

Análisis exergetico del proceso de producción de nanoparticulas de TiO₂ a partir de la hierba limón y isopropoxido de titanio

Exergetic analysis of TiO₂ nanoparticle production from lemongrass and titanium isopropoxide

Jairo Avilés¹⁺, Efren Locarno-Lara²⁺, Ángel-Darío González-Delgado^{3*}

⁺Estos autores contribuyeron igualmente en este trabajo

¹Estudiante de Ingeniería Química, Programa de Ingeniería Química, Universidad de Cartagena, Grupo de Investigación en Nanomateriales e Ingeniería de Procesos Asistida Por Computador (NIPAC), Cartagena de Indias, Colombia (ORCID 0000-0002-6073-591X)

²Estudiante de Ingeniería Química, Programa de Ingeniería Química, Universidad de Cartagena, Grupo de Investigación en Nanomateriales e Ingeniería de Procesos Asistida Por Computador (NIPAC), Cartagena de Indias, Colombia (ORCID 0000-0002-2140-2389)

³Doctor en Ingeniería Química, Programa de Ingeniería Química, Universidad de Cartagena, Grupo de Investigación en Nanomateriales e Ingeniería de Procesos Asistida Por Computador (NIPAC), Cartagena de Indias, Colombia (ORCID 0000-0001-8100-8888)

*agonzalezd1@unicartagena.edu.co

Recibido: 13/02/2020

Aceptado: 03/06/2020

Cite this article as: Avilés, J., Locarno-Lara, E., González-Delgado, A.D. "Exergetic analysis of TiO₂ nanoparticle production from lemongrass and titanium isopropoxide" *Prospectiva*, Vol 18, N° 2, 2020.

<http://doi.org/10.15665/rp.v18i2.2273>

RESUMEN

La hierba limón (Cymbopogon citratus) es una hoja que a lo largo de los años ha sido utilizada con fines medicinales y alimenticios. Actualmente, se han añadido otros usos en la industria química ya que su infusión ayuda al proceso de síntesis de nanopartículas de TiO₂, generando subproductos como celulosa y otros compuestos que tienen un gran potencial para su reutilización. Por tal razón, en la presente investigación se realiza un análisis exergetico del proceso de producción de nanopartículas de TiO₂ a partir de la hierba limón e isopropóxido de titanio, a partir de este análisis es posible conocer qué etapas del proceso requieren mejoras y evaluar la eficiencia global del proceso. Este proceso tiene una capacidad de procesamiento de 32675 ton/año de hierba limón y 5724 ton/año de isopropóxido de titanio, con la que se producen 1496 ton/año de nanopartículas de TiO₂, con una eficiencia exergetica global del 0.30%. Adicionalmente, se realizó un análisis de sensibilidad para proponer mejoras que aumenten la eficiencia global del proceso.

Palabras clave: hierba limón, isopropoxido de titanio, análisis exergetico, eficiencia exergetica, nanopartículas.

ABSTRACT

Lemongrass (Cymbopogon citratus) is a leaf that has been used throughout the years for medicinal and food purposes. Currently, other uses have been added in the chemical industry since its infusion helps the process of synthesis of TiO₂ nanoparticles, generating by-products such as cellulose and other compounds that have great potential for reuse. For this reason, in the present research an exergetic analysis of the process of TiO₂ nanoparticle production from lemongrass and titanium isopropoxide is performed. From this analysis it is possible to know which process stages require improvements and to evaluate the overall efficiency of the process. This process is an academic research conducted by the University of Cartagena. The simulation was performed on the specialized Aspen Plus V10™ software. It was observed that with approximately 32675 ton/year of lemongrass and 5724 ton/year of titanium isopropoxide, 1496 ton/year of TiO₂ nanoparticles are produced, with an overall exergetic efficiency of 0.2366%. In addition, a sensibility analysis was done to propose improvements that would increase the overall efficiency of the process.

Palabras clave: Lemon grass, titanium isopropoxid, exergetic analysis, exergetic efficiency, nanoparticles.

1. Introducción

La nanotecnología está recibiendo mayor interés científico y diferentes rutas se han venido desarrollando para obtener nanopartículas con características definidas. Debido a que el tamaño de las partículas es tan pequeño, las nanopartículas de TiO₂ no reflejan la luz visible, pero absorben la luz ultravioleta, lo que permite una barrera transparente que protege la piel de los rayos dañinos del sol, por lo que puede ser usado como protector solar [1]. En los procesos de oxidación avanzada, el TiO₂ es altamente empleado como semiconductor debido a sus características físicas y químicas, siendo uno de los materiales más investigados en esta área [2]. En la industria automotriz, los principales usos incluyen la eliminación de las emisiones de gases de escape nocivos, y en centrales eléctricas, la eliminación de los óxidos nitrosos. Además, las propiedades fotocatalíticas del óxido de titanio pueden dar como resultado una técnica reactiva prometedora para la eliminación de contaminantes del aire o el agua [3]. Así, existen muchas más aplicaciones para este compuesto. Generalmente para producir las nanopartículas de TiO₂ se utilizan compuestos sintéticos como precursores, por ejemplo, tetrabutyl titanio [4], el cual genera subproductos dañinos al medio ambiente.

Otro precursor ampliamente utilizado en la producción de nanopartículas es el isopropóxido de titanio debido a su alta tasa de conversión. Se han realizado estudios de la síntesis de larga escala de dióxido de titanio a partir del isopropóxido de titanio y reportaron un rendimiento de 26 kg TiO₂/kg precursor [5]. La necesidad de reducir los impactos ambientales en la síntesis de estas nanopartículas ha motivado el desarrollo de rutas de síntesis por métodos de química verde usando extracto de hierba limón. Méramo y colaboradores [6] evaluaron el desempeño ambiental de la producción de TiO₂ por química verde mostrando bajos impactos ambientales comparados con procesos de similar naturaleza.

Por otra parte, el análisis exergetico es considerado como un instrumento de estudio muy beneficioso en la búsqueda de alternativas que ayuden a aminorar el uso innecesario de recursos y de impactos potenciales generados en los procesos [7]. El análisis exergetico permite identificar los componentes o equipos del sistema con las mayores ineficiencias termodinámicas, localizarlos, cuantificar las ineficiencias y saber las fuentes y procesos que las causan. Esta información, que no puede obtenerse con otro tipo de análisis energético, es útil para mejorar la eficiencia global de un sistema, o para comparar varios sistemas [8].

El análisis exergetico de procesos se basa en la combinación de la primera con la segunda ley de la termodinámica. La primera ley está restringida por la segunda ley ya que no establece los criterios para determinar la dirección de los procesos, la irreversibilidad, el trabajo máximo reversible y la eficiencia termodinámica de los procesos.

El análisis exergético es una herramienta efectiva en la evaluación del desempeño de sistemas térmicos. Juega un papel importante para determinar las ubicaciones y magnitudes de irreversibilidades en el sistema. En este sentido, el análisis exergético ayuda a definir el equipo crítico en el sistema para algunos posibles ajustes y modificaciones en el rendimiento estudios de mejora de sistemas térmicos. Por lo tanto, el análisis exergético proporciona información más detallada y completa que el análisis de energía.

En esta investigación, el análisis exergético junto con la simulación del proceso de síntesis de nanopartículas de TiO₂ ha sido usado como herramienta para identificar y evaluar los componentes o equipos del sistema que tienen influencia negativa en la eficiencia global del proceso con el objetivo de mejorar la cadena de producción potencial.

2. Materiales y métodos

2.1 Descripción del proceso

La producción de nanopartículas de TiO₂ se estudia a partir de datos derivados de investigaciones previas de los autores a larga escala [5]. Este proceso consta de dos subetapas: i) la obtención del extracto de hierba limón, y ii) la conversión de isopropóxido de titanio a dióxido de titanio.

i) Obtención de extracto de hierba limón

El extracto de hierba limón se obtiene siguiente inicialmente una etapa de separación de los tallos y raíces de las hojas de hierba. La composición química de estas hojas se muestra en la Tabla 1, donde se observa que están compuestas en su mayoría por celulosa y agua (55.68% y 43.38%, respectivamente). Luego, las hojas son lavadas con abundante agua y secadas hasta peso constante en un secador solar. Las hojas secas son molidas y se someten a una etapa de infusión con agua (extracción solido-líquido). La infusión permite obtener el extracto mezclado con abundante agua por lo que se hace necesario pasar la mezcla a una etapa de evaporación. Finalmente, el extracto se enfría con un intercambiador de calor y se almacena para la etapa de conversión del precursor a dióxido de titanio.

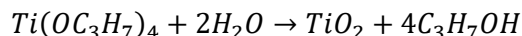
Tabla 1. Composición de la hoja de hierba limón (Corriente 1).

Table 1. Lemongrass leaf composition (Stream 1).

Componente	Composicion porcentual
MIRCENO	0,06%
UNDECYNE	0,04%
GERENIAL	0,80%
NEROL	0,04%
CELULOSA	55,68%
AGUA	43,38%

ii) Conversión de isopropóxido de titanio a nanopartículas de TiO₂

En este proceso de síntesis, el precursor es alimentado a un mezclador junto con agua para obtener una solución acuosa al 2,8% vol. La solución pasa a un reactor donde se adiciona el extracto de hierba limón obtenido anteriormente y tiene lugar la siguiente reacción:



El extracto actúa como catalizador de la reacción y permite que las nanopartículas adquieran el tamaño nano. Los productos de reacción pasan por una centrífuga para separar la mezcla rica en propanol (C₃H₇OH)

y las nanopartículas. Luego, se le adiciona etanol al 70% a las nanopartículas para remover trazas de compuestos indeseados. La mezcla resultante de este lavado pasa por etapas consecutivas de centrifugación para separar las nanopartículas del etanol. Finalmente, éstas son enviadas a un horno para su calcinación y evaporación de trazas de etanol. Así, se obtienen las nanopartículas de TiO₂ con alto grado de pureza.

La Figura 1 muestra el diagrama de bloques y balance másico de la producción de las nanopartículas. Inicialmente ingresan 32674.71 ton/año de hojas de hierba limón a la etapa de limpieza, de las cuales se separan 12688,61 ton/año de tallos y raíces. Las hojas restantes sin tallo (19986,1 ton/año) fueron lavadas con 30976,74 ton/año de agua. Luego del secado y molienda, se obtienen 6544,16 ton/año de hojas secas y molidas listas para ingresar a la etapa de infusión, donde se adicionan 35681,39 ton/año de extracto de hierba limón y 43705,85 ton/año de agua. Una vez concentrado este extracto, se toman 6118,02 ton/año para actuar como catalizador en la reacción de 5724,16 ton/año de isopropóxido de titanio con 196584 ton/año de agua. En las etapas posteriores de centrifugación, se retira 175890,78 ton/año de agua y 51834,53 ton/año de etanol residual. Después del lavado y centrifugado final, las nanopartículas se calcinan para obtener 1496,16 ton/año de producto. Las condiciones operacionales de temperatura y presión para cada una de las etapas del proceso se muestran en la Tabla 2.

Figura 1. Diagrama de bloques. Producción de nanopartículas de TiO₂ a partir de la hierba limón y isopropóxido de titanio.

Figure 1. Block diagram. TiO₂ nanoparticle production from lemongrass and titanium isopropoxide.

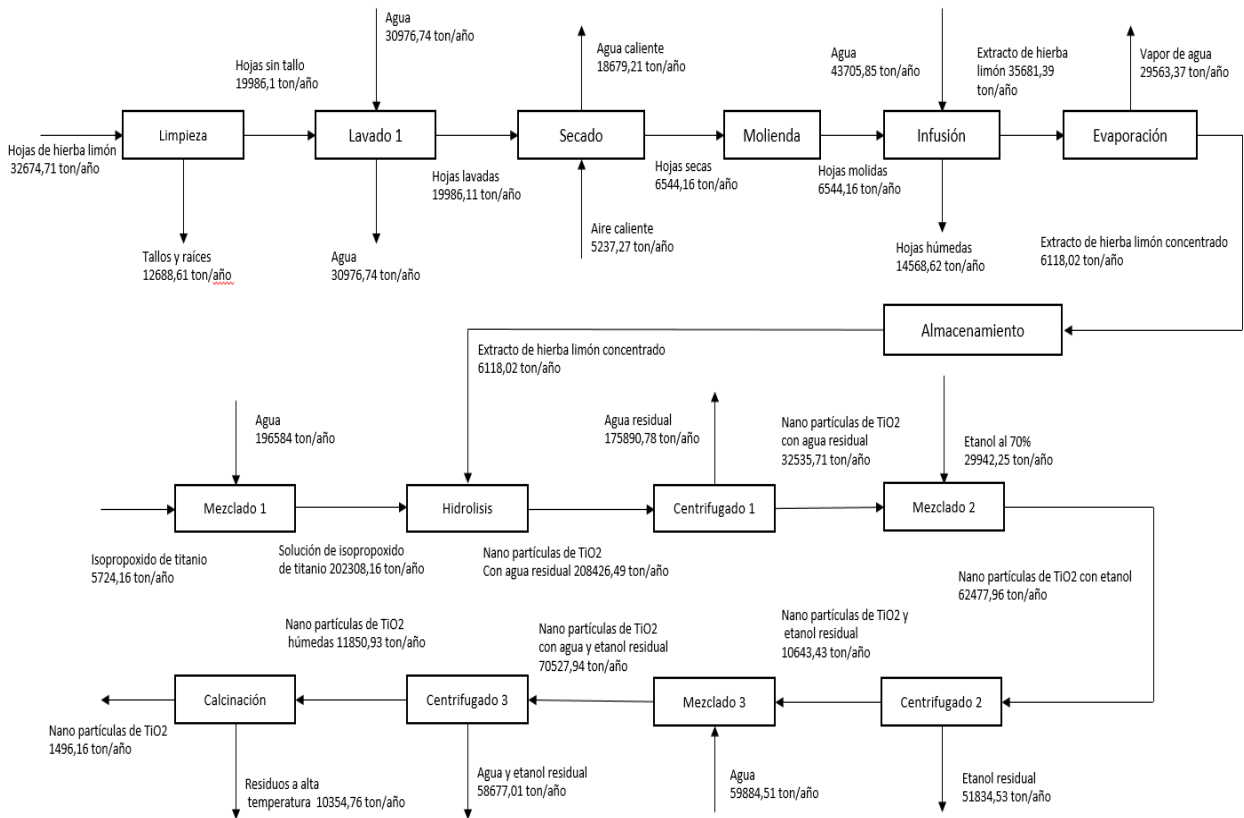


Tabla 2. Condiciones de operación del proceso.

Table 2. Process operating conditions.

ETAPA	P(BAR)	T(K)
LIMPIEZA	1,01325	301,15
LAVADO	1,01325	301,15
SECADO	1,01325	301,15
MOLIENDA	1,01325	301,15
INFUSION	1,01325	301,15
EVAPORACION	1,01325	373
ALMACENAMIENTO	1,01325	301,5
MEZCLA 1 (SOLUCION DE ISOPROPOXIDO DE TITANIO)	1,01325	301,5
HIDROLISIS	1,01325	301,5
CENTRIFUGACION 1	1,01325	301,5
MEZCLA 2 (NANOPARTICULAS DE TiO ₂ , AGUA RESIDUAL Y ETANOL)	1,01325	301,5
CENTRIFUGACION 2	1,01325	301,5
MEZCLA 3 (NANOPARTICULAS DE TiO ₂ , AGUA RESIDUAL)	1,01325	301,5
CENTRIFUGACION 3	1,01325	301,5
CALCINACION	1,01325	823

2.2. Análisis Exergético

El propósito de este análisis es calcular cantidad de destrucción de exergía en cada etapa del proceso, la cual se representa con la ecuación 1.

$$Ex_{destruida} = Ex_W + Ex_Q + Ex_M \quad (1)$$

La exergía por trabajo es igual al trabajo siempre que no haya cambios en el volumen. Esta dada por la ecuación 2.

$$Ex_W = W \quad (2)$$

La exergía por transferencia de calor depende de la temperatura a la que se produce en relación con la temperatura del ambiente, obteniendo un flujo de calor menor entre más se acerque T a T₀, este se representa por la ecuación 3.

$$Ex_Q = \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) Q \quad (3)$$

La exergía del flujo de materia se representa en función de la suma de la exergía química, física, potencial y cinética, como se muestra en la ecuación 4.

$$Ex_M = Ex_{ch} + Ex_f + Ex_p + Ex_k \quad (4)$$

Generalmente la exergía cinética y potencial son despreciables y por tanto, la ecuación 4 se reduce a la ecuación 5.

$$Ex_M = Ex_f + Ex_{ch} \quad (5)$$

La exergía física se obtiene de la ecuación 6.

$$Ex_f = (H - H_0) - T_0(S - S_0) \quad (6)$$

Las exergías químicas de las sustancias involucradas se resumen en la Tabla 3 para el caso de estudio analizado. Esta se define como trabajo que se obtiene cuando una sustancia alcanza el equilibrio termodinámico mediante reacciones químicas, y se calcula mediante la ecuación 7.

$$Ex_{ch} = \Delta G_f^0 + \sum_j V_j Ex_{ch-j}^0 \quad (7)$$

Tabla 3. Exergías químicas de los compuestos del proceso.

Table 3. Chemical exergy of process compounds.

COMPUESTO	EXERGIA QUIMICA (kJ/kg)
MIRCENO	70983,6306
UNDECYNE	74842,5608
GERENIAL	63771,6763
NEROL	67086,5478
CELULOSA	18807,9511
AGUA	42,778
OXIGENO	330,833333
NITROGENO	51,4285714
ISOTITANIO	52420,1718
TIO2	263,81
PROPANOL	33396,6667
ETANOL	29497
AGUA(VAPOR)	527,777778

Fuente: [9], [10]

La exergía química de la mezcla depende sus componentes y está dado por la ecuación 8.

$$Ex_{ch-m} = \sum y_i * Ex_{ch-i} + RT_0 \sum y_i * \ln y_i \quad (8)$$

La exergía total que entra al sistema entra generalmente como la exergía por flujo másico y por servicios industriales que es la exergía que se requiere para realizar alguna operación. Esta dada por la ecuación 9.

$$Ex_{Total-entra} = \sum Ex_{Masa-entra} + \sum Ex_{Servicios-entra} \quad (9)$$

La exergía puede salir de un sistema tanto por el flujo de productos y residuos. Se representa con la ecuación 10.

$$Ex_{Total-sale} = \sum Ex_{Productos-sale} + \sum Ex_{Residuos-sale} \quad (10)$$

Las irreversibilidades del proceso son las exergías destruidas, es decir el trabajo que no fue aprovechado. Su ecuación es la 11.

$$Ex_{Destruida} = \sum Ex_{Total-entrada} + \sum Ex_{Productos-salida} \quad (11)$$

Para identificar los puntos de mayor pérdida en el proceso, se calcula el porcentaje de exergía destruida mediante la ecuación 12.

$$\%Exergía_{destruida,i} = \left(\frac{Ex_{destruida,i}}{Ex_{Total\ destruida}} \right) * 100 \quad (12)$$

La eficiencia global exergética indica la rentabilidad y efectividad del proceso a nivel industrial y está dada por la ecuación 13.

$$\% \eta_{ex} = \left(1 - \frac{Ex_{destruida}}{Ex_{Total\ entrada}} \right) * 100 \quad (13)$$

Consideraciones para el análisis exergético

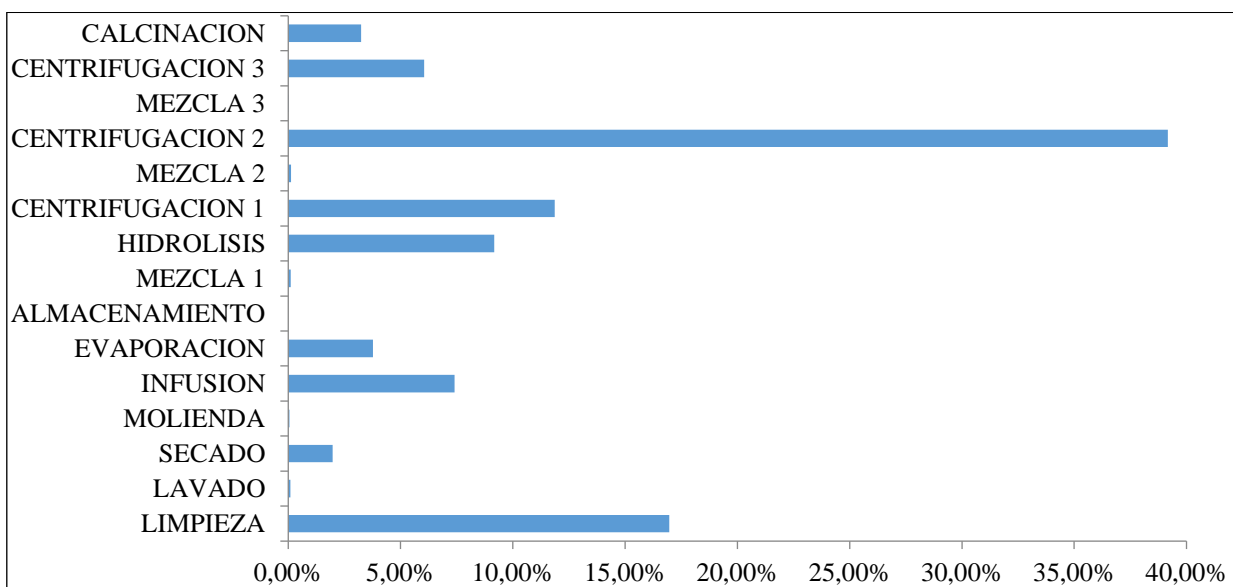
- Los enfriadores de corrientes no se tomaron en cuenta en el análisis por etapa, ya que no requieren de ningún trabajo, el intercambio de calor se hace por masa.
- Los calentadores se tomaron como parte del equipo que le seguía para simplificación de cálculos.
- Se utilizó el modelo de solución NRTL para calcular las propiedades químicas de las mezclas necesarias para calcular las exergías de las mezclas.
- La bomba se tomó como parte del mezclador para facilitar los cálculos.
- Ciertas corrientes donde su residuo es vapor y la composición en su mayoría es agua. Por lo que en esos casos se tomó la exergía química solo del agua de vapor.

3. Resultados y discusión

Los resultados del cálculo de las exergías físicas y químicas de cada corriente se muestran en la Tabla A1 de la sección de anexos. Se observó que las exergías químicas de la hierba limón y el precursor son mayores que las de las nanopartículas de dióxido de titanio. Las exergías destruidas por etapa se muestran en la Figura 2. Las etapas que más contribuyeron a la destrucción de exergía fue la segunda centrifugación, limpieza y la primera centrifugación. Lo anterior se debe a los grandes volúmenes de agua y etanol residual generados durante la centrifugación. Meramo y colaboradores [5] reportaron similares desempeños exergéticos de las etapas de centrifugación en la obtención de nanopartículas con extracto de hierba limón.

Figura 2. Exergía destruida por etapa.

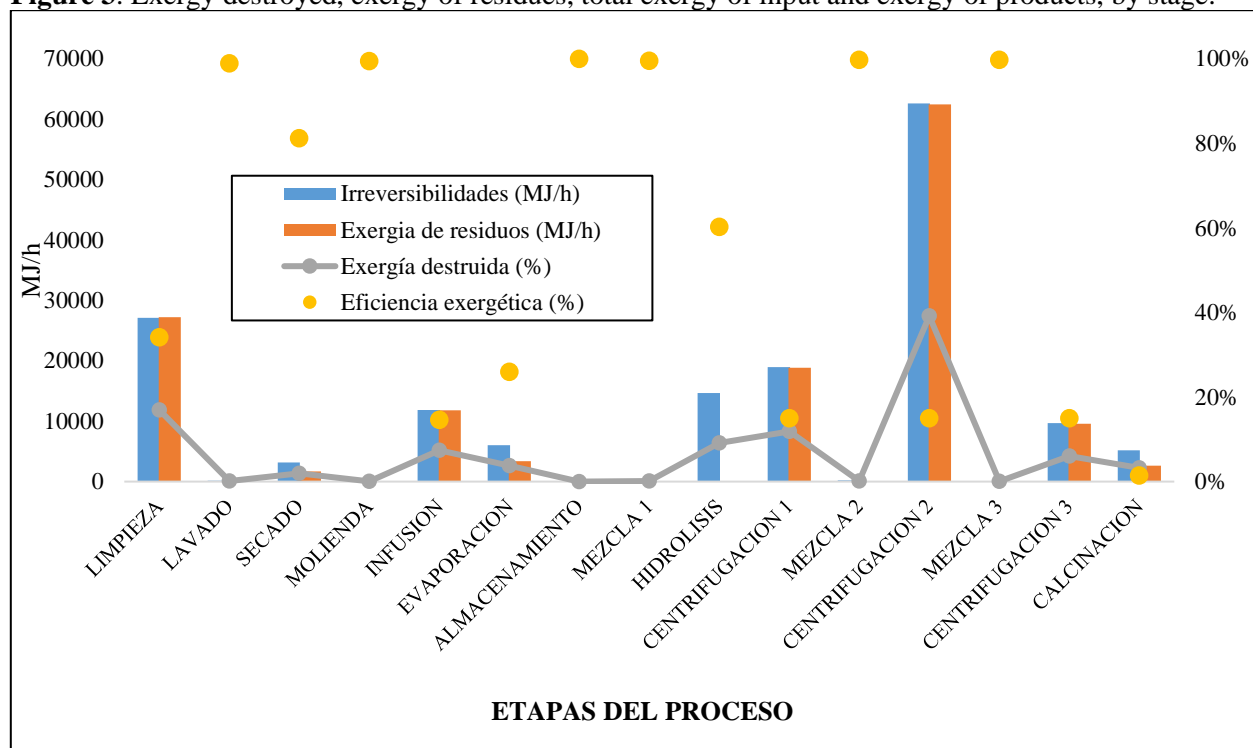
Figure 2. Exergy destroyed per stage.



La Figura 3 muestra, por etapas, la exergía destruida (irreversibilidades), la exergía de los residuos, la exergía total de entrada y la exergía por productos en MJ/h. Como puede observarse la etapa de centrifugación 2 tiene la mayor cantidad de exergía de residuos e irreversibilidades. Se localiza entonces un foco de potencial mejora para esta etapa del proceso. Alternativas de diseño para reducir los impactos exergéticos de la centrifugación radican en la recirculación del etanol residual para alimentarlo nuevamente a la etapa de lavado o la reducción de su generación usando otros métodos de purificación diferentes al lavado con etanol. Para la mayoría de las etapas, las eficiencias exergéticas fueron superiores al 90%, a excepción de las etapas de limpieza, infusión, evaporación, centrifugaciones y calcinación. Moreno-Sader y colaboradores [11] estudiaron el desempeño exergético de la producción de bio-crudos a partir de dos fuentes diferentes y obtuvieron la mayor irreversibilidad en la etapa de separación 3. Se esperaron estos resultados ya que estas etapas de separación buscan recuperar un producto deseado de una corriente normalmente considerada como residuo, influyendo en los cálculos de exergía de residuos e irreversibilidades.

Figura 3. Exergía destruida, exergía de los residuos, exergía total de entrada y exergía de los productos por etapa.

Figure 3. Exergy destroyed, exergy of residues, total exergy of input and exergy of products, by stage.



La Tabla 4 muestra las irreversibilidades, la exergía de servicios y la exergía de residuos totales en MJ/h y la eficiencia exergética total en %. La eficiencia exergética global fue significativamente baja para este proceso emergente a larga escala. Comparando estos resultados con otros procesos, se observa un bajo desempeño en la síntesis de nanopartículas de dióxido de titanio desde una perspectiva energética. Arteaga y colaboradores [12] obtuvieron una eficiencia exergética global del 38% para una biorrefinería de aceite crudo e hidrógeno a partir de la palma africana. Méramo y colaboradores [13] reportaron una eficiencia del 4.58% para la producción de quitosano a partir del exoesqueleto de camarón. Peralta-Ruiz y colaboradores [8] obtuvieron una eficiencia máxima del 51% para la extracción de aceite a partir de microalgas. Leal-

Navarro y colaboradores [14] mostraron que la planta de tratamiento de amina de una refinería en Latinoamérica es altamente eficiente en términos exergéticos alcanzando eficiencias de hasta 83.81%.

Tabla 4. Parámetros exergéticos globales

Table 4. Global exergetic parameters

Parámetro exergético	Unidades	Valor
Irreversibilidades	MJ/h	1.6E+05
Exergía de servicios industriales	MJ/h	1.3E+04
Exergía de residuos	MJ/h	1.4E+05
Eficiencia exergética	%	3.0E-01

Análisis de sensibilidad

Para este análisis de sensibilidad, se consideraron modificaciones de diseño que potencialmente pudieran incrementar la eficiencia exergética global del proceso. Los casos analizados fueron:

Caso 1. Se recirculó en un 100% el flujo 6 en el lavado, cambiándolo por el flujo 4

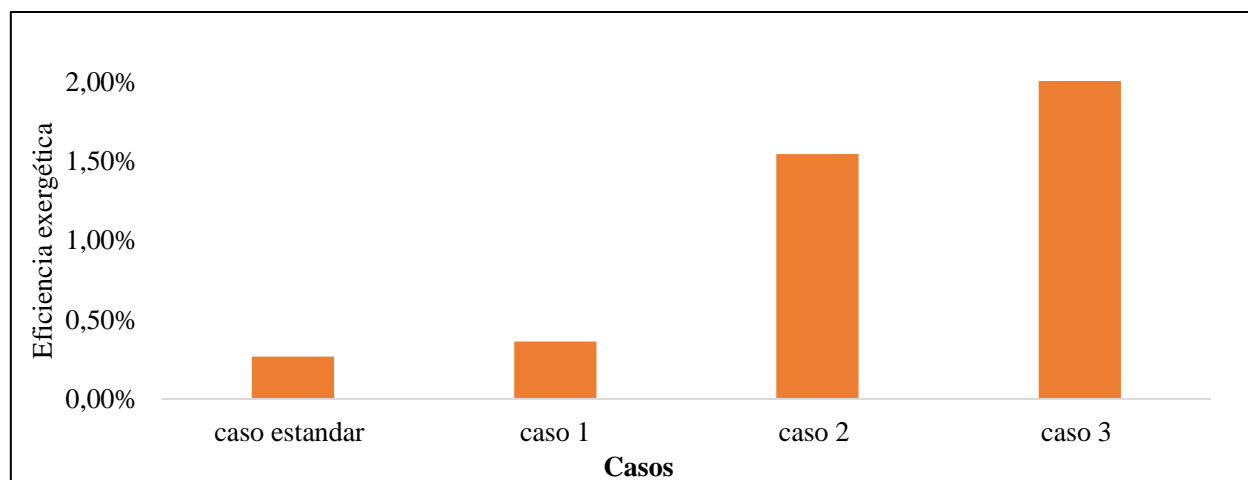
Caso 2. Se recirculó el flujo 26 con una purga del 10%, es decir se recirculó en 90% del flujo, al mezclador 1. Se mantuvieron los cambios del caso 1.

Caso 3. Se recirculó el flujo 34 con una purga del 10% al mezclador 3. Se mantuvieron los cambios del caso 2.

La Figura 4 muestra que el caso 3 incrementó la eficiencia exergética del caso estándar de 0.3% al 2.1%. El caso 2 por su parte aumentó al 1.55% el desempeño del proceso. El caso 1 por sí solo no representa un incremento significativo en la eficiencia global, por lo que la recirculación del flujo 6 debe estar acompañada de la recirculación del flujo 26 y el 24 para obtener resultados más promisorios.

Figura 4. Influencia de cambios en la eficiencia del proceso.

Figure 4. Influence of process changes on efficiency.



4. Conclusiones

Esta investigación buscó localizar las oportunidades de mejora en las etapas de producción de nanopartículas de dióxido de titanio a partir de isopropóxido de titanio y extracto de hierba limón. El proceso fue analizado para una capacidad de producción de 1496 ton/año de nanopartículas de TiO_2 . Se observó que el mayor contribuyente a la destrucción de la exergía fue la etapa de centrifugación 2 seguido por la etapa de limpieza. El desempeño global del proceso mostró irreversibilidades en $1.6\text{E}+05$ MJ/h, exergía de servicios industriales en $1.3\text{E}+04$ MJ/h, exergía de residuos en $1.4\text{E}+05$ MJ/h y una eficiencia exergética significativamente baja del 0.30%. El análisis de sensibilidad permitió identificar como alternativa la recirculación de los flujos 6, 24 y 26 para incrementar la eficiencia al 2.1%. Este trabajo permitió identificar posibles mejoras en el diseño a larga escala para la producción de estas nanopartículas por rutas de química verde.

Agradecimientos

Los autores expresan su gratitud a la Universidad de Cartagena por suministrar los equipos y softwares usados en la ejecución de esta investigación.

Conflictos de interés

Los autores no presentan ningún tipo de conflicto de interés que podría influir de manera inapropiada en este trabajo.

Referencias

- [1] S. M. Gupta and M. Tripathi, "A review on the synthesis of TiO_2 nanoparticles by solution route," *Cent. Eur. J. Chem.*, vol. 10, no. 2, 2012.
- [2] C. E. Diaz-Urbe, W. Vallejo-Lozada, Á. Cantillo-Guzman, M. Alvis-Padilla, and C. Fajardo-Rangel, "Degradación de azul de metileno bajo irradiación visible sobre electrodos de TiO_2 sensibilizados con pigmentos de clorofila extraídos de la planta de *Spinacia Oleracea*," *Prospectiva*, vol. 16, no. 2, pp. 7–12, 2018.
- [3] M. Ba-Abbad, A. Kahum, A. Mohamad, M. Takriff, and K. Sopian, "Synthesis and Catalytic Activity of TiO_2 Nanoparticles for Photochemical Oxidation of Concentrated Chlorophenols under Direct Solar Radiation," *Int. J. Electrochem. Sci.*, vol. 7, pp. 4871–4888, 2012.
- [4] L. Zhou, L. Wang, J. Lei, Y. Liu, and J. Zhang, "Fabrication of $\text{TiO}_2/\text{Co-g-C}_3\text{N}_4$ heterojunction catalyst and its photocatalytic performance," *Catal. Commun.*, vol. 89, pp. 125–128, Jan. 2017.
- [5] S. Meramo-Hurtado, K. Moreno-Sader, and Á. D. González-Delgado, "Computer-aided simulation and exergy analysis of TiO_2 nanoparticles production via green chemistry," *PeerJ*, pp. 1–19, 2019.
- [6] S. I. Meramo, H. Bonfante, G. De Avila-Montiel, and A. Herrera-Barros, "Environmental Assessment of a Large-Scale Production of TiO_2 Nanoparticles via Green Chemistry," *Chem. Eng. Trans.*, vol. 70, pp. 1063–1068, 2018.
- [7] E. Monroy, K. Rodriguez, and M. Bastidas, "Evaluación exergética para tecnologías aplicadas a fuentes no convencionales de energía," *Prospect*, vol. 14, no. 1, pp. 7–14, 2016.
- [8] Y. Peralta-Ruiz, A.-D. González-Delgado, and V. Kafarov, "Evaluation of alternatives for microalgae oil extraction based on exergy analysis," *Appl. Energy*, vol. 101, pp. 226–236, Jan. 2013.

- [9] G. Shlaskej, “Appendix 1. Standard Chemical Exergy,” *MIT*, 2007. .
- [10] D. Morris and J. Szargut, “Standard chemical exergy of some elements and compounds on the planet Earth,” *Energy*, vol. 11, pp. 733–755, Aug. 1986.
- [11] K. Moreno-Sader, S. I. Meramo-Hurtado, and A. D. González-Delgado, “Computer-aided environmental and exergy analysis as decision-making tools for selecting bio-oil feedstocks,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 112, no. February, pp. 42–57, 2019.
- [12] S. Arteaga-Díaz, J. González-Díaz, K. Ojeda-Delgado, M. Pájaro-Morales, and A. D. Gonzalez-Delgado, “Computer-Aided Exergy Analysis of a Palm Based-Biorefinery for Producing Palm oil , Kernel Oil and Hydrogen,” *Contemp. Eng. Sci.*, vol. 11, pp. 537–545, 2018.
- [13] S. Meramo-Hurtado, C. Alarcón-Suesca, and Á. D. González-Delgado, “Exergetic sensibility analysis and environmental evaluation of chitosan production from shrimp exoskeleton in Colombia,” *J. Clean. Prod.*, vol. 248, 2020.
- [14] J. Leal, R. Mestre, A. Puerta, J. León, and Á. D. González, “Evaluating the Exergetic Performance of the Amine Treatment Unit in a Latin-American Refinery,” *ACS Omega*, vol. 4, no. 26, pp. 21993–21997, 2019.

Anexos

Tabla A1. Exergía física y química de las corrientes.

Table A1. Physical and chemical exergy of the streams.

CORRIENTE	EXERGIA FISICA(Mj/h)	EXERGIA QUIMICA(Mj/h)	FLUJO MASICO (ton/año)
1	0,17148523	41155,0684	32674,71
2	0,00555514	27224,1337	12688,61
3	0,16593009	14047,9056	19986,1
4	0,36361439	151,166213	30976,74089
5	0,16593045	14047,9056	19986,11
6	0,3636148	151,166164	30976,73089
7	567,887768	1096,96791	18679,21702
8	4,20183598	13633,5792	6544,163618
9	0,00822818	26,0781484	5237,270636
10	4,45929985	16,1387976	5237,270636
11	0,00967383	13640,2149	6544,163618
12	0,00967383	13640,2149	6544,163618
13	0,52270698	13773,6872	50250,01362
14	0,51303254	213,284149	43705,85
15	0,413919	2018,63855	35681,39361
16	0,10878799	11780,6315	14568,62
17	1504,72913	1889,34682	29563,3716
18	23,5220369	2088,85846	6118,022016
19	0,06724002	1764,76927	6118,022016
20	0,06724012	1764,76927	6118,022016
21	0,01190196	34230,1449	5724,16

22	2,3075627	959,328126	196584
23	2,30344699	35079,4322	202308,16
24	0,06724012	1764,76927	6118,022016
25	2,41882743	22184,8014	208426,4989
26	2,05463348	18860,8743	175890,7846
27	0,36419395	3333,84583	32535,71439
28	1,90961125	73490,9025	62477,96439
29	0,30496505	70351,4423	29942,25
30	1,61813992	62458,2109	51834,53018
31	0,29147133	11005,4444	10643,4342
32	0,70294257	292,235862	59884,51
33	1,05455783	11266,7384	70527,9442
34	0,89443469	9575,36517	58677,01303
35	0,16012313	1702,19109	11850,93117
36	30,3848085	45,0265879	1496,16417
37	977,520587	1660,12608	10354,767
38	0,00161157	45,0265879	1496,16417
