

Evaluación exergética y de sensibilidad del proceso de producción de microperlas de quitosano modificadas con nanopartículas verdes de TiO_2

Tamy Carolina Herrera-Rodríguez

Vianny Parejo-Palacio

Ángel Darío González-Delgado

Universidad de Cartagena¹, therrerar@unicartagena.edu.co

Universidad de Cartagena², vparejop@unicartagena.edu.co

Universidad de Cartagena³, agonzalezd1@unicartagena.edu.co

DOI: <https://doi.org/10.21158/...>

Fecha de recepción: 05 de febrero de 2024

Fecha de aprobación: 29 de julio de 2024

Como citar este artículo: T. Herrera-Rodríguez, V. Parejo-Palacio, y Á. González-Delgado. "Evaluación exergética y de sensibilidad del proceso de producción de microperlas de quitosano modificadas con nanopartículas verdes de TiO_2 ", *Rev. Ont.*, vol. 12, p. 1-18, 2024. Disponible en

¹Ingeniera Química. Universidad de Cartagena. Joven Investigadora Grupo de investigación en Nanomateriales e Ingeniería de Procesos Asistida por Computador (NIPAC). Universidad de Cartagena. ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-5124-8737>

²Ingeniera Química. Universidad de Cartagena. ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-4763-9046>

³Ph.D en Ingeniería Química. Universidad Industrial de Santander. Ingeniero Químico. Universidad Industrial de Santander. Profesor programa de Ingeniería Química, Grupo de investigación en Nanomateriales e Ingeniería de Procesos Asistida por Computador (NIPAC). Universidad de Cartagena. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8100-8888>

Resumen

El quitosano es un biopolímero procedente de exoesqueletos de crustáceos, alas de insectos o paredes celulares de hongos; que se perfila como materia prima para diversas aplicaciones en medicina, industria alimentaria, cosmética, tratamiento de aguas y aplicaciones medioambientales. Además, esta alternativa se presenta como una solución al problema de la inadecuada disposición de los desechos alimentarios marinos, problema continuo en todas las zonas costeras que genera un olor desagradable además de perjudicar al turismo. Se realizó un análisis de exergía, con el objetivo de identificar los principales sumideros en el proceso mediante el uso de la primera y segunda ley de la termodinámica; para ello, se desarrolló la simulación industrial de la producción de microperlas de quitosano modificadas con TiO_2 , mediante el programa Aspen plus 8.8, en el que se cuantificaron las exergías físicas de las corrientes. La cuantificación de la exergía permitió reconocer a la centrifugación como la etapa con mayores irreversibilidades, así como la eficiencia global del proceso, que fue de 0,0439 %. Mediante el análisis de sensibilidad se evaluó el comportamiento del proceso ante cambios de variables. Finalmente, se proponen mejoras que favorecen el proceso y mejoran su eficiencia.

Palabras clave: biopolímero; exergía; microperlas de quitosano; nanopartículas; química verde.



Exergetic assessment of the production process of chitosan microbeads modified with green-based TiO_2 nanoparticles

Abstract

Chitosan is a biopolymer from the exoskeletons of crustaceans, insect wings or cell walls of fungi, which is emerging as raw material for various applications in medicine, the food industry, cosmetics, water treatment and environmental applications. In addition, this alternative is presented as a solution to the problem of inadequate disposal of marine food waste, it is a continuous problem throughout the coastal areas that generates an unpleasant smell apart from disadvantaging tourism. An exergy analysis was carried out with the objective of identifying the main exergy sinks in the process through the use of the first and second law of thermodynamics; To this end, the industrial simulation of the production of chitosan microbeads modified with TiO_2 was developed by means of the software Aspen plus 8.8, in which the physical exergies of the currents were quantified. The quantification of the exergy allowed us to recognize centrifugation as the stage with the greatest irreversibilities, as well as the overall efficiency of the process, which was 0.0439%. Through the sensitivity analysis, the behavior of the process was evaluated under variable changes. Finally, improvements are proposed that favor the process and improve its efficiency.

Keywords: Biopolymer; exergy; chitosan microbeads; nanoparticles, green chemistry.

1. Introducción

La industria del marisco (gambas, cangrejos, etc.), es una de las fuentes de residuos sólidos que más contamina el medio ambiente [1]. Su disposición inadecuada es un problema constante en las zonas costeras, debido a que se generan malos olores por la acumulación de desechos marinos [2]. La constante búsqueda de la humanidad por aprovechar los residuos ha permitido observar que es posible obtener productos de valor agregado a partir de desechos pesqueros como el exoesqueleto de los crustáceos. Estos son considerados contaminantes ambientales y, sin embargo, constituyen la principal fuente de producción de dos biopolímeros de alto valor establecidos a nivel mundial: la quitina y su derivado funcional, el quitosano. La quitina (del griego túnica, envoltura) es el segundo biopolímero más abundante en la naturaleza después de la celulosa (el material base del papel). Sus fuentes principales son el exoesqueleto de algunos crustáceos, alas de insectos como escarabajos y cucarachas, paredes celulares de hongos, algas, etc. Sin embargo, la producción industrial de este biomaterial se basa prácticamente en el tratamiento de los caparazones de varios tipos de crustáceos como camarones, langostas, cangrejos y langostinos, debido a la factibilidad de encontrar estos materiales como desechos de las plantas procesadoras de estas especies [3].

Por su parte, el quitosano se encuentra de forma natural en las paredes celulares de algunos hongos en pequeñas concentraciones. Su principal forma de producción es a partir de la quitina, mediante hidrólisis, en un medio alcalino altamente concentrado, generalmente hidróxido sódico o potásico, a altas temperaturas, produciendo la desacetilación [4]. El quitosano fue descubierto por Rouget en 1859, quien comprobó que al tratar la quitina con una solución caliente de hidróxido de potasio se obtenía un producto soluble en ácidos orgánicos, denominándolo “quitina modificada”. Más tarde, en 1894, Hoppe-Seyler fue quien lo llamó “quitosano” [5]. Los productos a base de quitosano se comercializan para recubrimientos de heridas que se pueden aplicar en úlceras dérmicas, heridas superficiales y quemaduras, entre otros. Las propiedades antimicrobianas, antifúngicas, anticoagulantes e hidrofílicas del quitosano se utilizan para el tratamiento de fibras textiles naturales y sintéticas con fines médicos, preventivos e incluso deportivos.

Además, la industria cosmética aprovecha la naturaleza catiónica del quitosano en soluciones para el tratamiento del cabello y la piel, que se encuentran en jabones líquidos, champús, cremas para peinar, tónicos capilares, lociones, reparadores capilares, fijadores permanentes, cremas para la limpieza de la piel, etc. En el campo de la alimentación y la agricultura, se pulverizan soluciones diluidas de quitosano sobre frutas y verduras para formar una capa con propiedades antifúngicas que ayudan a su conservación. De igual manera, estas soluciones se utilizan para tratar semillas, prevenir infecciones microbianas y favorecer el desarrollo de las plantas. Se utilizan junto con fertilizantes para reducir las poblaciones de microorganismos nocivos presentes en los suelos de cultivo y se afirma que fortalece el sistema radicular de las plantas [6].

Por otro lado, el dióxido de titanio es uno de los fotocatalizadores con muchas aplicaciones en la industria, confirmando que el TiO_2 es inocuo para el medio ambiente y los seres humanos, pues se utiliza en el tratamiento del agua y del aire. Asimismo, las propiedades de las nanopartículas de TiO_2 dependen del tamaño de estas, de su estructura, del área superficial efectiva y de las características de la superficie [7]. La eficacia de los materiales fotocatalíticos, como el dióxido de titanio (TiO_2), en la degradación de contaminantes orgánicos en el aire y el agua se ha estudiado durante más de 30 años. Se ha utilizado ampliamente como fotocatalizador para la conversión de energía solar y aplicaciones medioambientales, materiales de construcción como baldosas, hormigón, pinturas y vidrio, debido a sus interesantes propiedades que incluyen estabilidad química, buena transparencia óptica, alto índice de refracción, bajo coste y toxicidad nula [8]. Las nanopartículas de dióxido de titanio pueden obtenerse mediante química verde, método por el cual se desarrollan formas sostenibles para el diseño de productos y procesos minimizando o eliminando el uso de sustancias peligrosas, generando beneficios ambientales y económicos a la sociedad [9], [10]. La química verde es una alternativa para la síntesis de nanopartículas y para disminuir la generación de residuos contaminantes, debido a que se emplean productos no tóxicos, provenientes de materias primas renovables o amigables con el medio ambiente. Es posible producir nanopartículas estables a partir de plantas, algunos ejemplos incluyen el aprovechamiento del extracto acuoso de *sechium edule* para dopar TiO_2 con plata (Ag), consiguiendo con estas nanopartículas una degradación hasta del 98 % de un colorante rojo [11].

Con el fin de evaluar la sostenibilidad de los procesos, es necesario determinar diferentes factores. En el presente estudio se evalúa la eficiencia exergética para identificar el rendimiento energético del proceso de producción de bioadsorbentes, teniendo en cuenta las etapas (secado, separación, centrifugación, entre otros) que contribuyen a la destrucción de exergía y a la pérdida de esta. Según [12], realizaron un estudio para identificar cuánta exergía se destruye en diferentes rutas para la obtención de bioadsorbentes. Observaron que el proceso con mayores irreversibilidades es el de producción de microperlas de quitosano modificadas con TiO_2 y nanopartículas de magnetita con una exergía destruida por encima de los 180 000 MJ/h, seguido por la ruta de síntesis de microperlas de quitosano modificadas solo con TiO_2 , la cual obtuvo una exergía destruida de 144 445 MJ/h. Para esta última ruta, identificaron que la etapa con mayores irreversibilidades fue el tren de separación, el cual se compone de tres centrífugas, representando el 53 % de las irreversibilidades totales.

Por lo anterior, es importante incluir distintas tecnologías de separación dentro de las cuales mencionan la filtración por membranas, sedimentación y otras técnicas que sean más eficientes y, por ende, generen menores pérdidas energéticas en la producción de microperlas de quitosano. Por su parte, [13], desarrollaron un análisis exergético sobre la remoción de hidrocarburos aromáticos policíclicos presentes en el agua de mar usando microperlas de quitosano, observando que las irreversibilidades más altas se producen en la etapa de extracción (99 % de la exergía destruida), seguido de la sedimentación y adsorción. En cuanto a la eficiencia exergética, se observa que la etapa de sedimentación tuvo una eficiencia de 45,3 %, siendo la etapa con mayor rendimiento, lo que evidencia que parte de la exergía que entra

se utiliza de manera efectiva, mientras que etapas como la extracción y adsorción tuvieron valores bajos: 15,33 % y 6,1 %, respectivamente. Este comportamiento indica que se deben implementar metodologías de separación diferentes, que permitan tener menores irreversibilidades, pero mayores eficiencias exergeticas. Así mismo, [14], realizaron la evaluación exergetica a una biorrefinería verde de quitosano, obteniendo que la mayoría de las etapas (reacción, enfriamiento, calentamiento, mezclado) tienen eficiencias exergeticas altas. Sin embargo, etapas como el secado y el lavado resultaron ser las menos eficientes, con un porcentaje menor al 8 %, por lo que sugieren reemplazar estas etapas por unas que generen menos pérdidas o rediseñar partes del proceso.

El objetivo de la presente investigación es determinar qué tan eficiente es el proceso de producción de micropérlas de quitosano modificadas con nanopartículas verdes de TiO_2 , se realizó una evaluación exergetica y un análisis de sensibilidad del proceso, para identificar y evaluar las etapas en las que es necesario aprovechar las corrientes de salida, en las que se destruye más exergetica de la que entra y qué tan eficiente es el proceso estudiado..

2. Fundamentación teórica

2.1. Análisis exergetico

Un análisis energético incluye balances basados en la primera ley de la termodinámica y el cálculo de las eficiencias energéticas de las etapas estudiadas. Sin embargo, un balance energético no ofrece información relacionada con la degradación de esta ni cuantifica la utilidad o calidad de las corrientes de masa y energía del sistema evaluado. Por otro lado, el análisis exergetico se presenta como una alternativa que supera las limitaciones de la primera ley de la termodinámica. Muestra los lugares de degradación de la energía en un proceso y puede ayudar a mejorar la operación de una unidad, una tecnología o un proceso [15], [16].

La exergetica se define como la cantidad máxima de trabajo teórico que puede obtenerse de la interacción entre un sistema termodinámico en determinadas condiciones y un entorno de referencia estable. Si existe una diferencia entre estos dos estados, cabe la posibilidad de producir trabajo; en caso contrario, esta posibilidad se reduce. En este sentido, el análisis de exergetica se convierte en una poderosa herramienta para identificar áreas potenciales de mejora de los procesos en términos de reducción de recursos innecesarios o sustitución de una unidad por otra con mejor rendimiento termodinámico, ya que permite cuantificar las principales ineficiencias y el rendimiento del sistema [17]. El análisis de exergetica considera tanto la primera como la segunda ley de la termodinámica, y mediante la introducción de la temperatura ambiente (temperatura de referencia), se puede describir el estado relativo de un sistema [18].

El análisis de exergetica permite identificar, evaluar, analizar y comparar procesos o sistemas, con el fin de determinar qué tan eficientes son las etapas en que se divide y qué factores le impiden obtener un mejor desempeño en cada una de ellas. Este análisis se realiza con el propósito de calcular cuánta exergetica se destruye por etapas, lo que indica la cantidad de trabajo

perdido, exergía neta por transferencia de masa y exergía por calor. En la ecuación 1 se observa cómo se puede calcular la exergía perdida en cada una de las etapas de un proceso industrial [19].

$$Ex_{destruida} = Ex_{Masa-Net} + Ex_{calor-Net} + Ex_{trabajo-Net} \quad (1)$$

La ecuación 2 indica que la exergía por trabajo es igual al trabajo, pero solo para sistemas en los que no hay cambio de volumen.

$$Ex_{trabajo} = W \quad (2)$$

Para la exergía térmica, se tiene en cuenta la temperatura T a la que se produce o realiza la etapa y la temperatura del estado de referencia T_0 . Cuanto más se acerque T a T_0 , menor será el flujo de calor. La ecuación 3 muestra el cálculo de la exergía por calor.

$$Ex_{calor} = \sum \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) * Q \quad (3)$$

En ausencia de efectos nucleares, magnéticos, eléctricos y de tensión superficial, la exergía por masa de un sistema puede dividirse en cuatro componentes, como se observa en la ecuación 4.

$$Ex_{masa} = Ex_{química} + Ex_{física} + Ex_{potencial} + Ex_{cinética} \quad (4)$$

Para la determinación de la exergía química, se utiliza la ecuación 5 y para el caso de que se desee calcular el requerimiento químico de una mezcla, se utiliza la ecuación 6.

$$Ex_{química} = \Delta G_f^0 + \sum v_j Ex_{ch-j}^0 \quad (5)$$

$$Ex_{química-mezcla} = \sum y_i * Ex_{ch-i} + RT_0 \sum y_i * \ln y_i \quad (6)$$

La exergía química puede calcularse utilizando las fórmulas anteriores, sin embargo, en el presente estudio se tomaron algunas de la literatura consultada. Para una corriente que tiene gas ideal la exergía física se calcula mediante la ecuación 7, mientras que para una corriente que está en estado sólido o líquido con capacidad calorífica constante, se utiliza una ecuación diferente, que corresponde a la ecuación 8.

$$Ex_{física} = Cp(T - T_0) - T_0 \left(Cp \ln \ln \frac{T}{T_0} - \right. \quad (7)$$

$$\begin{aligned} Ex_{física-líquida \text{ o sólida}} \\ = Cp \left[(T - T_0) - T_0 \ln \frac{T}{T_0} \right] \\ - v_m(P - P_0) \end{aligned} \quad (8)$$

Utilizando el simulador Aspen Plus, se calculó la exergía física de cada uno de los flujos del proceso, teniendo en cuenta su presión, temperatura y composición. La exergía en una etapa del proceso puede entrar de dos formas, como flujo másico o como servicio industrial que requiere el sistema. En consecuencia, la exergía total de entrada se define como:

$$Ex_{total-ent} = \sum Ex_{masa-ent} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} + \sum Ex_{utilidades-ent} \\ n_{exergia} = 1 - \left(\frac{Ex_{destruida}}{Ex_{total-ent}} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

Por el contrario, la exergía puede salir de una etapa del proceso en forma de productos o como residuos de estos. La ecuación para calcular la producción total de exergía es la siguiente:

$$Ex_{total-sal} = \sum Ex_{sal-productos} + \sum Ex_{sal-residuos} \quad (11)$$

Las irreversibilidades del proceso o de una etapa representan las pérdidas de exergía, es decir, el potencial de trabajo que no se utilizó, esto se define mediante la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} Ex_{total-destruida} \\ = Ex_{total-ent} \\ - \sum Ex_{sal-productos} \end{aligned} \quad (12)$$

Por último, podemos hallar mediante la ecuación 12 la eficiencia exergética del proceso, y del mismo modo, con la ecuación 15 podemos determinar qué porcentaje de exergía se destruyó [13].

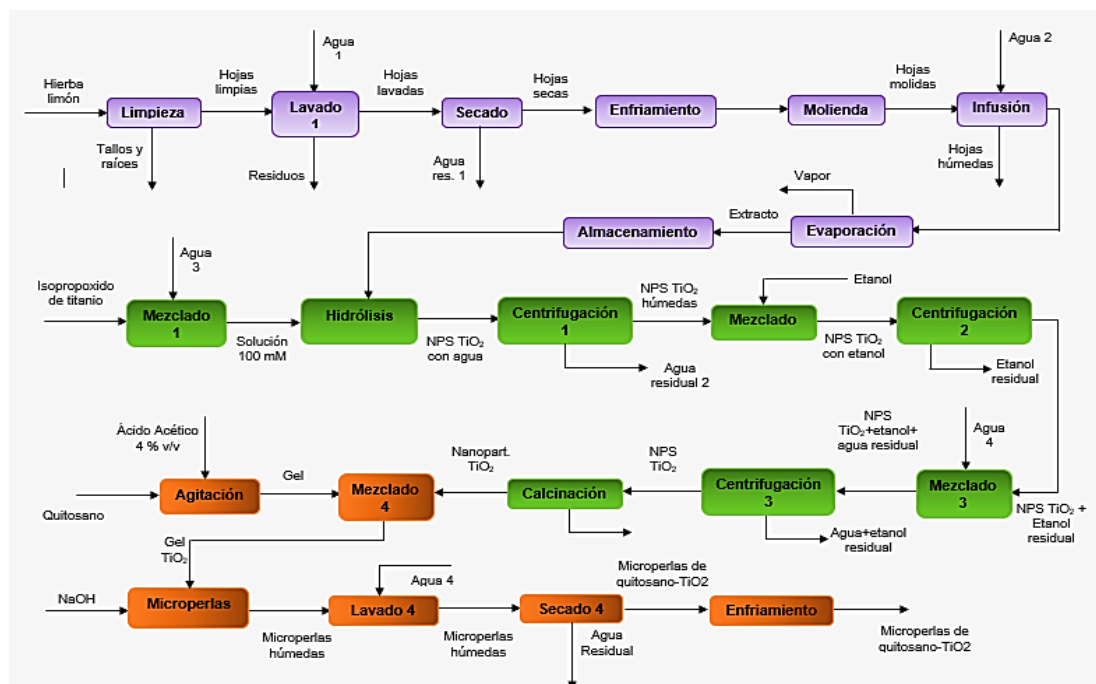
$$\begin{aligned} \%Ex_{destruida,i} &= \\ &= \left(\frac{Ex_{destruida,i}}{Ex_{total-destruida}} \right) * 100\% \end{aligned} \quad (13)$$

Finalmente, podemos hallar mediante la ecuación 12 la eficiencia exergética del proceso, e igualmente con la ecuación 13 podemos determinar qué porcentaje de exergía se destruyó. Para el proceso de síntesis de microperlas de quitosano modificadas con nanopartículas de TiO_2 , hasta el momento no se ha realizado ningún análisis de exergía que nos permita comparar los resultados obtenidos en este estudio con otro similar o parecido.

3. Metodología

El primer paso del proceso consiste en la limpieza de la hierba de limón para eliminar el material celulósico, después se lava, se seca, se enfría y se tritura para reducir el tamaño de las partículas. El material resultante es conducido a una etapa de infusión y evaporación, donde se obtiene un extracto oleoso, posteriormente el flujo del extracto es enviado a un reactor de hidrólisis donde el tetraisopropóxido de titanio reacciona con el agua y el extracto oleoso es utilizado como surfactante para garantizar el nano tamaño de las partículas [20]. La figura 1 muestra el diagrama del proceso de producción de nanopartículas de TiO_2 , las cuales se obtienen mediante química verde empleando un extracto de hierba limón para la síntesis de estas.

Figura 1. Diagrama del proceso de síntesis de microperlas de quitosano



Fuente. Elaboración propia

Una vez formadas las nanopartículas, se envían a una etapa de purificación. Es necesario realizar una operación de secado y mezclado junto con una neutralización del pH, con una solución de etanol al 70 % v/v. Finalmente, las nanopartículas de TiO_2 son llevadas a calcinación para después ser mezcladas con un gel resultante de la mezcla entre quitosano y ácido acético. Tras esta etapa, se obtiene la formación de microperlas de quitosano añadiendo NaOH a la mezcla anterior, pero es necesario lavar, secar y enfriar el producto.

Luego de sintetizar las microperlas de quitosano debido a su capacidad de adsorción, biocompatibilidad, baja toxicidad y propiedades antimicrobianas, pueden usarse en diferentes industrias, dentro de las cuales se destacan la de plásticos, biotecnología, alimentos, cosméticos, entre otras [21]. Según [22], las microperlas o microesferas de quitosano pueden emplearse como transportadores de ácidos nucleicos y otros bioactivos, es decir, pueden ser usadas en procesos biológicos en los que el componente activo que se encuentra microencapsulado se libera de manera gradual. Además, este puede ser usado en la encapsulación de probióticos y como revestimiento de microcápsulas para el colon, así mismo, es empleado como vehículo para el transporte de fármacos, debido a que pueden liberarse de manera progresiva, lo que destaca su potencial en la industria médica y de la biotecnología. De igual forma, se han realizado investigaciones sobre el uso del quitosano para la producción de aerogeles, los cuales pueden ser útiles en sistemas de administración pulmonar [23]. Otras aplicaciones incluyen el uso de las microperlas para formar complejos de plata y películas en la industria de la fotografía, así mismo, es usado en odontología, especialmente en implantes orales y cremas dentales. En la industria cosmética tiene como función suavizar las fórmulas que se aplican en el cabello y como agente espesante. De igual forma, es usado en la industria de adhesivos y del papel, para el recubrimiento de superficies que lo requieran, también es utilizado como preservante de alimentos, para la retención de nutrientes en la agricultura, tratamiento de aguas, entre otros [24].

4. Análisis de resultados

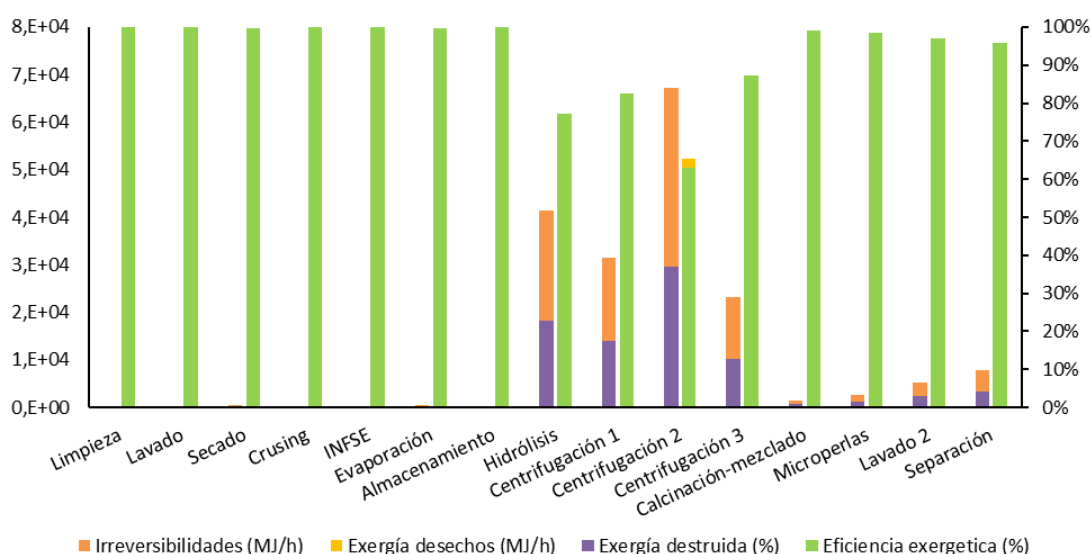
4.1. Análisis exergetico

A continuación, se muestran los resultados obtenidos del análisis exergetico. La figura 2 muestra la eficiencia exergetica de cada etapa, la exergetica por residuo, las irreversibilidades y el porcentaje de estas.

La figura 2 muestra que las mayores irreversibilidades se producen en las etapas de hidrólisis y centrifugación 1, 2 y 3. Además, las etapas de limpieza, lavado, secado, molienda, INFESE, evaporación y almacenamiento presentan las mayores eficiencias de exergetica de todo el proceso, lo que permite maximizar la utilidad del proceso y que la exergetica útil pueda ser usada en etapas posteriores. En cuanto a la exergetica residual, la centrifugación 2 y la separación son las etapas con los valores más altos, con 52 263,2 y 52 785,7 MJ/h respectivamente. En cuanto a la exergetica por servicios industriales, se calculó a partir de las potencias requeridas por los equipos y los calores necesarios, obteniéndose valores bajos en comparación con la exergetica

por masa, por lo que se puede inferir que la exergía por servicios no contribuye significativamente a las irreversibilidades del proceso; sin embargo, el valor más alto del proceso se encuentra en la etapa de hidrólisis, que es de 42 992,9 MJ/h, siendo la etapa con el mayor consumo exergético por hora. A continuación, en la figura 3 se observa el análisis exergético global del proceso de producción de microperlas de quitosano modificadas con nanopartículas de dióxido de titanio.

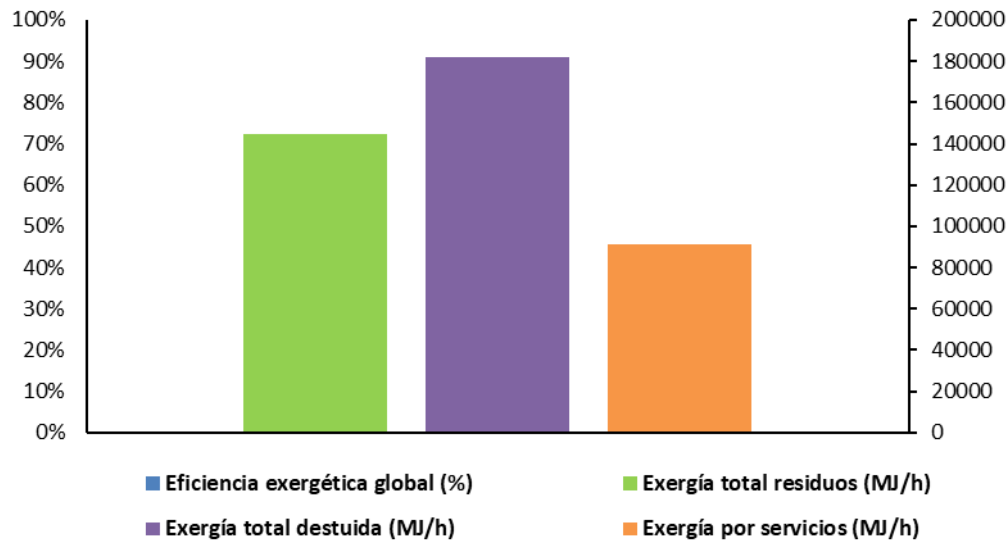
Figura 2. Análisis de exergía por etapas para la producción de microperlas de quitosano modificadas con nanopartículas de TiO_2



Fuente. Elaboración propia

La figura 3 permite conocer los valores de la exergía total de residuos, exergía por servicios e irreversibilidades totales, cuyos valores son 144 445,1 MJ/h, 91 033,7 MJ/h y 181 665,6 MJ/h respectivamente. Además, se obtiene el porcentaje de la eficiencia global del proceso, que es de 0,0439 %, como se puede observar, el proceso tiene una eficiencia bastante baja. La figura 4 muestra un diagrama de Sankey, el cual representa la distribución de la exergía destruida tanto en la síntesis de nanopartículas de TiO_2 , como en la modificación de microperlas de quitosano; como se evidencia, la etapa de centrifugación 2 es la que mayores pérdidas de exergía presenta, esto puede deberse a que se requiere que la separación de sólidos y líquidos ocurra de manera eficiente, por lo que el proceso puede tener un consumo energético mayor en comparación con otras etapas involucradas en el proceso.

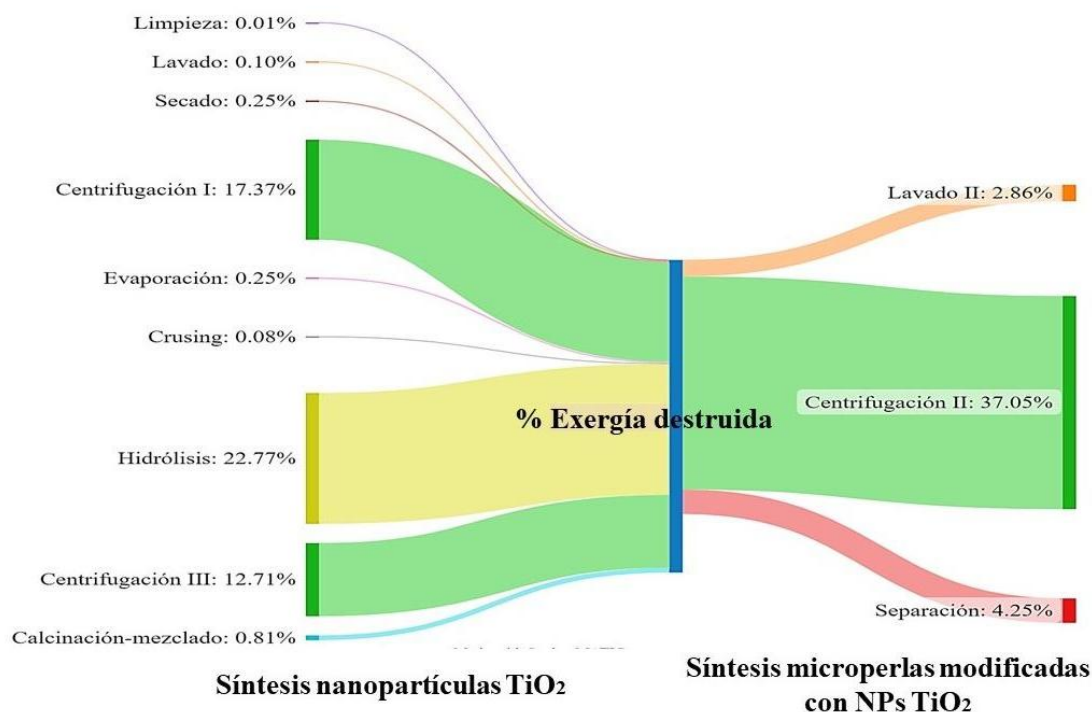
Figura 3. Análisis exergetico global de la producción de microperlas de quitosano modificadas con nanopartículas de TiO_2



Fuente. Elaboración propia

Además, se presentan en porcentajes con valores de 22,77 % para la etapa de hidrólisis, 17,37 % para centrifugación I, 37,05 % para centrifugación 2 y 12,71 % para centrifugación 3; por lo que en estas etapas se visualizan altos índices de irreversibilidades, por lo tanto, presentan las eficiencias exergeticas más bajas del proceso. Se evidencia que la centrifugación 2 es una etapa crítica en términos de eficiencia, debido a que se obtienen los valores más bajos, pero representa una oportunidad de mejora del proceso implementando tecnologías más eficientes en el tratamiento de sólidos y líquidos, y optimizando los equipos. Este tipo de diagrama permite visualizar de manera clara el comportamiento de las pérdidas de exergía, permitiendo destacar las etapas críticas de los procesos.

Figura 4. Diagrama de Sankey para la producción de microperlas de quitosano modificadas con nanopartículas de TiO_2

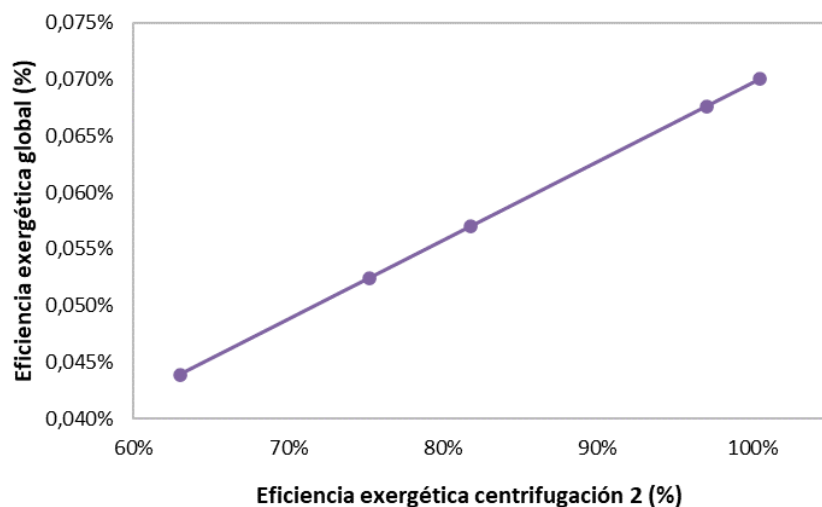


Fuente. Elaboración propia

4.2. Análisis de sensibilidad exergética

A continuación, se muestran los resultados de dos estudios de sensibilidad que indican cómo varía la exergía global del proceso con respecto a las irreversibilidades y a la etapa de reacción de química verde. La figura 5 muestra la variación de la eficiencia global de la exergía cuando disminuye la exergía destruida en la etapa de centrifugación, observándose una variación positiva de la eficiencia global del proceso, cuando en la etapa de centrifugación 2 se producen menos residuos o se aprovechan.

Figura 5. Eficiencia exergética global frente a la eficiencia exergética de centrifugación 2

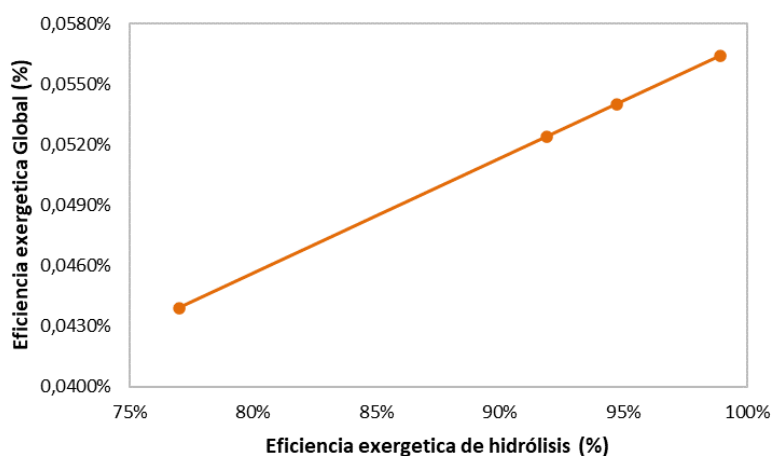


Fuente. Elaboración propia

En la figura 6 se muestra el comportamiento de la eficiencia global del proceso de síntesis de microperlas de quitosano modificado con dióxido de titanio cuando la eficiencia exergética de la etapa de química verde es mayor, es decir, cuando en esta etapa hay menos irreversibilidades y con ello se obtiene menos exergía destruida.

El análisis de sensibilidad se realizó en estas dos etapas, porque eran las que presentaban mayores irreversibilidades, las cuales representan pérdidas exergéticas, es decir, en estas etapas se puede aprovechar mejor el potencial de trabajo.

Figura 6. Eficiencia exergética global frente a la eficiencia exergética de hidrólisis



Fuente. Elaboración propia

A partir de este análisis de sensibilidad, se podría tomar el etanol residual, correspondiente a una corriente residual o de salida de la etapa 2 de centrifugación, acondicionarlo si se requiere para integrarlo nuevamente al proceso, de la misma forma se podría observar en detalle lo que ocurre en el reactor donde ocurre la reacción de hidrólisis y, de esta forma, identificar en qué partes del proceso pierde más exergía.

4. Conclusiones

El análisis exergético realizado al proceso industrial para la síntesis de microperlas de quitosano modificado con TiO_2 , permitió identificar y cuantificar las principales causas de las irreversibilidades termodinámicas del proceso, con el fin de proponer alternativas para su mejora. Se simuló el proceso para una producción de 0,464 t/h de microperlas de quitosano modificado. Los resultados muestran las mayores irreversibilidades para la etapa 2 de centrifugación, con un valor de 67 308,9 MJ/h, representando el 37,05 % de la exergía destruida del proceso, siendo la etapa menos eficiente, mientras que las demás etapas representan el porcentaje restante, resultando la limpieza, lavado, secado, molienda, INFESI, evaporación y almacenamiento las etapas más eficientes. El proceso presentó una eficiencia exergética global del 0,0439 %, lo que es un indicador de que el proceso no aprovecha adecuadamente los residuos y es necesario realizar mejoras.

Se obtuvo un total de 181 665,6332 MJ/h para las irreversibilidades presentes en el proceso, siendo 91 033,73796 MJ/h el valor calculado para el total de servicios industriales. Se observa que la centrifugación 2 y la etapa de separación presentan los valores más elevados de exergía por residuos.

El análisis de exergía es una alternativa que permite conocer los sitios de degradación energética de un proceso, y puede ayudar a mejorar una operación unitaria, una tecnología o un proceso, superando las limitaciones de la primera ley de la termodinámica; además, permite evaluar y seleccionar diferentes alternativas para mejorar el diseño de un proceso, convirtiéndose en una herramienta adecuada para la evaluación de diversos procesos [25].

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad de Cartagena y al proyecto: *“Remoción de hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), presentes en aguas costeras de la bahía de Cartagena, mediante la utilización del exoesqueleto de camarón como fuente de bioadsorbentes modificados con nanopartículas”*, financiado por el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias).

Referencias

- [1] Z. Mármol, G. Páez, M. Rincón et al., "Quitina y Quitosano polímeros amigables. Una revisión de sus aplicaciones", *Rev. Tecn. Cien. URU*, pp. 53-58, 2011. Disponible en <https://revistas.fondoeditorial.uru.edu/index.php/tecnocientificauru/article/view/456>
- [2] R. Kalaivani, M. Maruthupandy, T. Muneeswaran et al., "Synthesis of chitosan mediated silver nanoparticles (Ag NPs) for potential antimicrobial applications", *Front. in Lab. Med.*, vol. 2, n.º 1, pp. 30-35, 2018. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.flm.2018.04.002>
- [3] R. Sulthan, A. Reghunadhan, y S. Sambhudevan, "A new era of chitin synthesis and dissolution using deep eutectic solvents- comparison with ionic liquids", *J. of Mol. Liq.*, vol. 380, p. 121794, 2023. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.121794>
- [4] A. González-Delgado, K. Moreno, y J. Martínez, *Biorrefinación sostenible del camarón: desarrollos desde la Ingeniería de Procesos Asistida por Computador*, Corporación Universitaria Minuto de Dios (Uniminuto), 2022. Disponible en <https://doi.org/10.26620/uniminuto/978-958-763-558-4>
- [5] N. De la Paz, M. Fernández, O. López et al., "Optimización del proceso de obtención de quitosano derivado de la quitina de langosta", *Rev. Ibero. Pol.*, vol. 13, pp. 103-116, 2012. Disponible en <https://reviberpol.org/wp-content/uploads/2019/07/2012-paz.pdf>
- [6] J. Nakamatsu, "La quitosana", *Rev. de Quím. PUCP*, vol. 26, pp. 10-12, 2012. Disponible en <https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/quimica/article/view/6421>
- [7] A. Haider, R. AL-Anbari, G. Kadhim et al., "Exploring potential Environmental applications of TiO₂ Nanoparticles", *E. Pro.*, vol. 119, pp. 332-345, 2017. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.117>
- [8] M. Askari, Z. Tavakoli Banizi, M. Seifi et al., "Synthesis of TiO₂ nanoparticles and decorated multi-wall carbon nanotube (MWCNT) with anatase TiO₂ nanoparticles and study of optical properties and structural characterization of TiO₂/MWCNT nanocomposite", *Optik – Int. Jour. L. and Elec. Opt.*, vol. 149, pp. 447-454, 2017. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jilleo.2017.09.078>
- [9] A. Dicks y D. Loyd, *Integrating Green and Sustainable Chemistry Principles into Education*, Elsevier, 2019. Disponible en <https://doi.org/10.1016/C2018-0-01501-7>

- [10] M. Nasrollahzadeh, *Biopolymer-Based Metal Nanoparticle Chemistry for Sustainable Applications*, Elsevier, 2021 <https://doi.org/10.1016/C2018-0-05268-8>
- [11] T. Rahmawati, T. Butburee, W. Sangkhun *et al.*, "Green synthesis of Ag-TiO₂ nanoparticles using turmeric extract and its enhanced photocatalytic activity under visible light", *Coll. and Sur. A: Phy. and Eng. Asp.*, vol. 665, p. 131206, 2023. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131206>
- [12] S. Meramo, A. Herrera-Barros, y Á. González-Delgado, "Evaluation of large-scale production of chitosan microbeads modified with nanoparticles based on exergy analysis", *En.*, vol. 12, n.º 7, p. 1200, 2019. Disponible en <https://doi.org/10.3390/en12071200>
- [13] N. Aguilar y A. D. González-Delgado, "Análisis exergético de un proceso industrial para la remoción de hidrocarburos aromáticos policíclicos de agua de mar mediante microperlas de quitosano modificadas", *Ing. y Comp.*, vol. 24, n.º 2, p. e2111113, 2022. Disponible en https://revistaingenieria.univalle.edu.co/index.php/ingenieria_y_competitividad/article/view/11113
- [14] F. López, S. Meramo, L. Ricardez *et al.*, "Insights from an exergy analysis of a green chemistry chitosan biorefinery", *Chem. Eng. Res. and Des.*, vol. 194, pp. 666-677, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.04.038>
- [15] S. Hamdy, F. Moser, T. Morosuk *et al.*, "Exergy-based and economic evaluation of liquefaction processes for cryogenics energy storage", *En.*, vol. 12, n.º 3, p. 493, 2019. Disponible en <https://doi.org/10.3390/en12030493>
- [16] S. Meramo-Hurtado. Á. González, L. Rehmann *et al.*, "Comparative analysis of biorefinery designs based on acetone-butanol-ethanol fermentation under exergetic, techno-economic, and sensitivity analyses towards a sustainability perspective", *J. of Cle. Prod.*, vol. 298, p. 126761, 2021. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126761>
- [17] D. Martínez, A. Puerta, R. Mestre *et al.*, "Exergy-based evaluation of crude palm oil production in North-Colombia", *Aus. J. of B. and App. Sci.*, pp. 82-88, 2016.
- [18] W. Choi, R. Ooka, y M. Shukuya, "Exergy analysis for unsteady-state heat conduction", *Int. J. of H. and Mass Trans.*, pp. 1124-1142, 2018. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2017.09.057>
- [19] T. Herrera, V. Parejo, y Á. González-Delgado, "Quality of Energy Conservation in an Avocado Oil Extraction Process via Exergy Analysis", *Che. Eng. Trans.*, vol. 91, pp. 241-246, 2022. Disponible en <https://doi.org/10.3303/CET2291041>

- [20] S. Meramo, H. Bonfante, G. De Ávila-Montiel *et al.*, “Environmental Assessment of a Large-Scale Production of TiO₂ Nanoparticles via Green Chemistry”, *Chem. Eng. Trans.*, vol. 70, pp. 1063-1068, 2018. Disponible en <https://doi.org/10.3303/CET1870178>

- [21] M. Elotaiby, A. Elzayat, W. Awad *et al.*, “Physical studies of chitosan/PEG loaded Fe₂O₃ nanoparticles microbeads as a based biodegradable material for radiation shielding”, *Phy. Op.*, vol. 19, p. 100209, 2024. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.physo.2024.100209>

- [22] A. D. Olivera, M. F. Barreiro, y M. Lopretti, “Microesferas de quitosano como potenciales transportadores de ácidos nucleicos y otros bioactivos”, *Rev. Ibero. Pol.*, vol. 13, 2012. Disponible en <https://reviberpol.org/wp-content/uploads/2019/07/2012-olivera.pdf>

- [23] K. Z. Saborit-Pino, “Micropartículas porosas nanoestructuradas de quitosano acarreadoras de moléculas bioactivas”, *Tesis de maestría*, Centro de Investigación en Alimentación y Desarrollo, A.C, 2015. Disponible en <http://ciad.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1006/64>

- [24] A. Romero-Serrano y J. Pereira, “Estado del arte: Quitosano, un biomaterial versátil. Estado del Arte desde su obtención a sus múltiples aplicaciones”, *Rev. Ing. UC*, vol. 27, n.º 2, pp. 118-135, 2020. Disponible en <https://www.redalyc.org/journal/707/70764230002/html/>

- [25] Y. Peralta, Á. González, y V. Kafarov, “Evaluation of alternatives for microalgae oil extraction based on exergy analysis”, *App. E.*, pp. 226-236, 2013. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.06.065>