

Artículo Original

**DETERMINACIÓN DE LA VIABILIDAD DE UTILIZACIÓN DE
REACTOR EXISTENTE EN UNA TEXTILERA PARA LA
NEUTRALIZACIÓN DEL AGUA RESIDUAL**

**DETERMINATION OF THE FEASIBILITY OF USING THE EXISTING
REACTOR IN A TEXTILE FACTORY FOR THE
NEUTRALIZATION OF WASTEWATER**

Mercedes Arbona Cabrera^{1*} <https://orcid.org/0000-0003-1096-7648>

Isabel Cabrera Estrada¹ <https://orcid.org/0000-0002-5307-1502>

José Antonio Fabelo Falcón¹ <http://orcid.org/0000-0002-2144-6701>

María de los Ángeles García Hernández² <https://orcid.org/0000-0002-4361-8850>

Yuney Quiala Armenteros³ <https://orcid.org/0000-0002-1780-4246>

¹ Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

² Dirección Técnica y de Mantenimiento Industrial. UB "Desembarco del Granma". Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

³ Oficina de Regulación y Seguridad Ambiental. CITMA. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Febrero 2, 2024; Revisado: Marzo 30, 2024; Aceptado: Mayo 6, 2024

RESUMEN

Introducción:

En el tratamiento del agua residual en la textilera "Desembarco del Granma" existe una cisterna de neutralización, que se asemeja a un reactor continuo con agitación. En dicho equipo se emplea H₂SO₄, el cual debe ser sustituido por un agente químico con un impacto menor sobre el medio ambiente.

Objetivo:

Determinar la viabilidad de la utilización de reactor existente en la textilera "Desembarco del Granma" para la neutralización del agua residual al emplear CO₂.

Materiales y Métodos:

Se compararon los reactores continuos con agitación a nivel de laboratorio e industrial, donde se consideró el criterio de similitud geométrica. Se utilizó el programa Aspen



Este es un artículo de acceso abierto bajo una Licencia *Creative Commons* Atribución-No Comercial 4.0 Internacional, lo que permite copiar, distribuir, exhibir y representar la obra y hacer obras derivadas para fines no comerciales.

* Autor para la correspondencia: Mercedes Arbona, Email: marbona@uclv.cu



Plus para simular el reactor industrial, considerando la cinética obtenida a nivel de laboratorio. El paquete de fluidos seleccionado fue el UNIQUAC.

Resultados y Discusión:

La velocidad en la punta del impulsor es igual para ambos reactores y la relación entre el diámetro del impelente y el del tanque se mantiene prácticamente constante, hay similitud geométrica entre los reactores. El pH del agua residual neutralizada con CO₂ fue 7,2, manifestando una adecuada neutralización.

Conclusiones:

Se evidenció similitud geométrica entre los reactores continuos con agitación a nivel de laboratorio e industrial. El pH del agua residual neutralizada en el reactor industrial, determinado por simulación fue de 7,2. Se comprobó, con el empleo del Aspen Plus, que el reactor industrial de la textilera se puede usar para el proceso de neutralización del agua residual cuando se emplee CO₂ en lugar de H₂SO₄.

Palabras clave: agua residual; reactor; similitud geométrica; simulación.

ABSTRACT

Introduction:

In the treatment of waste water at the “Desembarco del Granma” textile factory there is a neutralization tank, which resembles a continuous reactor with agitation. This equipment uses H₂SO₄, which must be replaced by a chemical agent with a lower impact on the environment.

Objective:

To determine the viability of using the existing reactor at the “Desembarco del Granma” textile factory for the neutralization of residual water when using CO₂.

Materials and Methods:

Continuous stirred reactors were compared at laboratory and industrial levels, where the criterion of geometric similarity was considered. The Aspen Plus program was used to simulate the industrial reactor, considering the kinetics obtained at the laboratory level. The fluid package selected was the UNIQUAC.

Results and Discussion:

The speed at the tip of the impeller is the same for both reactors and the relationship between the diameter of the impeller and that of the tank remains practically constant, so there is geometric similarity between the reactors. The pH of the residual water neutralized with CO₂ was 7.2, showing adequate neutralization.

Conclusions:

Geometric similarity was evidenced between continuous stirred reactors at laboratory and industrial levels. The pH of the neutralized wastewater in the industrial reactor, determined by simulation, was 7.2. It was proven, with the use of Aspen Plus, that the textile company's industrial reactor can be used for the wastewater neutralization process when CO₂ is used instead of H₂SO₄.

Keywords: wastewater; reactor; geometric similarity; simulation.

1. INTRODUCCIÓN

La investigación se desarrolló en la textilera “Desembarco del Granma” donde, para depurar el agua residual, se usa un proceso que involucra etapas físicas, químicas y biológicas conocido como tratamiento por lodos activados. La planta cuenta con la cisterna de neutralización, en la que se controla el pH del agua residual, para lo cual se añade ácido sulfúrico, según la reacción $H_2SO_4 + 2NaOH \rightarrow Na_2SO_4 + 2H_2O$. La adición del mismo se hace de forma automática por medio del control de pH, el cual lo mide y envía la señal al panel de control y ordena arrancar o parar la bomba según sea el pH observado. Es importante lograr un pH igual a siete pues es la mejor condición para la vida de los microorganismos, según lo reportado por Díaz, (2006) y (Waseem y col., 2023).

El ácido sulfúrico es corrosivo y puede producir graves quemaduras en los ojos, la piel e irritar las mucosas. En contacto con productos orgánicos los deshidrata y carboniza, llegando en ocasiones a incinerarlos. Es considerado un agente tóxico para la vida acuática. En el suelo puede disolver algunos minerales, deteriorando las características de este (Uibu y col., 2008). Teniendo en cuenta las características negativas del ácido sulfúrico, anteriormente expuestas, se hace necesario sustituirlo por un agente químico con un impacto menor sobre el medio ambiente, que permita la neutralización de manera efectiva, como es el dióxido de carbono. Además, el manejo inadecuado del ácido puede provocar sobreacidificación del agua tratada efluente, efecto que no tiene lugar cuando se neutraliza con CO_2 (Pichler y col., 2020). La propiedad de autoamortiguación garantiza que el agua dosificada con CO_2 cause un daño mínimo a la vida vegetal y animal en caso de que se rompa la tubería de agua o se enjuague el sistema. Con esta variante de emplear el CO_2 generado en las fuentes fijas de la textilera se contribuirá a disminuir el impacto de este gas de efecto invernadero, pues se ha planteado, por diferentes autores, que el mecanismo clave para mitigar el efecto invernadero es reducir considerablemente las emisiones de CO_2 a la atmósfera (Liu y col., 2021, Mahmoudkhani y Keith, 2009).

La reacción de neutralización de las aguas residuales de la textilera “Desembarco del Granma” con CO_2 fue estudiada, (Arbona y col., 2022). Sin embargo, se requiere contar con un equipamiento para la ejecución de esta reacción, por lo que esta investigación tiene como objetivo determinar la viabilidad de la utilización de reactor existente en la textilera “Desembarco del Granma” para la neutralización del agua residual al emplear CO_2 .

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En la textilera “Desembarco del Granma” hay un reactor que responde al modelo de reactor continuo con agitación, que es usado actualmente en la etapa de neutralización para el tratamiento de residuales líquidos. Se requirió determinar si ese equipo existente podía mantener su función cuando se sustituya el ácido sulfúrico por dióxido de carbono. Para ello se llevó a cabo la comparación entre el reactor industrial y el empleado para el desarrollo de los experimentos a nivel de laboratorio teniendo en cuenta el criterio de similitud geométrica, donde se consideró la velocidad en la punta del impulsor y la relación entre el diámetro del impelente y el diámetro del tanque en

cuestión. Los agitadores de ambos reactores son de tipo paleta.

En la Tabla 1 se muestran las características de los reactores de laboratorio e industrial estudiados.

Tabla 1. Características de los reactores comparados

<i>Equipo</i>	<i>Reactor del laboratorio</i>	<i>Reactor industrial</i>
N: velocidad de agitación (rpm)	200	5
d: diámetro del impelente (m)	0,05	2
D: diámetro del tanque (m)	0,16	6,5

Para determinar la velocidad en la punta del impulsor se utilizó la ecuación 1, según lo reportado (Pérez y col., 2011).

$$\text{velocidad en la punta del impulsor} = N \times d \quad (1)$$

La efectividad del mezclado en el equipo industrial está determinada por el tiempo de mezclado requerido, la potencia empleada y las propiedades del producto. Cuando se mezclan fluidos de baja viscosidad se obtienen productos de elevada homogeneidad. Es necesario garantizar una adecuada potencia de agitación para evitar zonas muertas en el reactor. La misma depende del diámetro del impelente y de la velocidad de agitación.

También se calculó la relación entre el diámetro del impelente y el diámetro del tanque por la ecuación 2.

$$\text{relación entre diámetro del impelente y diámetro del tanque} = \frac{d}{D} \quad (2)$$

Se realizó la simulación, con el empleo del Aspen Plus (versión 10), para las condiciones industriales de operación teniendo en cuenta la cinética obtenida a nivel de laboratorio, (Arbona y col., 2022), la cual se expresa en la ecuación 3.

$$-\frac{dc(OH^-)}{dt} = 978\,532,58 \times e^{\frac{24\,508,60}{8,31 \times T}} \times C_{OH^-} \times C_{CO_2} \quad (3)$$

Donde:

C_{CO_2} : concentración de CO_2 (mol/L)

C_{OH^-} : concentración de NaOH (mol/L)

T: temperatura (K)

$-dc(OH^-)/dt$: velocidad de la reacción (mol/(L x s))

Para trabajar con el Aspen Plus se requiere introducir los componentes que participan en la reacción. Se escogió el CO_2 y el agua residual compuesta fundamentalmente por NaOH debido a que se usa esta sustancia en los procesos de blanqueo y mercerizado que se llevan a cabo en la textilera en cuestión según lo planteado por González, (2019). Teniendo en cuenta la naturaleza del CO_2 y las características básicas del agua residual textil, la reacción de neutralización $CO_2 + 2NaOH \rightarrow Na_2CO_3 + H_2O$ es la etapa controlante del proceso porque la solubilidad del CO_2 es alta y el equilibrio en la

interfase puede ser descrito por la ley de Henry, según se ha planteado (Contamine y col., 2012), (Gondal y col., 2015), (Liu y col., 2021), (Liu y col., 2022). La reacción se puede identificar como una reacción bimolecular irreversible de segundo orden, que responde a la forma $A + 2B \rightarrow P$ teniendo en cuenta lo reportado por Levenspiel, (2004) y (Arbona y col., 2022).

El paquete de fluidos seleccionado para la simulación del reactor industrial teniendo en cuenta la cinética obtenida a nivel de laboratorio fue el UNIQUAC, ya que ofrece una buena representación de los equilibrios vapor-líquido y líquido-líquido para sistemas que contienen una variedad de componentes. Además, se incluyeron en el programa la energía de activación de la reacción (24 508 J/mol) y el factor de colisión de 978 532,58 L/(mol s), según lo reportado (Arbona y col., 2022). La temperatura de trabajo fue de 35 °C.

A partir de la información ofrecida por el Aspen Plus de la corriente de salida del reactor, se puede evaluar el pH teniendo en cuenta las ecuaciones 4, 5 y 6.

$$c(OH^-) = \frac{n(OH^-)}{V} \quad (4)$$

$$pOH = -\log(c(OH^-)) \quad (5)$$

$$pH = 14 - pOH \quad (6)$$

Donde:

$n(OH^-)$: cantidad de sustancia de NaOH (mol).

V: volumen de agua residual tratada (L).

pH: índice de acidez.

pOH: índice de basicidad.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Evaluación a través de criterios de similitud para reactores

Al comparar los reactores a nivel de laboratorio e industrial usando el principio de similitud geométrica, se obtuvieron los resultados que aparecen en la Tabla 2, porque ambos responden al modelo continuo con agitación.

Tabla 2. Resultados de la comparación de los reactores continuos con agitación a ambas escalas

<i>Equipo</i>	<i>Reactor del laboratorio</i>	<i>Reactor industrial</i>
N x d	10	10
d/D	0,313	0,307

Como se observa en la Tabla 2, la velocidad en la punta del impulsor es igual para ambos reactores y la relación entre el diámetro del impelente y el diámetro del tanque se mantiene prácticamente constante, lo que evidencia que hay similitud geométrica entre los reactores estudiados.

Los reaccionantes que participan en ambos reactores son los mismos pues la reacción que se verifica es la que ocurre para neutralizar el agua residual de la textilera “Desembarco del Granma” con CO₂. Además, la temperatura de trabajo estará

comprendida entre 30 y 35 °C, por lo que se cumple semejanza química y térmica, las que son posibles lograr manteniendo igual temperatura, pH y tiempo de reacción (Pérez y col., 2011).

3.2 Determinación del pH del agua residual neutralizada en el reactor industrial

Se muestra en la Figura 1 una representación del reactor industrial, simulado con el Aspen Plus.

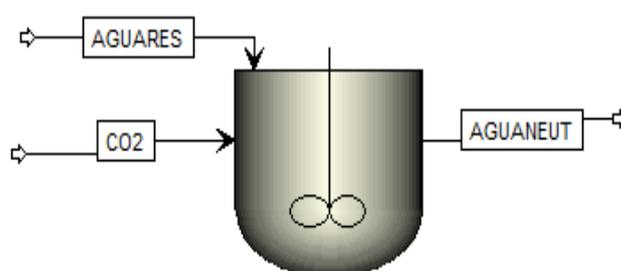


Figura 1. Representación del proceso de neutralización a nivel industrial

Donde:

AGUARES: agua residual afluyente.

CO₂: corriente de dióxido de carbono.

AGUANEUT: agua residual neutralizada con CO₂.

Se determinó la composición de la corriente de salida del reactor y se muestran los resultados en la Tabla 3.

Tabla 3. Composición de la corriente de salida en el reactor industrial, obtenida por simulación

<i>Componente</i>	<i>Masa (kg/h)</i>
Agua	27 046,7
CO ₂	1,07 x 10 ⁻⁶
Carbonato de sodio	275,03
Na ⁺	0,01
OH ⁻	0,085

El programa Aspen Plus reporta la composición de la corriente de salida en función de la cantidad de sustancia de cada una de las especies químicas, la cual resultó de 0,005 mol para los iones OH⁻. La concentración de los iones OH⁻ del agua de salida, calculada por la ecuación 4 fue de 1,79x10⁻⁷ mol/L. El volumen total resultó ser de 27 898 L. El pH del agua residual neutralizada calculado a partir de las ecuaciones 5 y 6 fue 7,2, el cual evidencia que existe una adecuada neutralización con CO₂ bajo las condiciones de trabajo del reactor industrial al estar comprendido en el intervalo 6,8 a 7,3, según lo establecido por TEXVI, (2022). Estos resultados del programa de computación facilitan la interpretación del fenómeno a nivel industrial y resultan un aporte importante de esta etapa de la investigación. No obstante, se prevé realizar pruebas industriales en la textilera analizada.

En la Tabla 4, se muestran las propiedades termodinámicas de las corrientes involucradas en la reacción determinadas con ayuda del simulador. Por lo tanto, la variación de energía libre (ΔG°) es -311 288 J, hallada en función de las variaciones de entalpía y entropía de la reacción, por lo que el proceso es espontáneo a las condiciones del estudio (temperatura 35 °C y presión de 101,3 kPa).

Tabla 4. Propiedades termodinámicas de las corrientes del reactor

<i>Propiedad</i>	<i>Unidad</i>	<i>Agua neutralizada</i>	<i>Agua residual</i>	<i>CO₂</i>
Entalpía (H)	J	-269 415,48	-285 305,13	-393 154
Entropía (S)	J/K	3 093,67	503,04	213,31

3.3 Impacto medioambiental

El tratamiento del agua residual será llevado a cabo de una manera compatible con el entorno ya que se disminuirá el impacto negativo de las emisiones de CO₂, generado por la combustión en las fuentes fijas de la textilera, al ser empleado este gas en la reacción de neutralización de las aguas residuales. Esto tributa a la mitigación del cambio climático contribuyendo al cumplimiento de la tarea 8 del Plan del Estado (Tarea Vida), según lo reportado por CITMA, (2017).

El agua tratada podrá ser reutilizada en la agricultura para regar los cultivos del área cercana que se encuentra en la comunidad de Los Moros y los organopónicos asociados a Las Marianas, ya que la misma se vierte al riachuelo; tras el tratamiento, el agua cumple con los requerimientos para su vertido a este cuerpo receptor (clase B), según lo planteado por NC 27, (2012) y González, (2019).

4. CONCLUSIONES

1. Existe similitud geométrica entre los reactores continuos con agitación a nivel de laboratorio e industrial.
2. El pH del agua residual neutralizada en el reactor industrial, determinado por simulación fue de 7,2.
3. Se comprobó que el reactor industrial de la textilera “Desembarco del Granma” se puede usar para el proceso de neutralización del agua residual cuando se emplee dióxido de carbono en lugar de ácido sulfúrico.

REFERENCIAS

- Arbona, M., Cabrera, I., Fabelo, J., O' Farrill, M., y García, M., Definición de la ley de velocidad para la reacción entre las aguas residuales textiles y dióxido de carbono., Centro Azúcar, Vol. 49, No. 4, 2022, pp. 91-101. http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/729/827
- CITMA., Enfrentamiento al Cambio Climático en la República de Cuba., Tarea Vida, 2017, pp. 6-7. <http://financiamientoclimatico.cubaenergia.cu/index.php/descargas/8-folleto-tarea-vida/file>
- Contamine, F., Houssin-Agbomson, D., Serin, J., & Arpentinier, P., Solubility of carbon dioxide in water and aqueous solution containing sodium hydroxide at temperatures from (293,15 to 393,15) K and pressure up to 5 MPa: Experimental Measurements.,

- Journal of Chemical & Engineering Data, Vol. 57, 2012, pp. 784–789.
<https://doi.org/10.1021/je200991x>
- Díaz, R., Tratamiento de aguas y aguas residuales., Ciudad de la Habana, Editorial Félix Varela, Cuba, 2006, pp. 309-312.
- Gondal, S., Asif, N., Svendsen, H., & Knuutila, H., Kinetics of the absorption of carbon dioxide into aqueous hydroxides of lithium, sodium and potassium and blends of hydroxides and carbonates., Chemical Engineering Science, Vol. 123, 2015, pp. 487-499. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2014.10.038>
- González, E., Evaluación de la factibilidad de la aplicación del CENTERFOOD XL para mejorar la calidad del sistema de tratamiento de agua residual en la UEB “Desembarco del Granma”., Tesis presentada en opción al título de Ingeniera Química, Especialidad Ingeniería Química en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, 2019.
<https://dspace.uclv.edu.cu/server/api/core/bitstreams/b3fb533c-bd0d-4a8d-99db-b954b00614a7/content>
- Levenspiel, O., Ingeniería de las reacciones químicas., Capítulo 3, Tercera edición, Limusa Wiley, México, 2004, pp. 44-45.
- Liu, B., Sabir, B., Mohammadian, E., Khaksar, A., Roslina, N., & Ostadhassan, M., Measurement of solubility of CO₂ in NaCl, CaCl₂, MgCl₂ and MgCl₂ + CaCl₂ Brines at temperatures from 298 to 373 K and pressures up to 20 MPa using the potentiometric titration method., Energies, Vol. 14, No. 7222, 2021, pp. 1-14.
<https://doi.org/10.3390/en14217222>
- Liu, Z., Esmaeili, A., Zhang, H., Wang, D., Lu, Y., & Shao, L., Modeling and experimental studies on carbon dioxide absorption with sodium hydroxide solution in a rotating zigzag bed., Processes, Vol. 10, No. 614, 2022, pp. 1-19.
<https://doi.org/10.3390/pr10030614>
- Mahmoudkhani, M., & Keith, D., Low-energy sodium hydroxide recovery for CO₂ capture from atmospheric air-Thermodynamic analysis., International Journal of Greenhouse Gas Control, Vol. 3, No. 4, 2009, pp. 376-384.
<https://doi:10.1016/j.ijggc.2009.02.003>
- NC 27., Vertimiento de aguas residuales a las aguas terrestres y al alcantarillado, Especificaciones., Cuba, Oficina Nacional de Normalización, 2012, pp. 4-10.
<https://ftp.isdi.co.cu/biblioteca/biblioteca%20universitaria%20del%20isdi/coleccion%20digital%20de%20normas%20cubanas/2012/nc%2027%20a2012%2014p%20sky.pdf>
- Pérez, E., Martínez, D., Sobrino, A., Rodríguez, I., y Hernández, L., Escalado de la reacción de biosíntesis de fructooligosacáridos, a partir de sacarosa, en biorreactores tipo tanque agitado., Tecnología Química, Vol. 31, No. 2, 2011, pp. 155-165.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-61852011000200003
- Pichler, T., Stoppacher, B., Kaufmann, A., Siebenhofer, M. & Kienberger, M., Continuous neutralization of NaOH solution with CO₂ in an Internal-Loop airlift reactor., Chemical Engineering Technology, Vol. 44, No. 1, 2020, pp. 38-47.
<https://doi:10.1002/ceat.202000319>
- TEXVI., PO-401-25, Sistema de tratamiento de agua residual. Cuba, UB textil “Desembarco del Granma”, 2022, pp. 3-7.
-

Uibu, M., Velts, O., Trikkel, A., & Kuusik, R., Reduction of CO₂ emissions by carbonation of alkaline wastewater., *Air Pollution*, Vol, XVI, 2008, pp. 311-320.
<https://doi.org/10.2495/AIR080321>

Waseem, U., Sirajuddin, A., & Yogesh, D., A critical review of hazardous waste generation from textile industries and associated ecological impacts., *Journal of the Indian Chemical Society*, Vol. 100, No. 1, 2023, pp. 5-6.
<https://doi.org/10.1016/j.jics.2022.100829>

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Dr.C. Mercedes Arbona Cabrera. Redacción – primera redacción, investigación, software.
 - Dr.C. Isabel Cabrera Estrada. Conceptualización, redacción - revisión y edición.
 - Dr.C. José Antonio Fabelo Falcón. Metodología, recursos.
 - M.Sc. María de los Ángeles García Hernández. Visualización.
 - Dr.C. Yuniey Quiala Armenteros. Supervisión.
-