

REDUCCIÓN DEL PH DE LAS AGUAS DE LOS PROCESOS INDUSTRIALES UTILIZANDO GASES DE COMBUSTIÓN

Agustín Valverde Granja,* Mauricio Hernández Sarabia, Jorge Enrique Nuñez Díaz

Universidad de Ibagué, Carrera 22 Calle 67 Barrio Ambalá Ibagué Colombia

Teléfono 057 8 2709400 Ext 310, agustin.valverde@unibague.edu.co

RESUMEN

El dióxido de carbono, un gas aparentemente indeseable, por sus efectos de contaminación ambiental, viene siendo utilizado por diferentes laboratorios en el mundo, como soluto en las columnas de absorción, las cuales combinan flujos gaseosos puros o contaminados con otras sustancias líquidas que actúan como solvente. Para el caso particular de la industria textil, el dióxido de carbono se utiliza en cilindros presurizados, con el fin de reducir los altos valores de PH (entre 8 y 12) de las aguas de los procesos de teñido y secado. En esta investigación se diseñó un prototipo a baja escala, de una columna de absorción (sin relleno) de dióxido de carbono que neutraliza aguas alcalinas del sector textil, a partir de la adición de los gases de combustión, para producir los gases se utilizó un motor de combustión interna, se usaron relaciones de agua/ gas entre 0.95-20.58 en masa, se realizó un diseño experimental tipo factorial con seis variables de entrada y dos de salida. Con el proyecto se demuestra, que sí es posible neutralizar aguas alcalinas efluentes de procesos de lavado y teñido, a partir de la adición de dióxido de carbono presente en los gases de combustión, que provienen de las calderas de vapor, lográndose bajar hasta en 5 puntos porcentual el PH, lo que permitirá reemplazar los viejos sistemas de neutralización con CO₂ costosos, por un equipo de doble propósito.

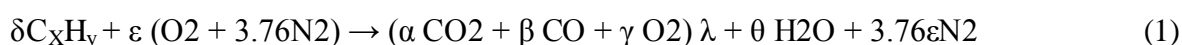
Preferimos presentación oral

1.- Introducción

El dióxido de carbono, un gas aparentemente indeseable por sus efectos de contaminación ambiental, viene siendo utilizado, por diferentes laboratorios en el mundo como soluto, en las columnas de absorción, las cuales combinan flujos gaseosos puros o contaminados, con otras sustancias líquidas, que actúan como solvente. Para el caso particular de la industria textil, el dióxido de carbono se utiliza en cilindros presurizados, con el fin de reducir los altos valores de PH (entre 8 y 12) que tienen las aguas de sus procesos de teñido y secado, al final de la línea, desde el punto legislativo en Colombia y el mundo, no es permitido arrojar a los ríos directamente esta agua, sin antes, aplicar procesos de tratamiento, que devuelvan el agua hasta llevarla a sus propiedades neutras naturales [1]. Las características alcalinas de las aguas de la industria textil, se deben principalmente al uso de detergentes y tinturas, eso significa que actualmente no existe la tendencia de cambiar dichos componentes en el proceso, con lo cual, resulta casi imposible, en este momento, atacar el problema desde la raíz, sin embargo, existe la posibilidad de reducir sus emisiones de gas carbónico al ambiente, al mismo tiempo, que se pueden neutralizar las aguas efluentes de sus procesos industriales, si se utiliza una corriente de gases ricos en dióxido de carbono que están siempre presentes en los gases de combustión[2], producidos en las calderas de vapor.

2.-Metodología

La metodología propuesta utiliza la ecuación química del proceso combustión, la cual define la combustión como un proceso químico que esta dado por la reacción de un hidrocarburo con el oxígeno del aire, considerando el aire en una proporción 79% de N₂ y 21% de O₂, en volumen [3] [4] . En la ecuación 1 apreciamos la reacción de la combustión.



Donde:

$\delta, \epsilon, \alpha, \beta, \gamma, \lambda, \theta$: Fracciones molares, C_xH_y : Hidrocarburo, (O₂ + 3.76N₂) : Composición básica del aire que entra en las cámaras de combustión, ($\alpha CO_2 + \beta CO + \gamma O_2$) + $\theta H_2O + 3.76 \epsilon N_2$: Productos de combustión,

Seguidamente se utilizó la teoría del diseño de columnas de absorción [5], teniendo como objetivos principales, determinar el diámetro y la altura de la torre. Las ecuaciones del diseño del tamaño de las columnas se han obtenido teóricamente empleando ciertas consideraciones las cuales se escriben a continuación:

Se considera al gas como una mezcla de dos componentes: Solute + aire, donde el soluto consiste de un solo compuesto presente en el gas como una cantidad diluida.

Se considera que el gas se comporta como un gas ideal y que el solvente se comporta como un líquido ideal.

Se considera que la absorción química (reacción) del soluto con el solvente es rápida comparada con la razón de absorción física del soluto en el solvente [6] .

A continuación se enuncian las ecuaciones relacionadas en el diseño de una columna de absorción:

a) Cálculo del valor adimensional X que caracteriza el comportamiento del absorbedor:

$$X = \{ (L_{mol} * Ml) / (G_{mol} * Mg) \} * (\rho_g / \rho_l)^{0.5} \quad (2)$$

b) Cálculo del valor adimensional Y que caracteriza el comportamiento del absorbedor:

$$Y = 10^{-\{1.668 + 1.085 \log X + 0.297 (\log X)^2\}} \quad (3)$$

c) Cálculo del flujo superficial del gas en las paredes de la torre:

$$G_s = \{ [\rho_l * \rho_g * g * Y] / [\psi * F_p * (\mu_l / 2.42)^{0.2}] \}^{0.5} \quad (4)$$

d) Cálculo del área de la sección transversal de la columna de relleno:

$$A = G_{mol} * M_g / G_s * f \quad (5)$$

Donde “f” se le conoce como el factor de inundación y es un parámetro adimensional que tiene en cuenta la tendencia a inundación de la columna. Su magnitud se encuentra entre 0.6 y 0.75.

e) Cálculo del diámetro de la columna:

$$D = [4 * A / \pi]^{0.5} \quad (6)$$

f) Asumir el factor de absorción AF:

Es un número que describe el comportamiento del equipo indicando que tan alejada está su línea de operación al valor ideal. Los valores de los factores de absorción para las torres empacadas están en el rango 1.5 a 2.0.

g) Cálculo del número de unidades de transferencia de masa:

$$N_{tu} = \ln \{ (y_i / y_o) * (1 - 1/AF) + 1/AF \} / (1 - 1/AF) \quad (7)$$

h) Cálculo del flujo superficial del líquido en las paredes de la torre:

$$L_s = L_{mol} * M_l / A \quad (8)$$

i) Cálculo de la altura del número de unidades de transferencia de película de gas y líquido:

$$H_g = \{ [\xi (3600 G_s f)^{\zeta}] * (\mu_g / \rho_g * D_g)^{0.5} \} L_s^{\Gamma} \quad (9)$$

$$H_l = \phi [(L_s / \mu_l)^b] * (\mu_l / \rho_l * D_l)^{0.5} \quad (10)$$

j) Cálculo de la altura total de unidades de transferencia:

$$H_{tu} = H_g + (1/AF) * H_l \quad (11)$$

k) Cálculo de la altura del relleno dentro de la columna:

$$H_{pack} = N_{tu} * H_{tu} \quad (12)$$

l) Cálculo de la altura de la torre:

$$H = 1.4 * H_{pack} + 1.02 * D + 2.81 \quad (13)$$

Las anteriores ecuaciones han sido deducidas a partir de la ley de conservación de masa y como resultado empírico de pruebas de laboratorio. Ciertos coeficientes tales como ξ , ς , Γ , ϕ , b , Ψ son modificaciones que ajustan los modelos teóricos usados a la realidad del diseño.

3.-Diseño Experimental

A partir de observaciones al comportamiento del sistema, se han seleccionado las siguientes variables, como los factores relevantes en el proceso de neutralización de aguas alcalinas, a partir de gases de combustión, los cuales se resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Factores relevantes de entrada y variables de salida

ARIABLES DE ENTRADA	VARIABLES DE SALIDA
Flujo de gases G	Concentración CO2 de salida
Flujo de agua L	PH salida
Concentración CO2 entrada (CO2o)	-
PH de ingreso del agua (PHo)	-

Debido a que los valores de concentración de dióxido de carbono de los gases dependen del flujo G, se deduce que no es una variable independiente y que no es posible manipular. El valor del PH con el que las aguas alcalinas inician las pruebas tampoco es manipulable por cuanto las aguas residuales de la Industria textil, tienen distintos valores de alcalinidad dependiendo del uso que se le haya dado durante el día, y por tanto las muestras de laboratorio son diferentes. De esta manera se ha diseñado un experimento tipo factorial que tiene en cuenta las variables que se muestran en la tabla 2.

Tabla 2. Diseño experimental

FACTORES	VARIABLES
Flujo de gases G	G1 = 42.9946 gr/seg
	G2 = 44.6982 gr/seg
	G3 = 61.4203 gr/seg
Flujo de agua L	L1 = 48.8481 gr/seg
	L2 = 94.7055 gr/seg
	L3 = 140.5629 gr/seg

Los cálculos de G1, G2, G3, L1, L2, L3 que aparecen en la tabla 2 fueron realizados con los datos experimentales recogidos en las pruebas piloto.

4.-Resultados

4.1-Análisis del porcentaje de reacción de dióxido de carbono ΔCO_2

Puede escribirse que para los 33 experimentos se observa un valor modal $\Delta\text{CO}_2 = 0.5\%$.

4.2. Análisis grafico de variables y del comportamiento de los fluidos

Se plotean ahora las caídas del potencial de hidrogeno ΔPH en función del flujo másico de gases para caudales de agua constantes. Las curvas se encuentran suavizadas con funciones polinómicas de tercer grado figura 1 y 2.

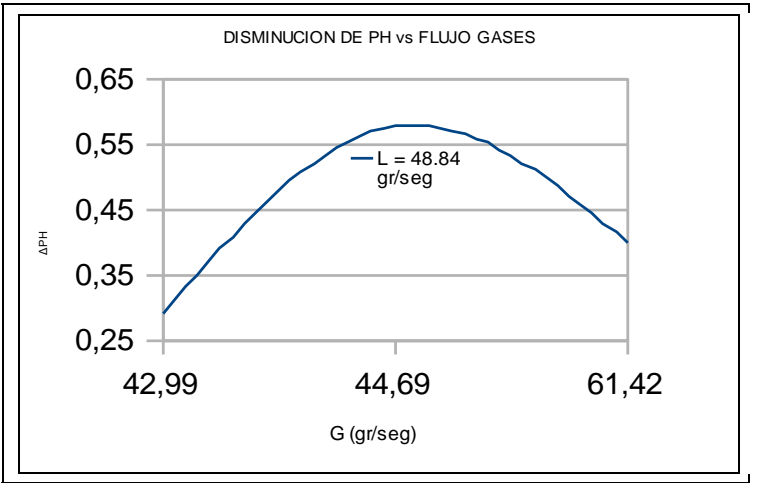


Figura 1. ΔPH en función del flujo de gases con un caudal de agua constante de 48.82 gr/seg

En la figura 1, puede apreciarse una curva cóncava hacia abajo en la variable ΔPH con lo que puede interpretarse que la mayor disminución de PH se puede encontrar en flujos intermedios de gases, el flujo no puede ser muy altos ya que un tiempo tan corto de contacto impide la mezcla del soluto y el solvente, ni muy bajo ya que los gases de combustión contienen porcentajes de dióxido de carbono menores con lo que disminuye la razón de transferencia de masa. El mayor valor ΔPH encontrado bajo los parámetros de operación que aparecen en la figura 1 es de 0.58 para una razón de flujos másicos de $r = 0.915$.

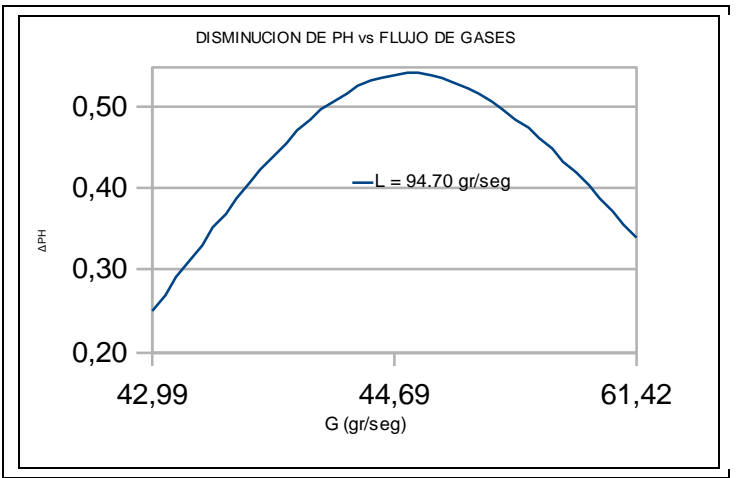


Figura 2. ΔPH en función del flujo de gases con un caudal de agua constante de 94.71 gr/seg.

En la figura 2 se puede observar de nuevo el comportamiento cóncavo hacia abajo. Al comparar las figuras 1 y 2 puede verse que un aumento en el caudal de agua disminuye la transferencia del soluto hacia el solvente por cuanto el tiempo de mezcla entre los reactivos disminuye también. El mayor valor ΔPH encontrado bajo los parámetros de operación que aparecen en la figura 2 es de 0.54 para una razón de flujos másicos de $r = 0.4719$.

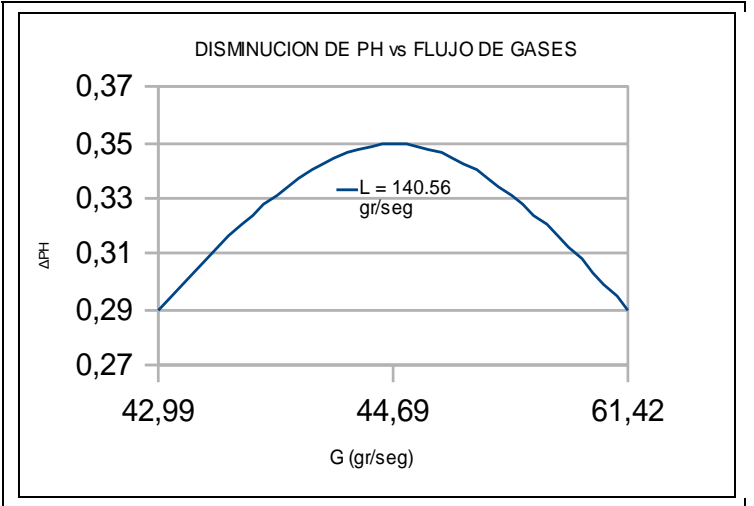


Figura 3. ΔPH en función del flujo de gases en 140.56 gr/seg función del flujo de gases

La figura 3 corrobora definitivamente que el flujo de gas al interior del prototipo debe ser de 44.69 gr/seg, para lograr el mayor ΔPH. El lector puede notar que el aumento de nuevo en el caudal de agua reduce la efectividad del equipo, pues a medida que el caudal de agua aumenta el tiempo de reacción química para formación del ácido carbónico y el subsecuente proceso de neutralización es cada vez menor. El mayor valor ΔPH encontrado bajo los parámetros de operación que aparecen en la figura 4 es de 0.35 para una razón de flujos másicos de $r = 0.3179$.

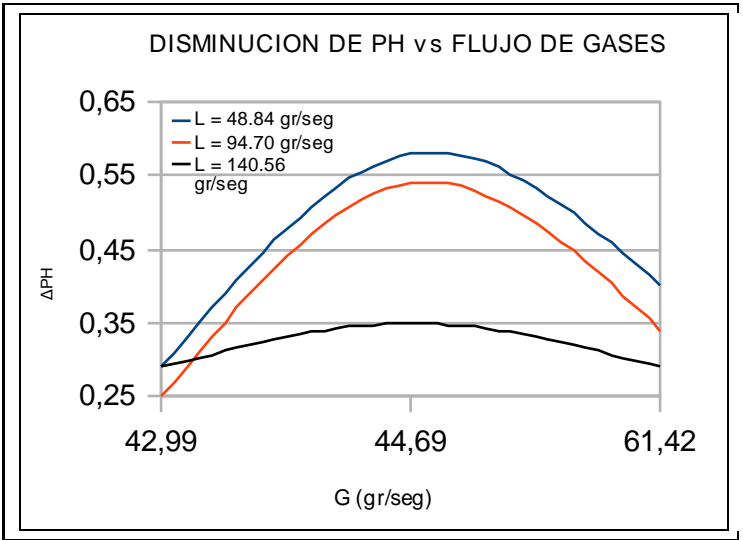


Figura 4. Superposición de graficas ΔPH con caudal de agua constante de

Al superponer los comportamientos de caída de ΔPH en función del flujo másico de gases (figura 4) es posible ver que la mayor variación se presenta, en todos los casos, para un flujo intermedio de gases de combustión de 44.69 gr/seg y aunque para cualquiera de los caudales constantes de agua se puede ver que la forma de la curva es cóncava hacia abajo, es necesario acotar que la razón optima de flujos se encuentra para un caudal de agua específico de 48.84 gr/seg no re circulado con lo que se concluye una razón de flujos de $r = 0.9150$. Esto verifica que el caudal de agua debe ser lo suficientemente bajo como para garantizar el tiempo necesario para la transferencia de masa del soluto CO₂ al solvente H₂O, hasta que ocurra la reacción química primaria de formación de ácido carbónico H₂CO₃ y la subsecuente reacción de neutralización secundaria formando las sales disueltas en líquido.

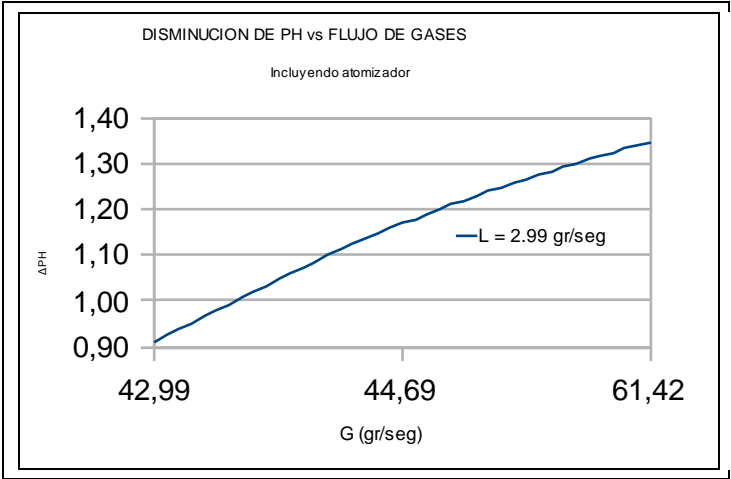


Figura 5. ΔPH en función del flujo de gases incluyendo atomizador para un caudal de agua de 2.9907 gr/seg.

Al incluir un atomizador en el prototipo, figura 5, se aprecia una curva creciente en función del flujo de gases. Esto muestra que la inclusión de un atomizador en la boquilla de entrada de agua al prototipo cambia por completo el comportamiento del sistema, si se compara esto con las formas de las curvas anteriores se puede ver que, a pesar del aumento en las restricciones a la bomba y por consiguiente una alta pérdida de presión, el atomizador aumenta claramente la eficiencia del equipo en el proceso de la transferencia de masa, el valor ΔPH es efectivamente mayor que todos los demás para un mismo flujo no recirculado. Se puede decir que el atomizador convierte las curvas cóncavas hacia abajo vistas en las figuras 2, 3 y 4 en curvas crecientes en función del flujo de gases.

La figura 6 muestra el comportamiento del PH de las aguas alcalinas sometidas a proceso de neutralización por absorción de CO_2 de gases de combustión en función del tiempo para un flujo de gases de 61.42 gr/seg y un caudal de agua de 48.85 gr/seg que se mantuvieron constantes durante la prueba con el caudal de agua recirculado por el prototipo.

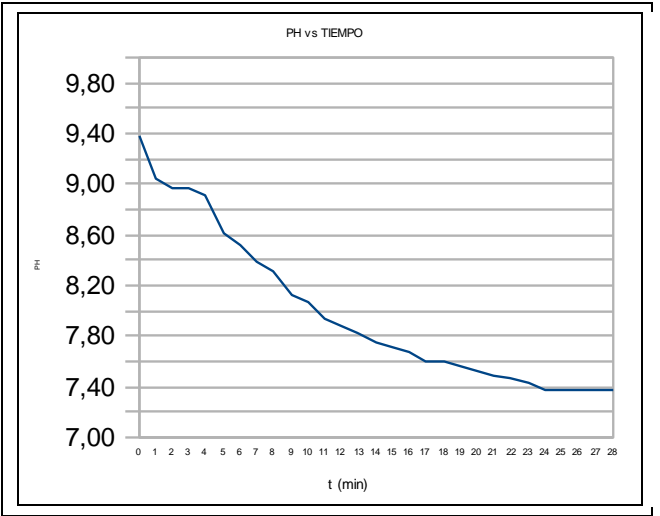


Figura 6. Disminución del PH de aguas en función del tiempo para un flujo de agua

En el gráfico se pueden hacer tres interpretaciones, la primera, es claro que el fluido al ser recirculado por el equipo sigue reaccionando químicamente realizando continuos procesos de neutralización y por esta razón la grafica se muestra decreciente en el tiempo, esto demuestra experimentalmente que sí es posible disminuir el PH de sustancias alcalinas efluentes de procesos industriales a partir de la adición de gases de combustión que tengan porcentajes

apreciables de dióxido de carbono. La segunda, es que a medida que pasa el tiempo la caída del potencial de hidrogeno (ΔPH) es cada vez menor, los intervalos se acortan en función del tiempo debido a la saturación de sales en el agua lo que en el marco teórico se expuso como: Endurecimiento del agua. Tercero, se observa una cota inferior en la curva para un valor de $PH = 7.38$ donde el sistema frena completamente el proceso de neutralización de las aguas alcalinas lo que pone de manifiesto el límite de saturación de las aguas operando bajo estos parámetros.

5. CONCLUSIONES

Los efluentes de agua del sector textil, poseen características alcalinas cuyos valores de PH están por encima del permitido ambiental [7] y legislativamente, y son de carácter nocivo para la parte biológica de los ríos si se vierten sin tratamiento previo. Estos valores de PH se encuentran entre 8 y 12 y son consecuencia del uso de detergentes en el proceso de lavado y de las tinturas en el proceso de teñido. Actualmente existe la tendencia de seguir utilizando estos detergentes y tinturas en el proceso y por tanto es difícil atacar el problema de la contaminación del agua en el sector textil desde la raíz, sin embargo, aquí se demuestra que sí es posible neutralizar aguas alcalinas efluentes de procesos de lavado y teñido a partir de la adición de dióxido de carbono presente en los gases de combustión que provienen de las calderas de vapor ya que el agua dentro del prototipo se comporta como un solvente y el dióxido de carbono como un soluto llevándose a cabo un proceso de absorción química.

La disminución en el PH del líquido es cada vez mayor en la medida en que también lo sea el tiempo de mezcla de los gases, sin embargo, existe una cota inferior en el valor de PH al cual se pueda llegar mediante el proceso de absorción química debido a la saturación de las sales formadas y disueltas en el líquido, efecto conocido como: Aumento en la dureza del agua.

El uso de un atomizador o aspersor al nivel de la boquilla de entrada de flujo de agua al interior del prototipo mejora las condiciones de mezcla, absorción y transferencia de masa de dióxido de carbono en el agua pero incrementa las pérdidas de presión en el dispositivo.

La producción espontánea de ácido sulfhídrico al interior de las aguas alcalinas en reposo no aporta a la disminución del PH de las mismas por cuanto es un ácido muy débil para desencadenar reacciones químicas de neutralización que sean apreciables.

Bajo los parámetros de operación de este prototipo es posible disminuir el PH del líquido en 0.58 unidades si la razón de flujo gas-agua es de $r = 0.9150$ en masa para un flujo de solvente no recirculado.

Bajo los parámetros de operación de este prototipo es posible disminuir el PH del líquido en 1.35 unidades si la razón de flujo gas-agua es de $r = 20.53$ en masa con caudal de solvente no re circulado y atomizado en la boquilla de entrada al dispositivo venturi.

Bajo los parámetros de operación de este prototipo es posible disminuir el PH del líquido en 2.01 unidades si el agua es re circulada a través del equipo y con una razón gas-agua de $r = 1.2573$ en masa.

Para el sistema motor-prototipo estudiado y bajo los parámetros de operación del equipo se encuentra que porcentaje de dióxido de carbono que reacciona químicamente con el agua para la formación de ácido carbónico y la subsecuente neutralización tiene un valor modal del 0.5%.

6. Referencias

- [1] F. M. Delgado. LOS PROCESOS INDUSTRIALES Y EL MEDIO AMBIENTE TOMO II. Editorial El Poirá. Primera edición. Colombia, 2004, pág. 133.
- [2] L. Hu y Adeyinka A. Adeyiga. Artículo: Carbon dioxide separation by phase enhanced gas-liquid absorption. Escuela de Ingeniería y Tecnología de la Universidad de Hampton. Mayo 2004
- [3] Gordon J. Van Wylen. Fundamentos de la termodinámica. Segunda edición. Editorial Limusa 2006. Biblioteca Banco de la república Ibagué 536.7 V15f3
- [4] T. Nakamura and Dr. C.L. Senior. Artículo: Recovery and sequestration of CO₂ from stationary combustion systems by photosynthesis of microalgae. National Energy Technology Laboratory. Pittsburgh. Marzo 2001.
- [5] Robert H. Perry. Manual del ingeniero químico. Quinta edición. Volumen 1. Mc Graw Hill. 1982. Biblioteca banco de la república Ibagué Darío Echandía 660.28 M15 página 3-225.
- [6] Clair N. Sawyer, Perry L. Mcarty y Gene F. Parkin. QUIMICA PARA INGENIERIA AMBIENTAL. Editorial Mc Graw Hill. Cuarta edición, Colombia, 2000, pág. 125.
- [7] Manuel L. Anglada. EL CAMBIO GLOBAL EN EL MEDIO AMBIENTE. Editorial Marcombo. Barcelona (España), 1997, pág. 85.