

Determinación de la influencia de variables de operación en la neutralización de las aguas residuales textiles con CO₂.

Mercedes Arbona Cabrera^a, Isabel Cabrera Estrada^a, María Eugenia O'Farril Pie^a, José Antonio Fabelo Falcón^a

^aDepartamento de Ingeniería Química. Facultad de Química y Farmacia.
Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Carretera a Camajuaní Km 5 ½ Santa Clara.
CP 54830, Villa Clara, Cuba.

Determination of the influence of operating variables in the neutralization of textile wastewater with CO₂

Determinació de la influència de variables d'operació en la neutralització de les aigües residuals tèxtils amb CO₂

RECEIVED: 17 MARCH 2022; ACCEPTED: 20 FEBRUARY 2023; [HTTPS://DOI.ORG/10.55815/417974](https://doi.org/10.55815/417974)

ABSTRACT

Strong acids are commonly used for the neutralization of basic waters, although they generate problems, such as corrosion of the equipment, high reactivity. Studies have been conducted to use compressed CO₂ for this purpose. This research aims to determine the influence of operating variables in the neutralization of textile wastewater with CO₂. An experimental study was carried out at the laboratory level and the behavior of the pH was evaluated. Statistical methods of data analysis were applied. The pH model = 12,6962 – 0,00903125*Agitation + 0,00254375*Pressure*Agitation – 1,61875*Pressure + 0,000168125*Temperature*Agitation – 0,107125*Temperature + 0,026875*Temperature*Pressure – 0,000046875*Temperature*Pressure*Agitation explains the relationship between pH and the variables studied as well as their interactions. The residual water studied presents characteristics that allow its neutralization with the use of CO₂. An increase in pressure favors a decrease in pH, this being the variable that most influences the neutralization process. An increase in temperature, in the range studied, favors the reaction without a notable decrease in the solubility of CO₂. The pH decreases with increasing agitation and this effect prevails over the effects caused by the interactions generated between pressure and agitation as well as temperature and agitation, manifested by the coefficients expressed in the model.

Key words: carbon dioxide, textile, operational variables



RESUMEN:

Comúnmente se emplean ácidos fuertes para la neutralización de aguas básicas, aunque generan problemas, como corrosión de equipos, alta reactividad. Se han realizado estudios para usar CO₂ comprimido con ese fin. Con esta investigación se persigue determinar la influencia de variables de operación en la neutralización de las aguas residuales textiles con CO₂. Se realizó un estudio experimental a nivel de laboratorio y se evaluó el comportamiento del pH. Se aplicaron métodos estadísticos de análisis de datos. El modelo pH = 12,6962 – 0,00903125*Agitación + 0,00254375*Presión*Agitación – 1,61875*Presión + 0,000168125*Temperatura*Agitación – 0,107125*Temperatura + 0,026875*Temperatura*Presión – 0,000046875*Temperatura*Presión*Agitación explica la relación entre el pH y las variables estudiadas así como sus interacciones. El agua residual estudiada presenta características que permiten su neutralización con el empleo del CO₂. Un aumento de la presión favorece la disminución del pH, siendo esta la variable que más influye en el proceso de neutralización. Un aumento de temperatura, en el rango estudiado, propicia la reacción sin disminución notable de la solubilidad del CO₂. El pH disminuye al aumentar la agitación y este efecto prevalece sobre los efectos causados por las interacciones generadas entre la presión y la agitación así como la temperatura y la agitación, manifestado por los coeficientes expresados en el modelo.

Palabras Clave: dióxido de carbono, textilera, variables operacionales

*Corresponding author: marbona@uclv.cu

RESUM:

Comunament s'utilitzen àcids forts per a la neutralització d'aigües bàsiques, encara que generen problemes, com ara corrosió d'equips, alta reactivitat. S'han realitzat estudis per utilitzar CO_2 comprimit amb aquesta finalitat. Amb aquesta investigació es vol determinar la influència de variables d'operació en la neutralització de les aigües residuals tèxtils amb CO_2 . Es va fer un estudi experimental a nivell de laboratori i es va avaluar el comportament del pH. Es van aplicar mètodes estadístics d'anàlisi de dades. El model $\text{pH} = 12,6962 - 0,00903125 * \text{Agitació} + 0,00254375 * \text{Pressió} * \text{Agitació} - 1,61875 * \text{Pressió} + 0,000168125 * \text{Temperatura} * \text{Agitació} - 0,107125 * \text{Temperatura} + 0,00046875 * \text{Temperatura} * \text{Pressió} * \text{Agitació}$ explica la relació entre el pH i les variables estudiades així com les seves interaccions. L'aigua residual estudiada presenta característiques que permeten neutralitzar-les amb l'ús del CO_2 . Un augment de la pressió afavoreix la disminució del pH, i aquesta és la variable que més influeix en el procés de neutralització. Un augment de temperatura, al rang estudiat, propicia la reacció sense disminució notable de la solubilitat del CO_2 . El pH disminueix en augmentar l'agitació i aquest efecte preval sobre els efectes causats per les interaccions generades entre la pressió i l'agitació, així com la temperatura i l'agitació, manifestat pels coeficients expressats al model.

Paraules clau: diòxid de carboni, tèxtil, variables operacionals

INTRODUCCION

Una de las características químicas más importantes para determinar la calidad e idoneidad de las aguas es el pH. En la actualidad el agotamiento de los recursos hídricos es un problema inminente, ya que la demanda aumenta continuamente en todo el mundo y esos recursos son cada vez más escasos¹. En las últimas décadas se han desarrollado muchos procesos tecnológicos de eliminación de contaminantes para tratar las aguas residuales textiles. Los procesos de tratamiento se eligen en base a la composición, características y concentración del material presente en los efluentes².

Los efluentes vertidos de las fábricas textiles son una mezcla de tintes, metales y otros contaminantes. Debe señalarse que los efluentes de los procesos de teñido y estampado de la industria textil son altos en color, pH, sólidos en suspensión, demanda química de oxígeno, demanda bioquímica de oxígeno³.

Uno de los métodos más comunes para la neutralización de aguas básicas es la utilización de ácidos fuertes, pero los mismos generan problemas, como sobre acidificación del efluente, corrosión de equipos, alta reactividad. Por lo tanto actualmente se han realizado estudios para emplear CO_2 comprimido con ese fin. El CO_2 puede provenir de diversas fuentes⁴.

En la literatura, la cinética de la reacción $\text{CO}_2 + \text{OH}^- \rightarrow \text{HCO}_3^-$ generalmente se describe usando una reac-

ción irreversible de segundo orden que aparece en el ecuación 1.

$$r = k_1 * c(\text{CO}_2) * c(\text{NaOH}) \quad (1)$$

donde todos los posibles efectos de no idealidades se agrupan en la constante de velocidad de reacción k_1 . Este enfoque es suficiente para representar los datos experimentales de un solo estudio específico⁵.

El reactor constituye el corazón de una planta química y su comportamiento puede incidir tanto en la selectividad como en el rendimiento y por tanto en la calidad y economía de los productos obtenidos. Los reactores químicos según la forma de operación se clasifican en tres tipos: reactor discontinuo, continuo y semicontinuo. Los reactores discontinuos son aquellos que trabajan por cargas, y se espera un tiempo dado, que viene determinado por la cinética de la reacción y el volumen del reactor, tras el cual se extrae el producto, no tiene ni flujo de entrada ni flujo de salida de reactivos o productos mientras la reacción se lleva a cabo⁶. Cuando la estequiometría de la reacción está bien definida y se conocen los datos termodinámicos y cinéticos, los métodos clásicos de ingeniería permiten la determinación de la estrategia óptima para fijar las condiciones de operación del reactor. Para reacciones complejas o procesos nuevos, estos datos son raramente disponibles. En este caso resulta de interés determinar un algoritmo que permita construir un modelo estequiométrico y cinético, conociendo únicamente las composiciones iniciales y finales. Entre las funciones principales de un reactor está permitir condiciones de presión, temperatura y composición de modo que la reacción tenga lugar en el grado y a la velocidad deseada, atendiendo a los aspectos termodinámicos y cinéticos de la reacción⁷.

Para encontrar la influencia de la temperatura, la presión y la agitación en la reacción de neutralización de determinadas aguas residuales textiles con CO_2 (g), cuya cinética se desconoce, se requiere realizar un estudio experimental y con ello facilitar el diseño posterior del reactor.

El objetivo de este trabajo es determinar la influencia de variables de operación en la neutralización de las aguas residuales textiles con CO_2 (g).

MATERIALES Y MÉTODOS

Materiales empleados

Se empleó agua residual, obtenida por muestreo en la planta de tratamiento de residuales líquidos de la textilera. Las muestras fueron compuestas, tomándose a intervalos de 1 hora durante 8 horas de trabajo. Al agua se le realizó una caracterización de parámetros físicos y químicos. Los procedimientos analíticos utilizados para la caracterización se llevaron a cabo mediante las técnicas que se reportan por Baird y Eaton⁸. Para realizar los ensayos de neutralización se empleó CO_2 (g) suministrado por la Empresa Gases Industriales de Cuba.

La instalación experimental constó de un reactor discontinuo enchaquetado de vidrio (1), con un volumen de 2 litros, al cual se acopló un termostato Termostato “mlw-U15” (2), con el objetivo de regular la temperatura de la reacción de forma que garantice las condiciones isotérmicas para cada experimento. Mediante un termómetro (3) introducido en el reactor se verificó el valor de la temperatura en cada ensayo. Se empleó un difusor (4) para burbujear el gas y un agitador de paletas (5). Estos dispositivos permiten lograr un mejor mezclado de los reaccionantes⁹ y la difusión del CO₂ de forma que se disminuyan los defectos de mezclado, aguas muertas, vórtice. A través de una válvula (6) se controló el paso del CO₂, almacenado en un cilindro (7) hacia el reactor. La medición de la presión se llevó a cabo utilizando un manómetro GENEBRE (8) con una escala comprendida entre 0 y 6 bar. Se midió el pH de la disolución mediante un pH-metro “HANNA” (9). En la figura 1 se muestra un esquema de la instalación.

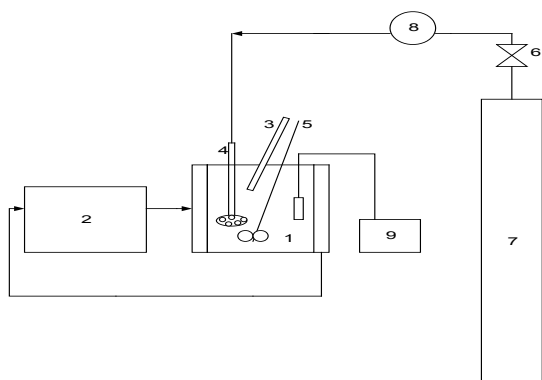


Figura 1. Esquema de la instalación experimental

a) Selección de las variables de operación

Según Levenspiel¹⁰ y Matos¹¹, la temperatura es una variable influyente en las reacciones químicas y se debe considerar entre las seleccionadas para el estudio de los parámetros de operación de los reactores.

Se partió de considerar como valor mínimo 30 °C de temperatura porque las aguas residuales ingresan a la planta de tratamiento con valores entre 35 y 40 °C y los valores de temperatura promedios anuales de la localidad no sobrepasan los 30°C. Se seleccionó como valor máximo 50 °C teniendo en cuenta que la solubilidad del CO₂ (g) disminuye al aumentar la temperatura, según Speight¹² por lo que un incremento de la temperatura del sistema conlleva gastos de operación innecesarios. La cantidad de CO₂ disuelta en agua depende de la presión parcial de este gas en la fase gaseosa. Por tanto, de acuerdo con la ley de Henry, la cantidad de gas disuelto en la solución es directamente proporcional a la presión del gas sobre la solución.

La presión debe ser menor de 5,2 bar¹³ para que el CO₂ se encuentre en estado gaseoso a la temperatura de trabajo y pueda ser burbujeadado al reactor. Se seleccionó el intervalo entre 1 (mínimo) y 3 bar (máximo) porque presiones elevadas implican un equipamiento más costoso¹⁴.

Para seleccionar la velocidad de agitación se tuvo en cuenta que con agitador de paleta y un valor mínimo 200 rpm se obtiene un tiempo de mezclado de 0,48

minutos y para un valor máximo de 600 rpm se obtiene un tiempo de mezclado de 0,16 minutos¹⁵.

Se realizó un diseño de experimentos 2³, para considerar las variables temperatura, presión y agitación cada una en sus niveles máximos y mínimos. La variable respuesta es el pH del agua residual el cual debe alcanzar un valor en el intervalo entre 6,8 y 7,1 para que sea aceptable el tratamiento de neutralización que precede al paso del agua al tratamiento biológico¹⁶. Se considera que las aguas residuales de la textilera objeto de estudio presentan un pH que fluctúa en el intervalo de 9 a 10 como promedio (de acuerdo a los datos históricos en los últimos cinco años), en dependencia de las producciones que se lleven a cabo en los procesos tecnológicos principales.

b) Procesamiento estadístico

Se utilizó el programa Statgraphic versión 5.1 para realizar el análisis de los datos obtenidos y determinar los parámetros descriptivos tales como la media y la desviación típica. Con el empleo de este programa se obtuvo el modelo de regresión múltiple para correlacionar el pH, que es la variable respuesta, con la presión, la temperatura, la agitación y sus posibles interacciones. Se utilizó el programa SPSS Statistics versión 20 para determinar si los datos presentaban o no una distribución normal. Además se empleó este programa para corroborar la validez del programa obtenido.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización del agua residual.

En la textilera donde se realizó la investigación se produce fundamentalmente tejido poliéster algodón (PE-CO), se emplean colorantes dispersos y reactivos para el teñido. Entre los primeros se encuentran: Bemacrón Rubí RS, SynolonYellow SE-4G y Synolon Black SE- NF. Los del tipo reactivo más usados son: Synocrón Brown PGR, SynocrónNavy Blue P-2R y Triactiveyellow P-5 GN. Por los aportes contaminantes de la sección de teñido, esta fue estudiada de manera individual y en la tabla 1 se reportan los valores obtenidos¹⁷.

Tabla 1. Caracterización de las aguas residuales de la sección de teñido.

Parámetros	Valores determinados
pH	9,95
Conductividad ms/cm	2,12
DQO (mg/L)	1689
DBO ₅ (mg/L)	1000

Las corrientes residuales del proceso de teñido se mezclan con otras corrientes provenientes del taller de blanqueo, estampado y acabado final y otras secciones de la propia industria, lo que propicia la dilución de los contaminantes. Desde el 2010 se ha mantenido, en lo esencial, el mismo esquema tecnológico en la textilera objeto de estudio y las aguas residuales presentan

características de pH alrededor de 9. En caso de que el pH difiriera de este valor sería necesario evaluar las cantidades de CO₂ que se requerirían para las nuevas condiciones operacionales, lo cual no es necesario actualmente. Al realizar la caracterización del agua residual se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 2¹⁸.

Tabla 2. Características de las aguas residuales utilizadas.

Parámetros	Valor
pH	9,0
Conductividad Eléctrica (µs/cm ²)	1 235
Temperatura (°C)	35
Sólidos sedimentables (mg/L)	1
DBO ₅ (mg/L)	250
DQO de reflujo (mg/L)	424
Nitrógeno total (mg/L)	63
Fósforo total	0,28
Sólidos Suspendedos Totales (SST) (mg/L)	25
Sólidos Suspendedos Volátiles (SSV) (mg/L)	7
Sólidos Suspendedos Fijos (SSF) (mg/L)	18
n-Hexano (mg/L)	8

Se realiza mercerizado con hidróxido de sodio (sosa cáustica)¹⁷. El valor de pH medido está dado fundamentalmente por la presencia de NaOH en las aguas residuales debido al uso de esta sustancia en los procesos de blanqueo y mercerizado que se llevan a cabo. Además, el tintado del algodón se realiza con un pH de entre 9,5 y 11, este pH se consigue con Na₂CO₃ y/o NaOH¹⁹. Los valores de DQO y DBO₅ indican que el residual es biodegradable y se asocian a la presencia de sustancias como los compuestos azoicos presentes en los colorantes y que no se fijan totalmente al tejido. Los resultados obtenidos relacionados con la generación de gran cantidad de efluentes contaminados por colorantes, auxiliares químicos y sólidos suspendidos en el teñido han sido reportados^{20,21}.

Resultados de las mediciones experimentales.

En la tabla 3 se reflejan los resultados experimentales considerando los dos niveles (máximo y mínimo) para las tres variables (temperatura, presión y agitación).

Los experimentos reportados indican una disminución del pH inicial del agua residual (9,0) a valores cercanos a la neutralidad. En 21 de los 24 ensayos se lograron valores en el intervalo entre 6,47 y 7,01, lo cual evidencia un resultado favorable del empleo del CO₂ para neutralizar las aguas residuales tratadas.

Cuando el CO₂ se disuelve en agua forma ácido carbónico (que es un ácido débil soluble). El sistema tiene un efecto de auto- tampón, al no destruir alcalinidad,

evita los efectos nocivos de la sobre acidificación, siendo muy difícil llegar a valores de pH excesivamente bajos, aunque se prolongue el tiempo de reacción. Para alcanzar la neutralización deseada en esta investigación, considerando los límites de las variables fijadas, no es necesario una interacción prolongada de los reactivos. Se pudo comprobar, con el empleo del medidor de pH, que en cada experimento el agua residual sometida a la reacción con CO₂ alcanzó un valor final de pH homogéneo que satisface los requerimientos para la próxima etapa del proceso de tratamiento de aguas residuales (la etapa biológica).

Tabla 3. Resultados experimentales al cabo de 2 s de reacción.

Temperatura (°C)	Presión (atm)	Agitación (rpm)	pH
30	1	200	8
30	1	200	8,2
30	1	200	8,1
30	3	200	6,91
30	3	200	6,95
30	3	200	6,93
30	1	600	7,01
30	1	600	6,92
30	1	600	6,95
30	3	600	6,65
30	3	600	6,66
30	3	600	6,79
50	1	600	6,81
50	1	600	6,86
50	1	600	6,76
50	3	600	6,5
50	3	600	6,51
50	3	600	6,49
50	1	200	6,97
50	1	200	6,99
50	1	200	6,98
50	3	200	6,55
50	3	200	6,51
50	3	200	6,47

Procesamiento estadístico de los resultados.

Los resultados que aparecen en la tabla 3 fueron procesados con el Statgraphics 5.1 y se obtuvo una media de 6,94 y una desviación típica de 0,49.

Se halló el modelo de regresión múltiple considerando la interacción entre las variables, el cual se expresa en la ecuación 2. El modelo describe la relación entre pH y 7 variables independientes, ya que además de las variables temperatura (T), presión (P) y agitación (A) se tuvo en cuenta la interacción entre la presión y la agitación (PA), la temperatura y la agitación (TA), la temperatura y la presión (TP) y entre las tres variables (TPA).

$$\text{pH} = 12,6962 - 0,00903125 * A + 0,00254375 * P * A - 1,61875 * P + 0,000168125 * T * A - 0,107125 * T + 0,026875 * T * P - 0,000046875 * T * P * A(2) \quad (2)$$

Existe relación estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 99% pues el p-valor en la tabla ANOVA es inferior a 0,01. El estadístico R-cuadrado indica que el modelo explica un 99,15% de la variabilidad en pH. El estadístico R-cuadrado ajustado, que es más conveniente para comparar modelos con diferentes números de variables independientes, es 98,79%. El error estándar de la estimación muestra la desviación típica de los residuos que es 0,053.

Comprobación del ajuste de los datos a una distribución normal.

Se realizaron pruebas de hipótesis, donde la hipótesis nula (H_0) fue que la distribución del pH es normal y la hipótesis alternativa (H_1), la distribución del pH no es normal. Estas pruebas se llevaron a cabo tanto para los valores de pH experimentales, como para los calculados por el modelo. Los valores de sigma obtenidos fueron de 0,017 y 0,008 para los datos de pH experimentales y los calculados a través del modelo matemático, respectivamente. Dichos valores son menores que 0,05, para cada prueba realizada, por lo que el resultado es significativo y se rechaza la hipótesis nula, lo que quiere decir que las variables no responden a una distribución normal.

Validación del modelo estadístico.

Como los datos de pH no tienen una distribución normal, para comprobar la validez del modelo se realizaron pruebas no paramétricas, con el empleo del programa SPSS,

Se realizó una prueba de comparación de dos poblaciones relacionadas (pH experimental y pH calculado por el modelo), donde se consideró como:

H_0 : La mediana de las diferencias entre las muestras es igual a cero

H_1 : La mediana de las diferencias entre las muestras es diferente de 0.

Al realizarse el Test de Wilcoxon, que se obtiene un nivel de significación superior a 0,05 (0,797) por lo que se acepta la hipótesis nula, lo que quiere decir que no hay diferencias significativas entre los datos reales y los datos que aporta el modelo matemático.

Análisis de la influencia de las variables de operación a partir del modelo obtenido.

El modelo obtenido expresa que la presión es la variable más influyente en la disminución del pH del sistema estudiado, al aumentar la presión disminuye el pH debido a que el CO_2 suministrado se disuelve con más facilidad y reacciona con iones hidroxilos presentes en el agua residual. El coeficiente de la variable presión según el modelo es 1,61875, precedido de un signo negativo, lo que indica que al incrementarse la presión disminuye el pH. De todos los coeficientes obtenidos este es el de mayor valor modular. La solubilidad de los gases en los líquidos no solo depende de la temperatura, además, está afectada por la presión parcial del gas sobre el líquido en el que se disuelve. Se pudo demostrar que la cantidad de CO_2 disuelto está en función de condiciones de operación, en correspondencia con lo planteado en la literatura²².

La temperatura resulta también una variable influyente en la disminución del pH, es decir en la neutralización del agua residual. A medida que aumenta la temperatura el pH decrece, ya que aumenta la velocidad de la reacción entre el CO_2 y el agua residual. La velocidad de la reacción depende de la naturaleza de los reaccionantes, de la temperatura y de la concentración. Cuando se fija la naturaleza de los reaccionantes y la concentración de ellos entonces se evidencia la relación de la temperatura mediante la ecuación de Arrhenius. Una mayor temperatura implica una mayor energía cinética de las moléculas, por lo que aumentará la probabilidad de que las colisiones sean efectivas, es decir que se den con la energía necesaria para que ocurra la transformación de reaccionantes en productos.

Para el CO_2 (g), a medida que la temperatura aumenta, la solubilidad disminuye. La teoría molecular cinética se puede utilizar para explicar este fenómeno. El modelo indica que debe tenerse en cuenta la interacción entre la temperatura y la presión ya que el coeficiente determinado es 0,026875. Estas variables deben mantenerse en rangos moderados que permitan la solubilidad del CO_2 y que la reacción ocurra sin provocar un efecto adverso, ya que el aumento de ambas de forma simultánea causa un incremento del pH. El proceso de disolución del CO_2 en el agua residual es exotérmico.

La agitación también es una variable que impacta en el valor de pH. Un aumento de la misma favorece la reacción y con ello la disminución del pH. Se corroboró que las reacciones químicas en un depósito agitado donde los reactivos están presentes en más de una fase (líquidos, gaseosos o sólidos) requieren un contacto interfacial intensivo para facilitar una transferencia de masa óptima. En este caso con el uso de un mezclador y un dispersor se logró un adecuado contacto entre las fases. La potencia mecánica que transfiere la interacción del agitador con el fluido es vital. Influye en el grado de dispersión de las distintas fases y la correspondiente transferencia de masas entre ellas, tal y como se ha planteado²³.

El pH decrece al aumentar la agitación (según el coeficiente – 0,00903125 del modelo matemático) y esta influencia es mayor que los efectos causados por las interacciones generadas entre la presión y la agitación (cuyo coeficiente es 0,00254375) así como la temperatura y la agitación (con un coeficiente de 0,000168125).

CONCLUSIONES

El agua residual estudiada presenta características que permiten su neutralización con el empleo del gas dióxido de carbono.

Un aumento de la presión favorece la disminución del pH, siendo esta la variable que más influye en el proceso de neutralización.

Un aumento de temperatura, en el rango estudiado, propicia la reacción sin disminución de la solubilidad notable.

El pH disminuye al aumentar la agitación y esta influencia prevalece sobre los efectos causados por las interacciones generadas entre la presión y la agitación

así como la temperatura y la agitación, manifestado por los coeficientes expresados en el modelo.

AGRADECIMIENTOS

A los trabajadores de la Unidad Básica “Desembarco del Granma” de Santa Clara, Cuba, por la colaboración brindada para la realización de esta investigación.

BIBLIOGRAFÍA

1. Hyung, R.;Hyunjoon, K.; Lee, B. Mathematical modelling of sustainable waste water reuse networks considering CO₂ emissions. *Revista Korean Journal of Chemical Engineering*. 2017, Vol. 34, No.10, pp. 2648-2661.
2. Mostafa, M. Waste water treatment in textile Industries - the concept and current removal technologies. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*. 2015,pp. 501-525.
3. Yaseen, D.; Scholz, M. Textile dye wastewater characteristics and constituents of synthetic effluents: a critical review.*International Journal of Environmental Science and Technology*.Manchester. 2018, pp. 1-35.
4. Galindo, M.; Suanca, D. Evaluación técnica y financiera de la inyección de CO₂ como método de recobro mejorado en el segmento-e del campo norte por medio de un modelo semi-analítico, proyecto integral de grado para optar por el título de Ingeniero de Petróleos, Fundación Universidad de América, 2019.
5. Haubrock, J.; Hogendoorn, A.; Geert, F. The applicability of activities in Kinetic Expressions: a more fundamental approach to represent the Kinetics of the SystemCO₂-OH⁻insalt terms of activities. *International Journal of Chemical Reactor Engineering*. 2007, Vol. 62, pp. 5763-5769.
6. Leal, A. *Simulación de proceso de un reactor discontinuo para la elaboración de urea*, Universidad de Guayaquil, 2021.
7. Peña, E.; Pérez, A.; Miranda, A.; Sánchez, J. Modelado de un reactor químico tipo CSTR y evaluación del control predictivo aplicando Matlab-Simulink. *Revista Ingeniería UC*. 2008, Vol. 15, No. 3, pp. 97-112.
8. Baird, R.; Eaton, A. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Edición No. 23, 2017.
9. Castillo, V.; Diseño y cálculo de un agitador de fluidos. Seminario presentado para obtener el título de Ingeniero de Ejecución en Mecánica, Chile, 2013.
10. Levenspiel, O. *Ingeniería de las reacciones químicas*, tercera edición; LimusaWiley: México, 2004.
11. Matos, R. *Aspectos fundamentales de la Química Física*; Editorial Pueblo y Educación: La Habana, Cuba, 1986, pp. 181-216.
12. Speight, J.;*Chemical and Process Design Handbook*;McGraw-Hill: New York, 2002.
13. Perry, C. *Manual del ingeniero químico*, sección 3, 6ta edición; Mc Graw-Hill: New York, 1992.
14. Ulrich, G. *Diseño y economía de los procesos de Ingeniería Química*; Editorial McGraw Hill, Primera edición, 1985, pp. 308-310.
15. Rosabal, J., *Hidrodinámica y Separaciones Mecánicas*, tomo II; Editorial Pueblo y Educación: La Habana, Cuba, 2006, pp. 277-278
16. Díaz. R. *Tratamiento de aguas y aguas residuales*; Editorial Pueblo y Educación:Ciudad de la Habana,Cuba, 2006, pp. 309-312.
17. Arbona, M. Propuesta de medidas de producciones más limpias en el teñido del tejido poliéster- algodón, tesis presentada en opción al grado de Ingeniera Química, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, Cuba, 2017.
18. Arbona, M. Propuesta tecnológica para reducir el impacto sobre la calidad del aire de los procesos auxiliares de combustión en la UB “Desembarco del Granma”, tesis presentada en opción al grado de máster en Ingeniera Química, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Santa Clara, Cuba, 2019.
19. Texvi. *Fichas tecnológicas para el teñido a la continua de tejidos de pe/vi, pe/co y co*.Santa Clara, Cuba, 2015.
20. Morillo, S. Propuesta de producción más limpia (P+L) en el proceso de tinturado, en la industria “Textiles María Belén” ubicada en el Distrito Metropolitano de Quito, tesis presentada en opción alTítulo de Ingeniera Ambiental Grado Académico de Tercer Nivel de formación, Universidad Central del Ecuador, 2012.
21. Hussain, S.; Govindarajan, B.; Kandhaswamy, R.; Maruthamuthu, N.Innovative Approach for Reuse of Concentrate Brine in Textile Dyeing Zero Liquid Discharge Plants the Arulpuram CETP, Tirupur Case Study, pp. 71-96, *Colloquium on Textile Wastewater Management*, India,2018.
22. Bouatay, F.;Boussaid, S. Drira N.;Mhenni, M. Neutralization of textile wastewater using carbon dioxide.International Journal of applied research on textile, Vol. 3, 2015, pp. 22-31, <http://atctex.org/ijartex>
23. Paul, E.; Atiemo-Obeng, V.; Kresta, S. Handbook of industrial mixing science and practice, primer-aedición; John Wiley & Sons: EstadosUnidos, 2004.