgmol.

T = Temperatura absoluta (K).

V_A = Volumen molar del soluto en el punto de ebullición normal, para el CO₂ 0.0223 m³/kgmol.

μ = Viscosidad de la solución, (cP).

Para estimar la difusividad del O₂ en agua, la ecuación empleada es la siguiente:

$$D_{O_2-H_2O} = 7.4 \times 10^{-8} \frac{T(\Psi_{H_2O} M_{H_2O})^{1/2}}{\mu V_{O_2}^{0.6}} \quad (2)$$

Dónde:

T = Temperatura absoluta (K).

Ψ_{H_2O} = Parámetro de "asociación" para el disolvente (agua=2.26 [7]).

M_{H_2O} = Peso molecular del agua (g/mol).

μ = Viscosidad, (cP).

V_{O_2} = Volumen molar de oxígeno = 25.6 cm³/gmol [10].

En este trabajo de investigación, tenemos un sistema consistente en un recipiente con agua y se suministra una cierta cantidad de gases. El sistema cuenta con agitación, tenemos un mayor movimiento de las moléculas que conforman las

sustancias. Mediante la información anteriormente presentada fue calculada la difusividad y se dio mediante la diferencia de concentraciones de las sustancias y el gradiente de difusividad.

IV.2. Números adimensionales en transferencia de masa

Los números adimensionales son de gran importancia para este trabajo de investigación, con ellos se realizó una investigación para desarrollar algunas correlaciones, estas correlaciones están en función de los números adimensionales. Con estas correlaciones se determinaron algunas propiedades de interés.

Los números adimensionales que fueron de interés fueron los siguientes:

-Número de Reynolds (N_{Re})

$$N_{Re} = \frac{\text{Fuerza de inercia}}{\text{Fuerza viscosa}} = \frac{L\bar{u}\rho}{\mu} \quad (3)$$

Dónde:

L = Diámetro de la tubería a través de la cual circula el fluido o longitud característica del sistema, m,

\bar{u} = Velocidad característica del fluido,

ρ = Densidad del fluido, kg/m³,

μ = Viscosidad dinámica del fluido, cP (10⁻³ kg/m*s).

-Número de Schmidt (N_{Sc})

$$N_{Sc} = \frac{\text{Difusividad de impulso}}{\text{Coeficiente de difusión}} = \frac{\mu}{\rho D_{AB}} \quad (4)$$

Dónde:

μ = Viscosidad dinámica del fluido, cP (10⁻³ kg/m*s),

ρ = Densidad del fluido, kg/m³,

D_{AB} = Difusividad másica de la especie, m²/s.

-Número de Sherwood (N_{sh})

$$N_{Sh} = \frac{\text{Transferencia de masa por convección}}{\text{Difusión molecular}} = \frac{k_c L}{D_{AB}}$$

Dónde:

L = Longitud característica (m).

k_c = Coeficiente de transferencia de masa.

Con estos números adimensionales se desarrolló una correlación para determinar el $k_L a$ para el CO_2 y O_2 , a distintas condiciones de suministro de flujos. Más adelante se muestran cada correlación desarrollada.

IV.3. Coeficiente de transferencia de masa

Los coeficientes de transferencia de masa son una cantidad que permite conocer el flux de especie conociendo únicamente la diferencia de concentración o fracciones moles. El coeficiente de transferencia de masa es análogo al coeficiente convectivo de transferencia de calor. De hecho; mediante analogías entre transferencia de masa y calor, el coeficiente de transferencia de masa puede ser calculado utilizando las correlaciones para el coeficiente de transferencia de calor convectiva; solo es remplazado el número de Nusselt de transferencia de calor, por el número de Sherwood de transferencia de Masa, el número de Prandtl por el número de Schmidt [11].

Coeficiente de transferencia de masa local

Los coeficientes locales de transferencia de masa permiten calcular el flux de una especie en función de la concentración de esta especie en la interface del sistema (C_{Ai}, x_{Ai}, y_{Ai}) y de la concentración de esta especie en el seno del fluido en estudio (C_A, x_A, y_A). Los coeficiente de transferencia de masa locales son denotados k_c (coeficiente de transferencia de masa local en términos de concentraciones), k_x

(coeficiente de transferencia de masa local en términos fracciones mol en el líquido) y k_y (coeficiente de transferencia de masa local en términos fracciones mol en el gas). El cálculo de los fluxes es realizado mediante el uso de las siguientes ecuaciones:

$$N_A = k_c(C_{Ai} - C_A) \text{ ó } N_A = k_c(C_A - C_{Ai}) \quad (5)$$

$$N_A = k_x(x_{Ai} - x_A) \quad (6)$$

$$N_A = k_y(y_A - y_{Ai}) \quad (7)$$

Coeficiente de transferencia de masa global

Los coeficientes globales de transferencia de masa permiten calcular el flux de una especie en función de la concentración de esta especie en el seno del fluido (C_A, x_A, y_A) y en función de la concentración en equilibrio de la sustancia en esa fase, de acuerdo a su composición con la fase en contacto (C_A^*, x_A^*, y_A^*). Los coeficiente de transferencia de masa globales son denotados K_c (coeficiente de transferencia de masa global en términos de concentraciones), K_x (coeficiente de transferencia de masa global en términos fracciones mol en el líquido) y K_y (coeficiente de transferencia de masa global en términos fracciones mol en el gas). El cálculo de los fluxes es realizado mediante el uso de las siguientes ecuaciones:

$$N_A = K_c(C_A - C_A^*) \text{ ó } N_A = K_c(C_A^* - C_A) \quad (8)$$

$$N_A = K_x(x_A^* - x_A) \quad (9)$$

$$N_A = K_y(y_A - y_A^*) \quad (10)$$

Aquí C_A es la concentración global de la fase I y C_A^* es la composición de la fase I que estaría en equilibrio con la composición global de la fase II. El valor de x_A^* corresponde a la fracción mol del líquido que estaría en equilibrio con la composición global del gas (y_A). El valor de y_A^* corresponde a la fracción mol del gas que estaría en equilibrio con la composición global del líquido (x_A).

Coeficiente de transferencia de masa volumétrico

En el diseño de fermentadores y tanques con burbujeo de gases, la cantidad de gases intercambiadas en el sistema se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$N_A = k_L \cdot a \cdot (C^* - C_L) \quad (11)$$

Dónde:

N_A = Flux de Transferencia de masa (mMO₂/Lh).

K_L = Coeficiente de transferencia (m/h).

a = Superficie de intercambio por unidad de volumen (m⁻¹).

k_{LA} = Coeficiente volumétrico de transferencia de O₂ (h⁻¹).

C^* = Valor de saturación para la concentración O₂ (Igual a la solubilidad de O₂ en fase líquida) (mM/L).

C_L = Concentración de O₂ en fase líquida (mM/L).

[12].

V. Sistema experimental

V. Sistema experimental

El sistema experimental utilizado fue un recipiente con aireación y agitación simultánea, que contenía 12 litros de agua (Agua potable de la Ciudad de Hermosillo, Sonora) y se suministraba un flujo de gases con diferentes flujos y proporciones de una mezcla aire-CO₂ (el aire es de la ciudad de Hermosillo, Sonora y se utilizó un compresor para el aire, mientras que el CO₂ provenía de un cilindro de gas). A continuación se explican los componentes del sistema experimental utilizado durante el periodo de experimentación.

V.1. Equipo e Instrumentos

Los equipos e instrumentos utilizados fueron los siguientes:

Recipiente: El tanque utilizado se muestra en la Figura 2, cuyas dimensiones son: altura 45 cm y diámetro 21.5 cm. La altura del líquido en el interior fue de 35.8 cm. Se utilizaron 12 litros de agua y distintos flujos de aire y CO₂ en diferentes proporciones, dependiendo del caso de estudio.



Figura 2. Muestra el tanque en donde se lleva a cabo los experimentos.

Medidores: En la Figura 3 tenemos los medidores que nos indican el flujo de aire y de CO₂ con el que estamos alimentando al recipiente.

Flujostato digital con visualización de 2 colores, serie PFM7, Fluidos Aire, N₂, Ar y CO₂. Rango de caudal: 10, 25, 50, 100 L/min. Unidad de ajuste mínimo: 0.01 L/min. Tiempo de respuesta: Se puede seleccionar entre 50 mseg., 0.5 seg., 1 seg. o 2 seg. [13].



Figura 3. Medidores de flujos de los gases aire y CO₂.



Figura 4. Medición del flujo de gas suministrado.

Deflectores: Son unos instrumentos que se colocan en la orilla del recipiente para que tenga una mejor agitación y el gas tenga un mayor tiempo de residencia, en este caso se utilizaron cuatro deflectores. Las dimensiones del deflector son: largo 46.2 cm y ancho 2.2 cm.



Figura 5. Deflector utilizado en el trabajo de investigación.



Figura 6. Distribución de los deflectores y distribución de los agitadores (Rushton).

Impulsores (Turbina Rushton): Se utilizaron cuatro de estos impulsores separados 10 cm entre cada uno, con ellos se logra la agitación del líquido. El impulsor cuenta con una longitud característica de 6.9 cm.

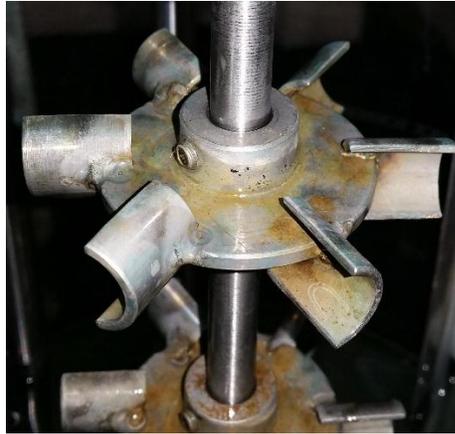


Figura 7. Agitadores (Rushton).

Transmisor M400: Es un aparato digital que nos muestra los valores de la concentración de los gases CO_2 y O_2 en diferentes unidades contenidos en el recipiente. (Se requiere el uso de los sensores).



Figura 8. Transmisor M400 muestra la concentración de CO_2 en el agua en distintas unidades (se requiere el uso del InPro 5000 sensor de CO_2).

InPro 5000 sensor de CO_2 : Es un instrumento con el cual se utiliza para medir la concentración de CO_2 contenida en un recipiente.

InPro 6800 sensor de O_2 : Es un instrumento con el cual se utiliza para medir la concentración de O_2 contenida en un recipiente.

En esta sección se muestran algunas imágenes ilustrativas de los equipos utilizados durante la experimentación, siempre fue el mismo tipo de sistema para todos los experimentos de CO₂ incluso los experimentos para determinar el O₂.



Figura 9. Muestra el sistema totalmente conectado, agitación encendida (sin suministro de gas).



Figura 10. Muestra el sistema totalmente conectado, agitación encendida (con suministro de gas).

V.2. Experimentos de absorción y desorción de CO₂ y O₂

Se realizaron experimentos a diferentes condiciones las cuales incluyen temperatura, flujos de gases (aire-CO₂) a distintas concentraciones. Los experimentos fueron realizados con el suministro de gas siguiente: CO₂, CO₂-Aire. Utilizando un solo tipo de impulsores (Turbina Rushton), se utilizaron 4 impulsores de este tipo distribuidos a 10cm de distancia entre cada uno, en un recipiente de 12 litros de agua a una velocidad de agitación constante de 334 RPM. Los datos se fueron capturando manualmente cada minuto. Los experimentos realizados fueron:

1. Determinación del coeficiente de transferencia de masa volumétrico de CO₂ durante la alimentación simultanea de aire. En la realización de este experimento fue utilizada una aireación de 6 L/min, medidos a condiciones estándar, mezclada con una corriente de CO₂ medidos a condiciones estándar. Los valores de flujo de CO₂ utilizados fueron 0.2 L/min, 0.4 L/min, 0.6 L/min y 0.8 L/min. Antes de iniciar este experimento se suministró durante un tiempo un flujo de aire para eliminar la mayor parte del CO₂ contenido en el recipiente.

2. Determinación del coeficiente de transferencia de masa volumétrico de CO₂. En la realización de este experimento fue utilizada una alimentación de CO₂ medidos a condiciones estándar. Los valores de flujo de CO₂ utilizados fueron 0.2 L/min, 0.4 L/min, 0.6 L/min y 0.8 L/min. De la misma forma que el experimento anterior se elimina todo o la mayor parte del CO₂ contenido en el agua del recipiente para poderle suministrar los distintos flujos de CO₂.

3. Determinación del coeficiente de transferencia de masa volumétrico de O₂ durante alimentación simultanea de una corriente de CO₂. En la realización de este experimento fue utilizada una aireación de 6 L/min, medidos a condiciones estándar, mezclada con una corriente de CO₂ medidos a condiciones estándar. Los valores de flujo de CO₂ utilizados fueron 0.2 L/min, 0.4 L/min, 0.6 L/min y 0.8

L/min. Antes de iniciar la experimentación, fue eliminado el oxígeno presente en el agua utilizando un flujo de CO₂ puro, después se inició el experimento con una alimentación de 6L/min de Aire y a los distintos flujos de CO₂.

4. Determinación del coeficiente de transferencia de masa volumétrico de O₂. En la realización de este experimento fue utilizada una alimentación de CO₂ medidos a condiciones estándar. Los valores flujo de CO₂ utilizados fueron 0.2 L/min, 0.4 L/min, 0.6 L/min y 0.8 L/min. Antes de iniciar la experimentación, el sistema fue saturado con aire, después se inició el experimento a los distintos flujos de CO₂.

Procedimiento para obtener el coeficiente de transferencia de masa para el CO₂ y para el O₂.

Durante la experimentación fueron capturadas las concentraciones cada minuto para el caso del coeficiente de transferencia volumétrico del CO₂ y cada 30 segundos para el caso del coeficiente de transferencia volumétrico del O₂. Con todos estos datos de experimentación obtenidos se mide el coeficiente volumétrico de transferencia de masa mediante una gráfica utilizando la función $\ln(1-\%C/100)$ contra el tiempo (esta función se determina mediante el desarrollo y una integración indefinida de la Ec.(11) coeficiente de transferencia de masa volumétrico), de esta manera se determina la ecuación de la recta de cada gráfica y mediante la pendiente se establece el coeficiente volumétrico de transferencia de masa para el CO₂ y para el O₂. Con los resultados obtenidos del procedimiento anterior se efectúa el correspondiente análisis de datos. Más adelante se puede observar los resultados obtenidos en forma de tablas y graficas los cuales muestran los resultados de cada tipo de experimento y flujos suministrados.

VI. Análisis de resultados y discusión

VI. Análisis de resultados y discusión

VI.1. Coeficiente de transferencia de masa volumétrico de CO₂ durante aireación simultanea

Las condiciones experimentales utilizadas en esta parte de la experimentación son mostradas en la Tabla I.

Tabla I. Condiciones experimentales con alimentación de aire y CO₂.

Aire (L/min)	CO ₂ (L/min)	T(°C)	RPM
6	0.2	18.4	334
6	0.4	18.5	334
6	0.6	15.5	334
6	0.8	15.9	334

En la realización de esta serie de experimentos, al inicio fue alimentada una corriente de 6 L/min de aire para eliminar el CO₂ en solución; al iniciar la alimentación simultanea de aire y CO₂ correspondiente fue capturada la información de porcentaje de saturación del agua utilizando el sensor de esta sustancia. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla A9 y en la Figura 11.

Para realizar las gráficas fueron capturados los datos experimentales, los cuales se encuentran en el apéndice como por ejemplo: Tabla A9. Los datos experimentales previamente obtenidos se les aplico " $\ln(1-\%CO_2/100)$ " a cada porcentaje de CO₂ o O₂ según sea el caso, los resultados obtenidos son graficados con respecto al eje "y" y los tiempo correspondientes a las concentraciones al eje "x".

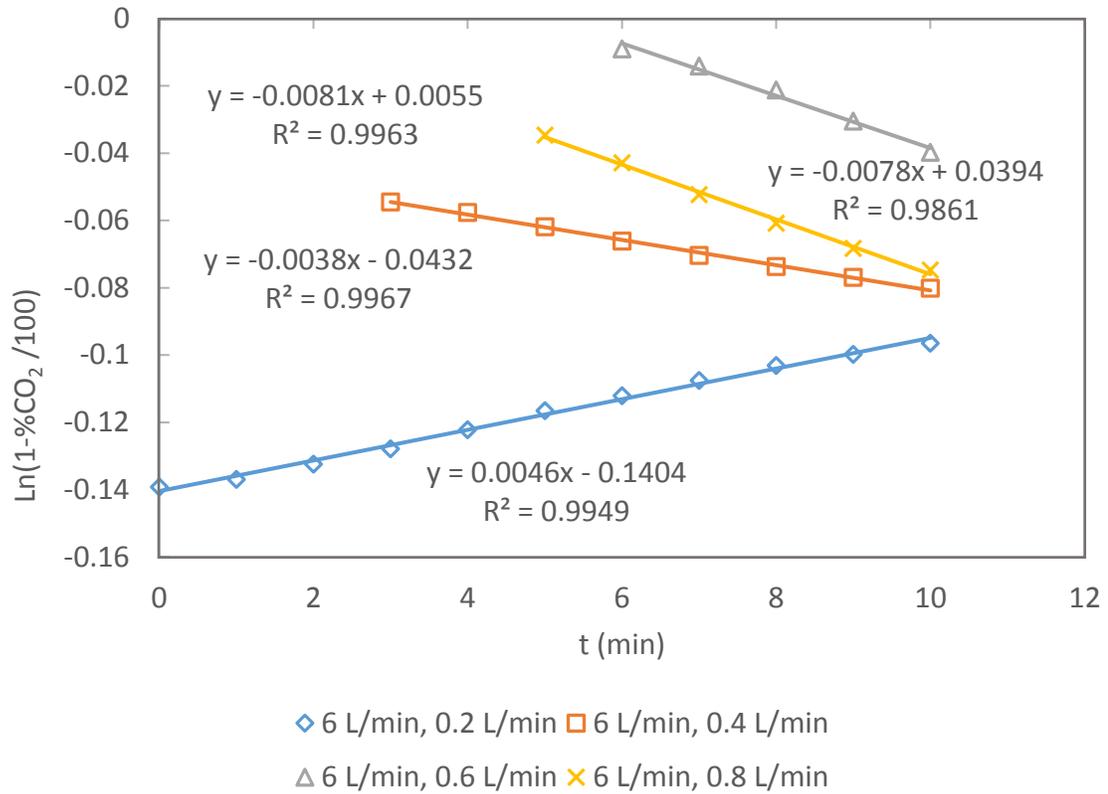


Figura 11. Variación del porcentaje de CO₂ con el tiempo para diferentes flujos de alimentación.

Los valores del coeficiente de transferencia de masa volumétrico se muestran en la Tabla II, los cuales fueron obtenidos con la pendiente de las rectas de la figura 11.

Tabla II. Valores de k_{La} del CO₂ durante aireación simultánea.

Aire (L/min)	CO ₂ (L/min)	k_{La} (min ⁻¹)	T(°C)	RPM
6	0.2	-4.6×10^{-3}	18.4	334
6	0.4	3.8×10^{-3}	18.5	334
6	0.6	7.8×10^{-3}	15.5	334
6	0.8	8.1×10^{-3}	15.9	334

VI.2. Coeficiente de transferencia de masa volumétrico de CO₂ durante alimentación de una corriente pura de CO₂.

Las condiciones experimentales utilizadas en esta parte de la experimentación son mostradas en la Tabla III.

Tabla III. Condiciones experimentales que incluyen solo suministro de CO₂.

CO ₂ (L/min)	T(°C)	RPM
0.2	18.4	334
0.4	18.5	334
0.6	15.5	334
0.8	15.9	334

En la realización de esta serie de experimentos, al inicio fue alimentada una corriente de 6 L/min de aire para eliminar el CO₂ en solución; al iniciar la alimentación de CO₂ correspondiente fue capturada la información de porcentaje de saturación del agua respecto a esta sustancia; utilizando el sensor específico para CO₂. Los datos obtenidos son mostrados en la Tabla A10. El análisis de los datos de la Tabla A10 son mostrados en la Figura 12.

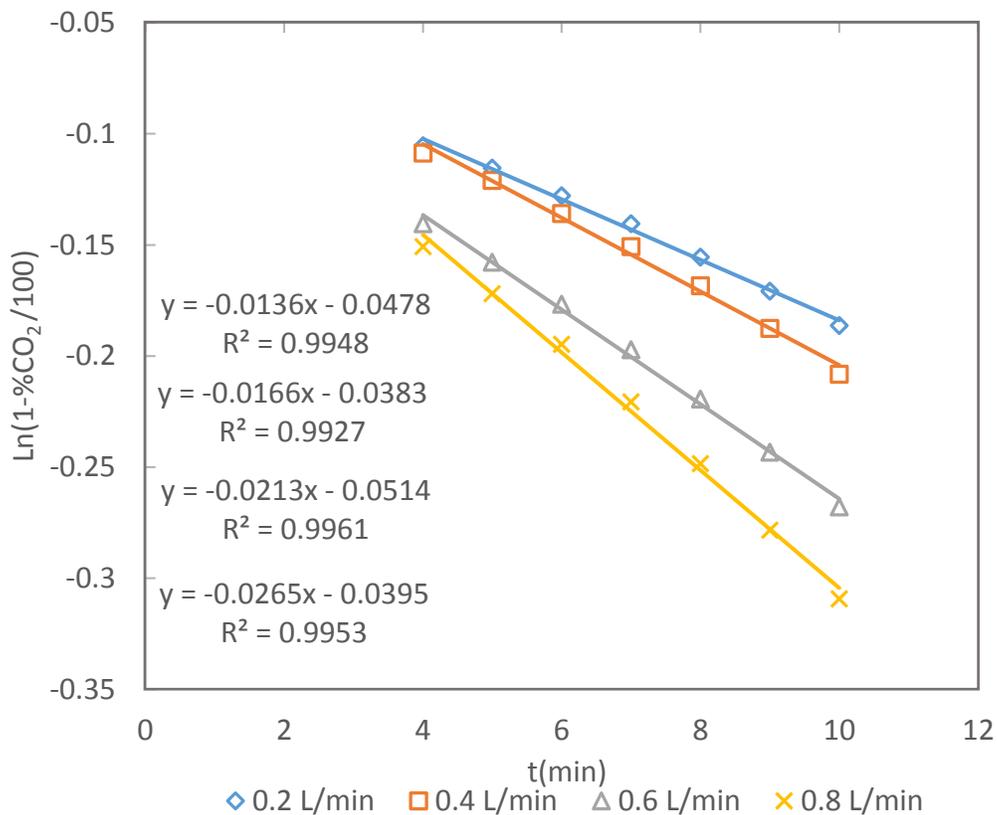


Figura 12. Variación del porcentaje de CO₂ con el tiempo para diferentes flujos de alimentación de puro CO₂.

*Los valores de [y, R²] van en orden al aumentar el flujo 0.2, 0.4, 0.6, 0.8. De esta manera se presentan en las demás gráficas.

Los valores del coeficiente de transferencia de masa volumétrico son mostrados en la siguiente tabla:

Tabla IV. Valores de k_La del CO₂ sin aireación simultánea.

CO ₂ (L/min)	k _L a (min ⁻¹)	T(°C)	RPM
0.2	13.6x10 ⁻³	18.5	334
0.4	16.6x10 ⁻³	18.6	334
0.6	21.3x10 ⁻³	15.7	334
0.8	26.5x10 ⁻³	16.4	334

La Tabla IV nos muestra los resultados de los coeficientes locales de transferencia de masa del CO₂ en agua, con una alimentación de este gas a diferentes concentraciones.

Discusión para determinar el coeficiente volumétrico del CO₂

Los experimentos con un flujo de solo CO₂ en diferentes proporciones que van desde 0.2L/min hasta los 0.8L/min, los resultados obtenidos fueron que en cualquier proporción de flujo siempre se tenía una buena adsorción de CO₂ en el líquido entre mayor era el flujo mayor fue la concentración de CO₂ contenida en el líquido en base al tiempo de suministro. En este caso al no tener una combinación de gases en el caso del CO₂-Aire permite que el CO₂ permanezca más tiempo en el líquido favoreciendo la adsorción y en el caso si hubiese aire este mismo al tener un mayor flujo arrastraría el CO₂ y no permitiría que se adsorbiera de la manera que si estuviera solo el CO₂.

Los experimentos realizados con un suministro de CO₂-Aire en diferentes proporciones, los resultados de estos experimentos se pudo observar que al tener una baja concentración de CO₂ no permitía que se adsorbiera en el agua ya que al ser un flujo muy bajo el aire lo arrastraba a salir más rápido y teníamos una disminución de concentración de CO₂ al pasar el tiempo. Al tener una alimentación intermedia de CO₂-Aire se pudo observar que si teníamos un mejor resultado de adsorción del CO₂ en el agua, el sensor nos empezó a arrojar valores en los cuales se notaba el aumento en la concentración del CO₂ contenido en el líquido al tener dos tipos de flujos intermedios los resultados son un poco diferentes en cuanto a la adsorción obtenida en cada arreglo de flujos. Por último tenemos una alimentación alta de 0.8 L/min CO₂ en este caso efectivamente tenemos una buena adsorción del gas en el líquido pero al ser un flujo alto el gas no permanece mucho tiempo en el líquido y de esta manera no se aprovecha al máximo este flujo por lo cual es un desperdicio de CO₂, en base a los resultados obtenidos se puede observar que es recomendable utilizar los flujos intermedio de CO₂-Aire, ya

que en estos se obtiene una óptima adsorción y con pocos desperdicios de CO₂ como sabemos no es posible tener un 100% de efectividad en cuando al flujo suministrado y a la adsorción obtenida en los experimentos sin embargo son los más eficientes que se pudo obtener.

VI.3. Coeficiente de transferencia de masa volumétrico de O₂ durante alimentación simultanea de CO₂ y flujo constante de aire.

Las condiciones experimentales utilizadas en esta parte de la experimentación son mostradas en la Tabla V.

Tabla V. Condiciones experimentales para determinar el coeficiente de transferencia de masa volumétrico de O₂.

Aire (L/min)	CO ₂ (L/min)	T(°C)	RPM
6	0.2	21.9	334
6	0.4	21.8	334
6	0.6	21.9	334
6	0.8	21.9	334

En la realización de esta serie de experimentos, al inicio fue alimentada una corriente de 6 L/min de aire para eliminar el CO₂ en solución para eliminar el oxígeno disuelto; al iniciar la alimentación de CO₂ correspondiente y el flujo de aire de 6 L/min fue capturada la información de porcentaje de saturación del agua respecto al oxígeno; utilizando el sensor específico para O₂. Los datos obtenidos son mostrados en la Tabla A11. El análisis de los datos de la Tabla A11 son mostrados en la Figura 13.

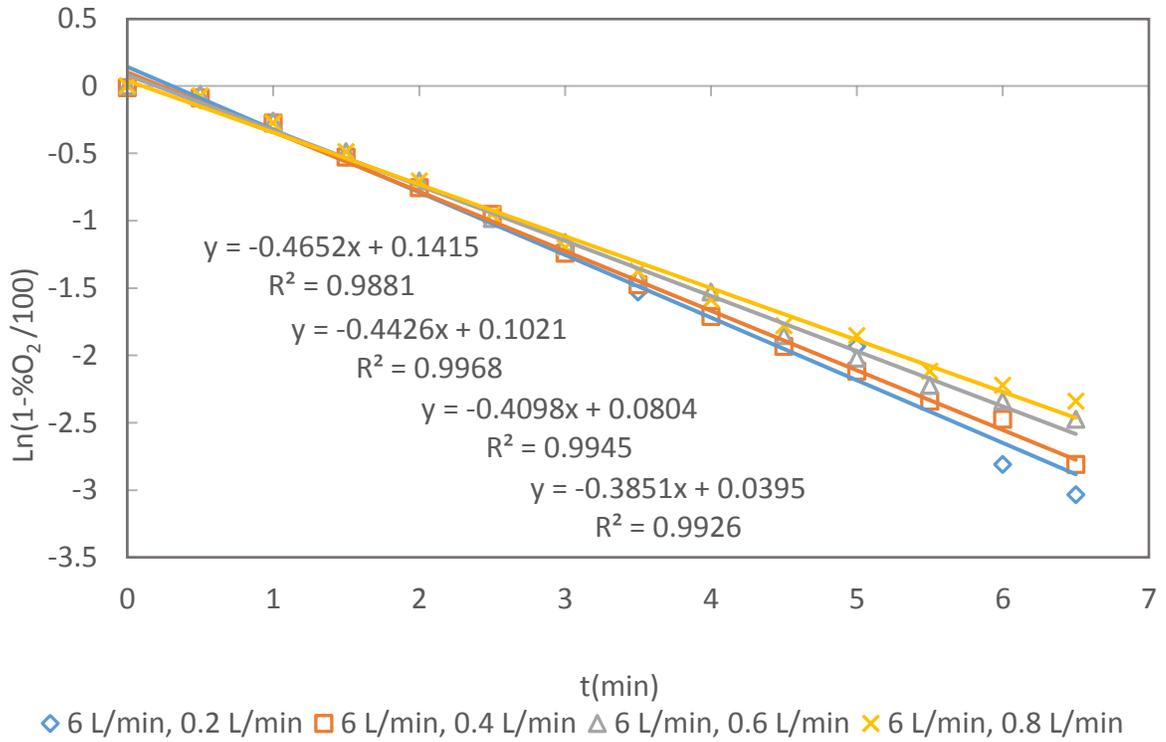


Figura 13. Variación del porcentaje de O₂ con el tiempo para diferentes flujos de alimentación.

Los valores del coeficiente de transferencia de masa volumétrico son mostrados en la siguiente tabla:

Tabla VI. Valores de k_{La} del O₂ durante alimentación simultánea de CO₂ y aireación simultánea.

Aire (L/min)	CO ₂ (L/min)	k_{La} (min ⁻¹)	T(°C)	RPM
6	0.2	46.52×10^{-2}	21.9	334
6	0.4	44.26×10^{-2}	21.8	334
6	0.6	40.98×10^{-2}	21.9	334
6	0.8	38.51×10^{-2}	21.9	334

VI.4. Coeficiente de transferencia de masa volumétrico de O₂ durante alimentación de una corriente pura de CO₂

Las condiciones experimentales utilizadas en esta parte de la experimentación son mostradas en la Tabla VII.

Tabla VII. Condiciones experimentales teniendo una alimentación pura de CO₂.

CO ₂ (L/min)	T(°C)	RPM
0.2	27.1	334
0.4	27.2	334
0.6	27.3	334
0.8	27.4	334

En la realización de esta serie de experimentos, al inicio fue alimentada una corriente de 6 L/min de aire para saturar el agua con oxígeno; al iniciar la alimentación de CO₂ correspondiente fue capturada la información de porcentaje de saturación del agua respecto al oxígeno; utilizando el sensor específico para O₂. Los datos obtenidos son mostrados en la Tabla A12. El análisis de los datos de la Tabla A12 son mostrados en la Figura 14.

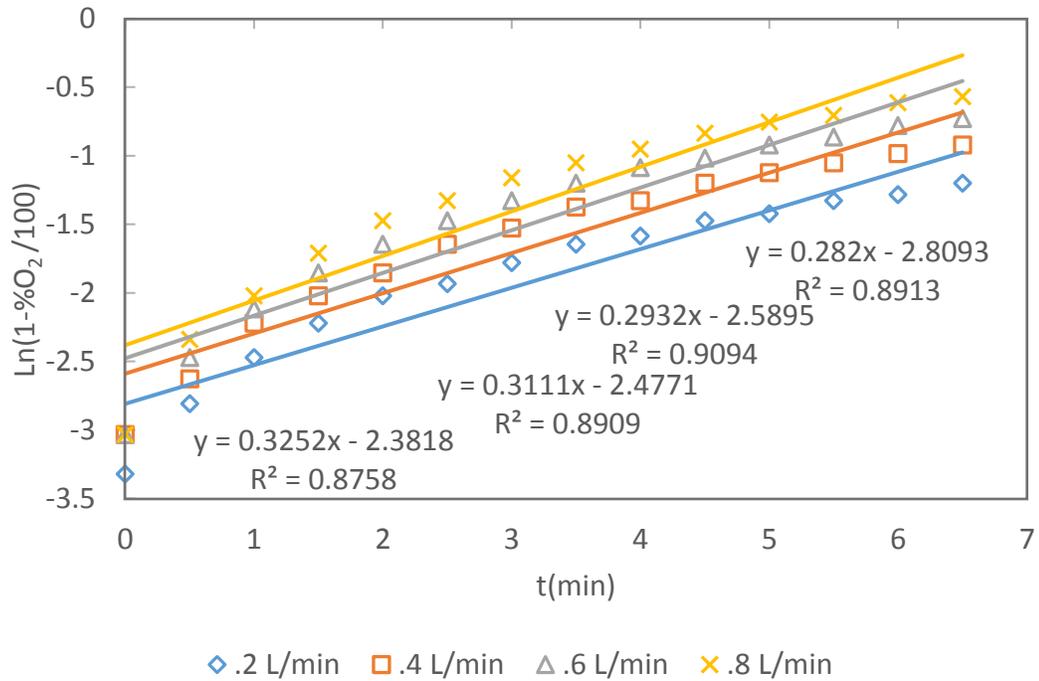


Figura 14. Variación del porcentaje de O₂ con el tiempo para diferentes flujos de alimentación de puro CO₂.

Los valores del coeficiente de transferencia de masa volumétrico son mostrados en la siguiente tabla:

Tabla VIII. Valores de k_{La} del O₂ durante alimentación simultanea de CO₂.

CO ₂ (L/min)	k_{La} (min ⁻¹)	T(°C)	RPM
0.2	-28.20x10 ⁻²	27.1	334
0.4	-29.32x10 ⁻²	27.2	334
0.6	-31.11x10 ⁻²	27.3	334
0.8	-32.52x10 ⁻²	27.4	334

Discusión para determinar el coeficiente volumétrico del O₂

En el primer experimento realizados con un suministro de CO₂-Aire, se inició con una baja concentración de ambos en la concentración de O₂ y en %Aire, los resultados que se obtuvieron en este experimento fueron que al aumentar la concentración de alimentación aumentaba la concentración de los gases contenidos en el líquido y a su vez esta concentración era menor a la anterior en comparación a la cantidad suministrada de gases y al mismo tiempo de residencia.

Al realizar el segundo experimento con un suministro de solo CO₂, en este caso se inició la experimentación teniendo una alta concentración en ambos valores de O₂ y %Aire, los resultados obtenidos fueron que en todos las proporciones de flujo teníamos una desorción de ambas concentraciones y la desorción aumentaba al aumentar el flujo de alimentación al recipiente en base al tiempo de residencia.

VI.5. Correlación del Coeficiente de transferencia de masa volumétrico de O₂ y CO₂ en función del flujo de gases alimentados.

En esta parte se muestran algunas figuras en las cuales se observan los resultados de algunas correlaciones implementadas con respecto al k_{LA} de ambas sustancias de interés en función de los flujos; presentados de la siguiente forma:

- a) Los valores de k_{LA} de ambas sustancias son presentadas en función de la fracción volumen de CO₂ alimentado al sistema (Figura 15)
- b) Los valores de k_{LA} de ambas sustancias son presentadas en función del flujo volumétrico de alimentación de CO₂ al sistema (Figura 16)

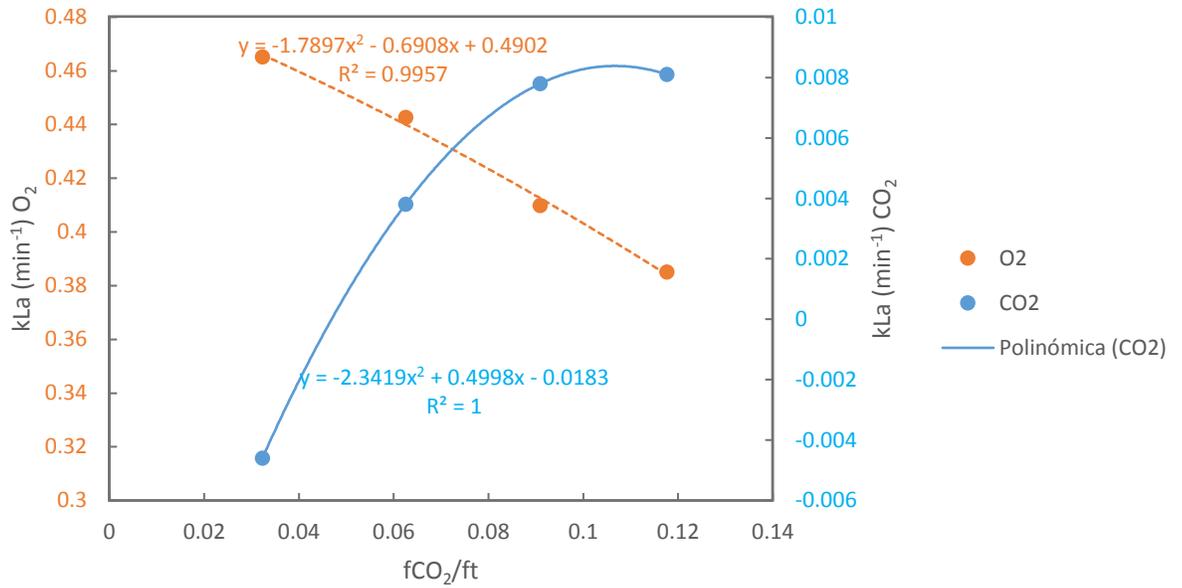


Figura 15. Resultados con condiciones de aireación y un flujo de CO₂.

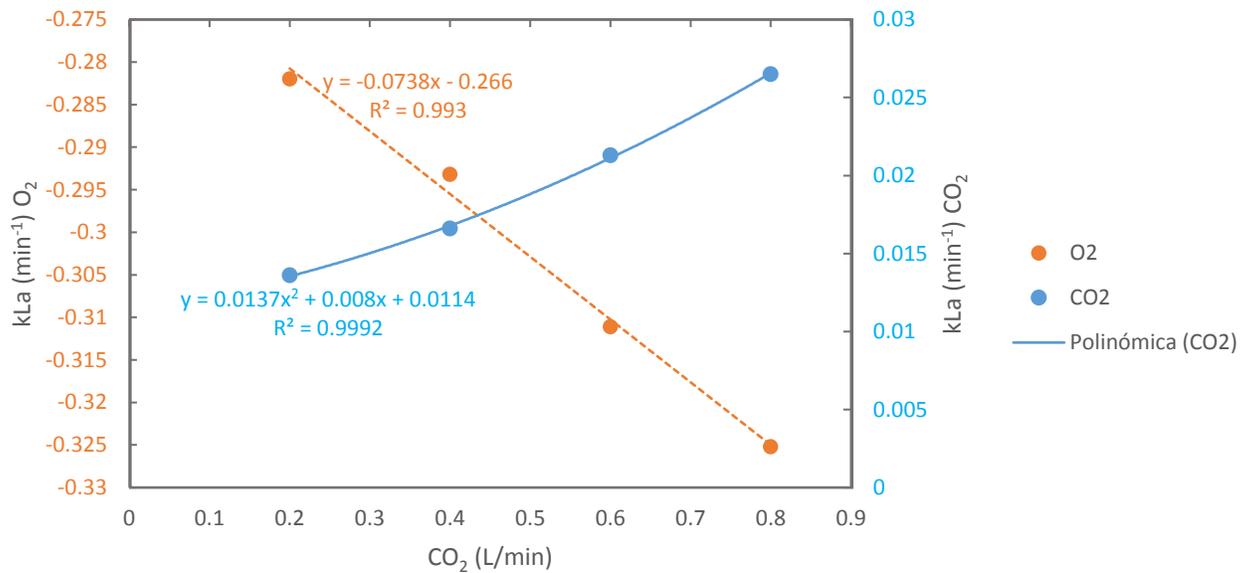


Figura 16. Resultados teniendo un flujo de alimentación al recipiente de puro CO₂.

VI.6. Correlación del Coeficiente de transferencia de masa volumétrico de O₂ y CO₂ en función del flujo de gases alimentados y números adimensionales.

Para obtener estas correlaciones, las propiedades del agua y las difusividades binarias correspondientes de los gases en agua correspondiente fueron investigadas y/o calculadas. Los valores son mostrados en la Tabla IX.

Tabla IX. Tabla de viscosidades y densidades a diferentes temperaturas [14-15].

T(°C)	μ (kg/m*s)x10⁻³	ρ(kg/m³)	D_{AB CO₂-H₂O}(m²/s)x10⁻⁹
15.5	1.124	999.112	2.01
15.7	1.118	999.077	2.02
15.9	1.113	999.042	2.03
16.4	1.099	998.955	2.06
18.4	1.043	998.605	2.19
18.5	1.041	998.587	2.19
18.6	1.038	998.57	2.20
T(°C)	μ(kg/m*s)x10⁻⁴	ρ(kg/m³)	D_{AB O₂-H₂O} (m²/s)x10⁻⁹
21.8	9.60	997.89	2.07
21.9	9.58	997.87	2.08
22	9.55	997.86	2.08
27.1	8.5	996.557	2.38
27.2	8.48	996.53	2.39
27.3	8.46	996.5	2.40
27.4	8.44	996.47	2.40

Los números adimensionales calculados fueron; Reynolds, Schmidt y uno más definidos para las necesidades de esta tesis experimental; la tercera cantidad adimensional definida fue:

$$\frac{k_L a * D^2}{60 * D_{AB}} \quad (12)$$

Donde $k_L a$ tiene unidades de min^{-1} , D el diámetro del impulsor en m, D_{AB} en m^2/s , el valor de 60 cambia $k_L a$ de min^{-1} a s^{-1} .

Los valores de los números adimensionales para los experimentos mostrados en las Secciones V.1, V.2, V.3 y V.4 se muestran en la Tabla X.

Tabla X. Valores adimensionales.

Sección	Aire (L/min)	CO ₂ (L/min)	k _L a (min ⁻¹)	Re	Sc	k _L a* D ² / (60*D _{AB})
V.1	6	0.2	-0.0046	25526.76	476.7	-166.6
V.1	6	0.4	0.0038	25575.34	474.5	137.25
V.1	6	0.6	0.0078	23699.22	558.59	307.31
V.1	6	0.8	0.0081	23931.77	546.92	315.53
V.2	0	0.2	0.0136	25575.34	474.5	491.2
V.2	0	0.4	0.0166	25648.82	471.64	597.65
V.2	0	0.6	0.0213	23825.57	552.61	834.64
V.2	0	0.8	0.0265	24234.52	532.5	1017.8
V.3	6	0.2	0.4652	27771.2	462.16	17770
V.3	6	0.4	0.4426	27713.9	464.23	16947.5
V.3	6	0.6	0.4098	27771.2	462.16	15653.8
V.3	6	0.8	0.3851	27771.2	462.16	14710.29
V.4	0	0.2	-0.282	31258.59	358	-9392.11
V.4	0	0.4	-0.2932	31331.47	356.21	-9738.97
V.4	0	0.6	-0.3111	31404.59	354.42	-10305.5
V.4	0	0.8	-0.3252	31478.06	352.63	-10743.42

Los datos de los experimentos mostrados en las secciones V.1 y V.3, en los cuales el objetivo fue determinar el $k_L a$ del CO₂ (Sección V.1) y O₂ (Sección V.3) durante alimentación simultanea de aire y de CO₂ fueron analizados graficando la cantidad:

$$y = \frac{k_L a * D^2}{60 * D_{AB}} \quad \text{Ec. (13)}$$

En función de $x = \frac{Re}{Sc} f_{CO_2}$, donde f_{CO_2} es la fracción de CO₂ en la corriente de gases alimentada al sistema. Los resultados se muestran en la Figura 17.

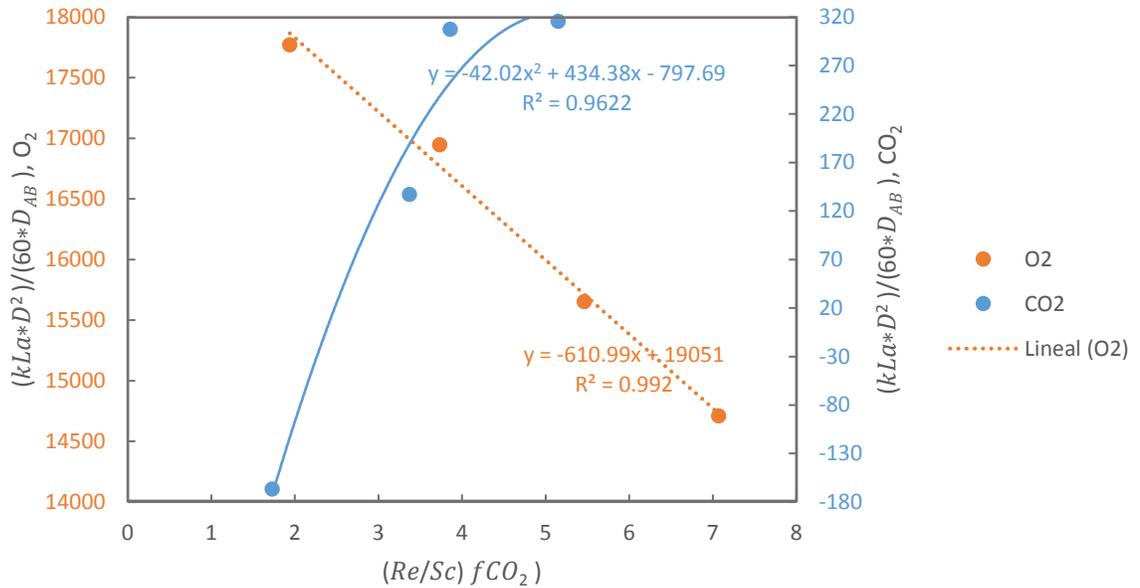


Figura 17. Correlaciones para cálculo de k_La para CO_2 y O_2 durante alimentación simultanea de aire y de CO_2 .

Los datos de los experimentos mostrados en las secciones V.2 y V.4, en los cuales el objetivo fue determinar el k_La del CO_2 (Sección V.2) y O_2 (Sección V.4) durante alimentación de una corriente pura de CO_2 fueron analizados graficando la cantidad:

$$y = \frac{k_La * D^2}{60 * D_{AB}} \quad (14)$$

En función de $x_1 = \frac{Re}{Sc} F_{CO_2}$, donde F_{CO_2} es el flujo de CO_2 alimentado al sistema en L/min. Los resultados son mostrados en la Figura 18.

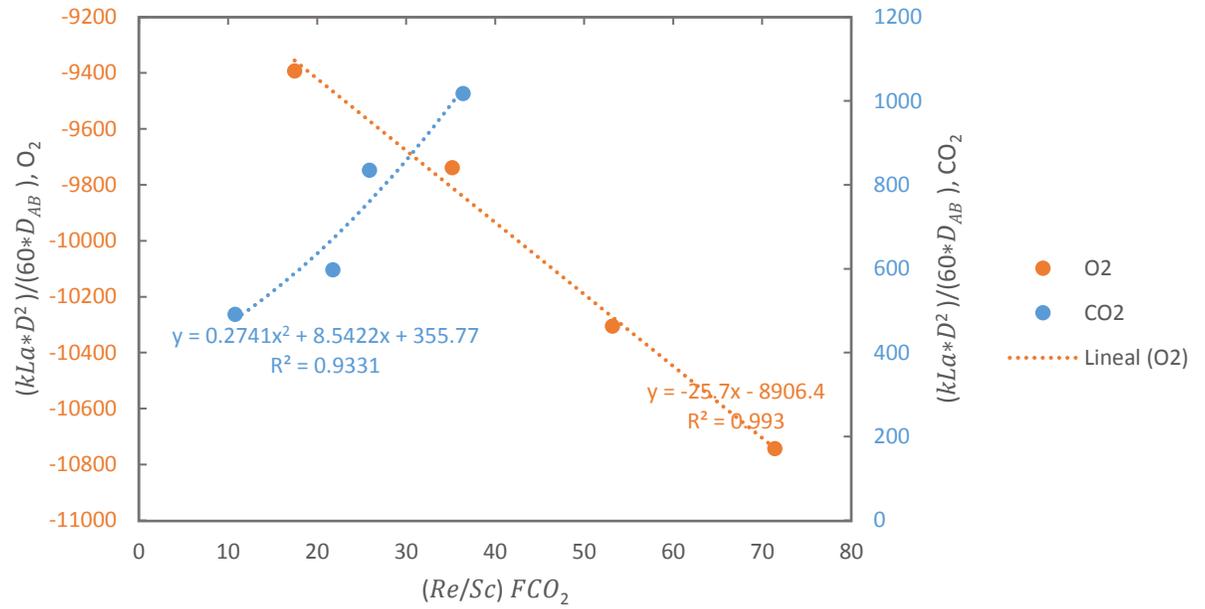


Figura 18. Correlaciones para cálculo de $k_L a$ para CO_2 y O_2 durante alimentación de una corriente pura de CO_2 .

CONCLUSIONES

Conclusiones

Durante la realización de este trabajo se pueden observar varias propiedades de los compuestos utilizados que son el CO_2 y el O_2 . Se observó que el CO_2 tiene una mayor solubilidad en el agua esto con respecto a la Ley de Henry y a las presiones parciales, en el caso del O_2 de igual forma que el CO_2 tiene una menor solubilidad en el agua.

En el caso de las difusividades de los compuestos CO_2 y O_2 en el agua todo cambia, se observó que al alimentar CO_2 con o sin aireación al recipiente la difusión es algo lenta y requiere algo de tiempo, por otra parte el O_2 suministrado en forma de aireación con o sin CO_2 cuenta con una mayor difusividad en el agua y el tiempo es mucho menor al observado en el CO_2 .

En los resultados de la obtención del coeficiente volumétrico de transferencia de masa del CO_2 esté siendo el compuesto de interés y el O_2 es un complemento a la investigación, se puede observar en los resultados contenidos en las tablas anteriores que los coeficientes volumétricos de transferencia del O_2 a distintas concentraciones de alimentación son mucho mayores que los coeficientes volumétricos de transferencia de masa obtenidos para el CO_2 a distintas concentraciones y arreglos de suministro al recipiente.

En base a los objetivos de esta investigación y mediante un análisis de los resultados de los coeficientes de transferencia volumétricos del CO_2 y del O_2 obtenidos se llega a la recomendación de flujo de alimentación siguientes: Se recomienda una alimentación de 6L/min Aire CO_2 y 0.6 L/min CO_2 , si tenemos un flujo mayor no tendremos una buena eficiencia ya que el tiempo de residencia será muy chico además los mismos flujos altos salen del recipiente a una mayor velocidad.

En la parte VI.6., que correlación elegir para estimar el coeficiente de transferencia de masa volumétrico debemos usar la primera correlación la que está en función de flujos totales de alimentación de la Figura 15 correspondería para el CO₂ y O₂, esta correlación es la mejor opción para la estimación del coeficiente de transferencia de masa volumétrico de ambos gases.

APÉNDICES

APÉNDICES

Apéndice A Experimento 1 CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO (O₂) CONTENIDA EN EL AGUA EN BASE AL TIEMPO

Tabla A1. 6L Aire 0.2L CO₂

m=0.2637			
t(min)	mg/LO ₂	t(min)	mg/LO ₂
0	0.1	10.5	8.3
0.5	0.8	11	8.3
1	2	11.5	8.4
1.5	3.4	12	8.4
2	4.4	12.5	8.4
2.5	5.2	13	8.4
3	5.9	13.5	8.4
3.5	6.5	14	8.4
4	6.8	14.5	8.4
4.5	7.1	15	8.4
5	7.1	15.5	8.4
5.5	7.5	16	8.4
6	7.8	16.5	8.4
6.5	7.9	17	8.4
7	8	17.5	8.4
7.5	8.1	18	8.4
8	8.1	18.5	8.4
8.5	8.2	19	8.5
9	8.2	19.5	8.5
9.5	8.3	20	8.5
10	8.3		

Apéndice B
Experimento 1
CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO (O₂) CONTENIDA EN EL AGUA EN BASE AL
TIEMPO

Tabla A2. 6L Aire 0.4L CO₂

m=0.2569			
t(min)	mg/LO ₂	t(min)	mg/LO ₂
0	0.1	10.5	8.1
0.5	0.7	11	8.2
1	2	11.5	8.2
1.5	3.4	12	8.3
2	4.4	12.5	8.3
2.5	5.1	13	8.3
3	5.9	13.5	8.3
3.5	6.4	14	8.3
4	6.8	14.5	8.3
4.5	7.1	15	8.3
5	7.3	15.5	8.3
5.5	7.5	16	8.3
6	7.6	16.5	8.3
6.5	7.8	17	8.3
7	7.9	17.5	8.3
7.5	7.9	18	8.3
8	8	18.5	8.3
8.5	8.1	19	8.3
9	8.1	19.5	8.3
9.5	8.1	20	8.3
10	8.1		

Apéndice C
Experimento 1
CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO (O₂) CONTENIDA EN EL AGUA EN BASE AL
TIEMPO

Tabla A3. 6L Aire 0.6L CO₂

m=0.3302			
t(min)	mg/LO ₂	t(min)	mg/LO ₂
0	0	9	8
0.5	0.5	9.5	8
1	1.9	10	8
1.5	3.2	10.5	8
2	4.2	11	8
2.5	5.2	11.5	8
3	5.7	12	8.1
3.5	6.3	12.5	8.1
4	6.5	13	8.1
4.5	7	13.5	8.1
5	7.2	14	8.1
5.5	7.4	14.5	8.1
6	7.5	15	8.1
6.5	7.6	15.5	8.1
7	7.7	16	8.1
7.5	7.8	16.5	8.1
8	7.9	17	8.1
8.5	7.9		

Apéndice D
Experimento 1
CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO (O₂) CONTENIDA EN EL AGUA EN BASE AL
TIEMPO

Tabla A4. 6L Aire 0.8L CO₂

m=0.3871			
t(min)	mg/LO ₂	t(min)	mg/LO ₂
0	0	8	7.7
0.5	0.6	8.5	7.8
1	2	9	7.8
1.5	3.2	9.5	7.8
2	4.2	10	7.9
2.5	5.1	10.5	7.9
3	5.8	11	7.9
3.5	6.2	11.5	7.9
4	6.6	12	7.9
4.5	6.9	12.5	7.9
5	7	13	7.9
5.5	7.3	13.5	7.9
6	7.4	14	7.9
6.5	7.5	14.5	7.9
7	7.6	15	8
7.5	7.7		

Apéndice E
Experimento 2
CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO (O₂) CONTENIDA EN EL AGUA EN BASE AL
TIEMPO

Tabla A5. 0L Aire 0.2L CO₂

m=-0.2344			
t(min)	mg/LO ₂	t(min)	mg/LO ₂
0	8	13	4.1
0.5	7.8	13.5	4
1	7.6	14	3.9
1.5	7.4	14.5	3.8
2	7.2	15	3.7
2.5	7.1	15.5	3.6
3	6.9	16	3.5
3.5	6.7	16.5	3.4
4	6.6	17	3.3
4.5	6.4	17.5	3.2
5	6.3	18	3.1
5.5	6.1	18.5	3
6	6	19	2.9
6.5	5.8	19.5	2.9
7	5.7	20	2.8
7.5	5.6	20.5	2.7
8	5.4	21	2.6
8.5	5.3	21.5	2.5
9	5.2	22	2.5
9.5	5	22.5	2.4
10	4.9	23	2.3
10.5	4.7	23.5	2.3
11	4.6	24	2.2
11.5	4.5	24.5	2.1
12	4.4	25	2.1
12.5	4.3		

Apéndice F
Experimento 2
CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO (O₂) CONTENIDA EN EL AGUA EN BASE AL
TIEMPO

Tabla A6. 0L Aire 0.4L CO₂

m=-0.3555			
t(min)	mg/LO ₂	t(min)	mg/LO ₂
0	7.9	9	4.1
0.5	7.7	9.5	3.9
1	7.4	10	3.7
1.5	7.2	10.5	3.6
2	7	11	3.4
2.5	6.7	11.5	3.2
3	6.5	12	3.1
3.5	6.2	12.5	3
4	6.1	13	2.8
4.5	5.8	13.5	2.7
5	5.6	14	2.6
5.5	5.4	14.5	2.5
6	5.2	15	2.3
6.5	5	15.5	2.2
7	4.8	16	2.1
7.5	4.6	16.5	2
8	4.4	17	1.9
8.5	4.2		

Apéndice G
Experimento 2
CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO (O₂) CONTENIDA EN EL AGUA EN BASE AL
TIEMPO

Tabla A7. 0L Aire 0.6L CO₂

m=-0.4636			
t(min)	mg/LO ₂	t(min)	mg/LO ₂
0	7.9	7	4
0.5	7.6	7.5	3.8
1	7.3	8	3.6
1.5	7	8.5	3.4
2	6.7	9	3.2
2.5	6.4	9.5	3
3	6.1	10	2.8
3.5	5.8	10.5	2.6
4	5.5	11	2.5
4.5	5.3	11.5	2.3
5	5	12	2.2
5.5	4.8	12.5	2.1
6	4.5	13	2
6.5	4.3		

Apéndice H
Experimento 2
CONCENTRACIÓN DE OXÍGENO (O₂) CONTENIDA EN EL AGUA EN BASE AL
TIEMPO

Tabla A8. 0L Aire 0.8L CO₂

m=-0.5615			
t(min)	mg/LO ₂	t(min)	mg/LO ₂
0	7.9	6	3.8
0.5	7.5	6.5	3.6
1	7.2	7	3.3
1.5	6.8	7.5	3.1
2	6.4	8	2.9
2.5	6.1	8.5	2.7
3	5.7	9	2.5
3.5	5.4	9.5	2.3
4	5.1	10	2.1
4.5	4.7	10.5	1.9
5	4.4	11	1.8
5.5	4.2		

Apéndice I
Experimento 1
RESULTADOS EXPERIMENTALES QUE INCLUYEN AIREACIÓN Y
CONCENTRACIONES DE CO₂.

Tabla A9.

AIRE	6 L/min	6 L/min	6 L/min	6 L/min
CO ₂	0.2 L/min	0.4 L/min	0.6 L/min	0.8 L/min
tiempo (min)	%CO ₂	%CO ₂	%CO ₂	%CO ₂
0	13	5.7	0.4	2
1	12.8	5.2	0.4	1.8
2	12.4	5.1	0.4	1.8
3	12	5.3	0.5	2.1
4	11.5	5.6	0.5	2.6
5	11	6	0.7	3.4
6	10.6	6.4	0.9	4.2
7	10.2	6.8	1.4	5.1
8	9.8	7.1	2.1	5.9
9	9.5	7.4	3	6.6
10	9.2	7.7	3.9	7.2

Apéndice J
Experimento 1
RESULTADOS EXPERIMENTALES CON UNA ALIMENTACIÓN DE PURO CO₂.

Tabla A10.

CO ₂	0.2 L/min	0.4 L/min	0.6 L/min	0.8 L/min
tiempo (min)	%CO ₂	%CO ₂	%CO ₂	%CO ₂
0	8	8.6	9.9	10.7
1	8.2	8.6	10.2	10.9
2	8.6	8.9	10.9	11.5
3	9.2	9.5	11.9	12.6
4	10	10.3	13.1	14
5	10.9	11.4	14.6	15.8
6	12	12.7	16.2	17.7
7	13.1	14	17.9	19.8
8	14.4	15.5	19.7	22
9	15.7	17.1	21.6	24.3
10	17	18.8	23.5	26.6

Apéndice K
Experimento 2
RESULTADOS EXPERIMENTALES EN CONCENTRACIÓN DE O₂ CON
RESPECTO AL TIEMPO, INCLUYEN AIREACIÓN Y CONCENTRACIONES DE
CO₂.

Tabla A11.

AIRE	6 L/min	6 L/min	6 L/min	6 L/min
CO ₂	0.2 L/min	0.4 L/min	0.6 L/min	0.8 L/min
tiempo (min)	%O ₂	%O ₂	%O ₂	%O ₂
0	1.2	1.2	0.0	0.0
0.5	9.6	8.4	6.0	7.2
1	24.1	24.1	22.9	24.1
1.5	41.0	41.0	38.6	38.6
2	53.0	53.0	50.6	50.6
2.5	62.7	61.4	62.7	61.4
3	71.1	71.1	68.7	69.9
3.5	78.3	77.1	75.9	74.7
4	81.9	81.9	78.3	79.5
4.5	85.5	85.5	84.3	83.1
5	85.5	88.0	86.7	84.3
5.5	90.4	90.4	89.2	88.0
6	94.0	91.6	90.4	89.2
6.5	95.2	94.0	91.6	90.4

Apéndice L
Experimento 2
RESULTADOS DE EXPERIMENTOS CON UNA ALIMENTACIÓN DE PURO
CO₂.

Tabla A12.

CO ₂	0.2 L/min	0.4 L/min	0.6 L/min	0.8 L/min
tiempo (min)	%O ₂	%O ₂	%O ₂	%O ₂
0	96.4	95.2	95.2	95.2
0.5	94.0	92.8	91.6	90.4
1	91.6	89.2	88.0	86.7
1.5	89.2	86.7	84.3	81.9
2	86.7	84.3	80.7	77.1
2.5	85.5	80.7	77.1	73.5
3	83.1	78.3	73.5	68.7
3.5	80.7	74.7	69.9	65.1
4	79.5	73.5	66.3	61.4
4.5	77.1	69.9	63.9	56.6
5	75.9	67.5	60.2	53.0
5.5	73.5	65.1	57.8	50.6
6	72.3	62.7	54.2	45.8
6.5	69.9	60.2	51.8	43.4
7	68.7	57.8	48.2	39.8
7.5	67.5	55.4	45.8	37.3
8	65.1	53.0	43.4	34.9
8.5	63.9	50.6	41.0	32.5
9	62.7	49.4	38.6	30.1
9.5	60.2	47.0	36.1	27.7
10	59.0	44.6	33.7	25.3

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Rafael M. Galvín, 2003, Físicoquímica y microbiología de los medios acuáticos Tratamiento y control de calidad de aguas, Ediciones Díaz de santos, pp. 74-77.
- [2] Arturo F. Chica Pérez, Adriana Artola Casacuberta, Antonio Rosal Raya, Francina Solé-Mauri, Francisco Jesús Fernández Morales, José Luis García-Morales, Manuel Dios Pérez, Manuel Jesús Díaz Blanco, Ramón Plana González-Sierra, Xavier Font Segura, 2015, Ingeniería y aspectos técnicos de la estabilización aeróbica II.3, p. 162.
- [3] CTI Reviews, 2016, Solutions, Just The facts101 Textbook Key Facts, Chemistry: Structure and Properties.
- [4] Morcillo, Jesús (1989). *Temas básicos de química* (2ª edición). Alhambra Universidad. p. 172.
- [5] C. Judson King, 1979, Procesos de separación, p. 307.
- [6]R. Byron Bird, Warren E. Stewart, Edwin N. Lightfoot, 2013, Fenómenos de transporte, p. 599.
- [7]Warren L. McCabe, Julian C. Smith, Peter Harriott, 1998, Operaciones unitarias en Ingeniería Química, p.678.
- [8]Robert N. Maddox, 1985, Mass Transfer Coefficients, Mass Transfer Fundamentals and Application, Ed. Prentice Hall, pp. 139-151.
- [9] Reid, R.C., J.M. Praunsnitz, and T.K. Sherwood. 1977. The Properties of Gases and Liquids, Third Edition. McGraw-Hill. NY. p. 578.
- [10] Welty, J.R., C.E. Wicks, and R.E. Wilson. 1984. Fundamentals of Momentum, Heat, and Mass Transfer, Third Edition. John Wiley & Sons, NY, p. 803.
- [11] H. Scott Fogler, 2001, Elementos de ingeniería de las reacciones químicas, Ed. Prentice Hall, pp. 699-701.
- [12] Robert N. Maddox, 1985, Mass Transfer Coefficients, Mass Transfer Fundamentals and Application, Ed. Prentice Hall, pp. 139-151.

[13] SMC CORPORATION,

https://www.smc.eu/portal_ssl/WebContent/resources/docs/pdf_Advanced_Sensor_s08/pfm_es.pdf

[14] http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/denh2o.pdf

[15] http://www.vaxasoftware.com/doc_edu/qui/viscoh2o.pdf