

Diseño de un reactor químico de polimerización para la producción de ácido poliláctico

Design of a chemical polymerization reactor to produce polylactic acid

Aleida Loor Ch.^{1*}, Yulexy Mejía S.¹, Yunet Gómez S.¹, María Riera¹

¹ Universidad Técnica de Manabí, Facultad de Ciencias Matemáticas, Físicas y Químicas, Departamento de Procesos Químicos, Alimentos y Biotecnología, Ecuador

Fecha de recepción: 29 de junio de 2022. Fecha de aceptación: 31 de octubre de 2022.

*Autor de correspondencia: aloor4375@utm.edu.ec

Resumen. Debido a los problemas medioambientales ocasionados por la producción de plásticos convencionales, se ha optado por el desarrollo de alternativas como la producción de polímeros de fuentes renovables, los cuales se pueden obtener de materias primas ricas en almidón. La síntesis de estos materiales requiere el establecimiento de condiciones de trabajo, además del dimensionamiento de equipos para alcanzar una máxima eficiencia. En este sentido, el presente trabajo tiene como objetivo diseñar un reactor químico para la producción de ácido poliláctico, estableciendo las principales características del producto y los datos más relevantes para el diseño. La polimerización se realizó por el método de apertura de anillo (ROP), con la síntesis de lactida en presencia de metanol y cloruro de estaño (II) como catalizador. Entre los resultados obtenidos se presenta el volumen del reactor en función de la velocidad de polimerización que es de 3.74 L, la densidad del producto fue de 1,171.21 kg/m³, la velocidad de reacción fue de 0.0036 mol/L*h y una potencia requerida de 0.14 kW, lo que indica que no es necesaria la implementación de un motor trifásico. El dimensionamiento de equipos es un aspecto que considera el diseño de plantas, por ello se debe considerar la disponibilidad de materias primas, condiciones operaciones y rendimientos del proceso, para un adecuado cálculo de reactores a emplear en procesos de polimerización.

Palabras clave. Ácido poliláctico, biorreactor, dimensionamiento, polimerización.

Abstract. Due to the environmental problems caused by the production of conventional plastics, it has been decided to develop alternatives such as the production of polymers from renewable sources, which can be obtained from raw materials rich in starch. The synthesis of these materials requires the establishment of working conditions, in addition to the dimensioning of equipment to achieve maximum efficiency. In this sense, the present work aims to design a chemical reactor for the production of polylactic acid, establishing the main characteristics of the product and the most relevant data for the design. The polymerization was carried out by the ring opening method (ROP), with the synthesis of lactide in the presence of methanol and tin chloride (II) as catalyst. Among the results obtained, the volume of the reactor is presented as a function of the polymerization rate, which is 3.74 L, the density of the product was 1,171.21 kg/m³, the reaction rate was 0.0036 mol/L*h and a required power of 0.14 kW, which indicates that the implementation of a three-phase motor is not necessary. The sizing of equipment is an aspect that considers the design of plants, therefore the availability of raw materials, operating conditions and process yields must be considered, for an adequate calculation of reactors to be used in polymerization processes.

Keywords. Polylactic acid, bioreactor, sizing, polymerization.

1. Introducción

Las preocupaciones ambientales y la naturaleza finita de las materias primas petroquímicas han suscitado recientemente el interés por el uso de la ruta biotecnológica en lugar de la química [1]. Esto ha motivado la búsqueda de nuevos materiales, a partir de fuentes renovables que contribuyan con

la preservación del medio. Casi todas las actividades agrícolas generan desechos en grandes cantidades en muchos países y su mal manejo podría desencadenar problemas serios de contaminación y una enorme pérdida económica [2]. Anualmente la agroindustria del Ecuador genera cerca de

2,200 millones de kilogramos de residuos, los cuales en su mayoría están compuestos por almidón o recursos lignocelulosos que terminan incorporándose a cualquier matriz del ecosistema ocasionando un impacto negativo al ambiente y la salud humana [3].

La yuca es uno de los tubérculos ricos en almidón que se cultivan en muchos países de Asia, América Latina y África, siendo una planta tropical que puede crecer sobre suelos infértiles o carentes de grandes nutrientes, soporta sequías y lluvias intensas [4] [5]. El cultivo de la yuca se presenta en la actualidad como una alternativa con amplias ventajas comparativas para el Ecuador, debido a su gran adaptabilidad a las diversas condiciones edafoclimáticas existentes en el país, por lo que se cataloga como un cultivo de subsistencia [6]. Sin embargo, su procesamiento genera desechos sólidos y líquidos que incluyen hojas, tallos, cáscaras, aguas residuales y bagazo de almidón [7] contribuyendo en gran medida a la contaminación ambiental pues suelen ser acumulados en los agroecosistemas, quemados en la superficie del suelo o eliminados indiscriminadamente en cuerpos de agua [8].

El ácido poliláctico (APL), es un biopolímero que se produce a partir del ácido láctico (AL) ópticamente puro, a partir de la fermentación de azúcares de residuos provenientes del procesamiento del maíz, yuca o la caña de azúcar [9] [10], como una alternativa al uso de plásticos. Investigaciones previas demuestran la posibilidad de usar residuos de yuca combinados con otros residuos orgánicos, para obtener APL con el fin de aprovechar los residuos generados en la actividad agrícola, y a la vez generar un producto de valor agregado e interés comercial [11]. La yuca y por consiguiente los residuos que se derivan de ella, es una fuente rica de almidón con la cual se pueden obtener matrices poliméricas como el almidón termoplástico (TPS) y el APL [12]. El principal costo para la producción de AL está asociado con la fermentación y el sustrato utilizado. Con el objetivo de minimizarlos y valorizar los residuos agroindustriales, se están estudiando sustratos alternativos como el bagazo de yuca, paja de trigo, lodo de papel, bagazo de manzana y bagazo de caña de azúcar [13]. Dentro de este contexto, los residuos de la yuca se consideran útiles para la producción de AL [14] y su posterior polimerización, siendo las formas más utilizadas a escala industrial para la obtención de APL, la policondensación directa de ácido láctico [15] y la polimerización por apertura de anillo del atenuador cíclico de ácido láctico, conocido como lactida (ROP) [13].

La polimerización es una de las etapas principales del proceso para la producción de APL y se lleva a cabo en un reactor químico en régimen discontinuo o Batch [16], [17]. El correcto diseño del reactor ajustado a las condiciones de operación (presión, tiempo, temperatura) y materias primas seleccionadas, permite obtener un producto (APL) con propiedades altamente competitivas [13], en comparación con polímeros de base petroquímica y posee propiedades físicas, mecánicas y de barrera relativamente buenas en comparación con los materiales sintéticos. Además, puede ser utilizado en la industria como sustituto de polímeros no degradables y en la medicina como biomaterial debido a sus propiedades de biocompatibilidad, biodegradabilidad, resistencia mecánica y capacidad de proceso [17].

En este sentido, se desarrolló la presente investigación con el propósito de diseñar un reactor químico para la producción de ácido poliláctico a partir del ácido láctico obtenido de los residuos de la yuca. Se tomó como base, datos provenientes de la literatura especializada para el estudio cinético, termodinámico y posterior caracterización y dimensionamiento del reactor.

2. Materiales y métodos

Para el diseño del reactor químico de polimerización se realizó una revisión bibliográfica acerca de los procesos de producción de APL y de los parámetros de operación, como temperatura, presión, concentración inicial del monómero y concentración de catalizador, necesarias para determinar las condiciones de operación para la obtención de ácido poliláctico.

Como han descrito Cuervo y Echeverry [18], a partir de la modificación del proceso mencionado por Medina et al. [19], la esterificación para producir un diéster del ácido láctico, ocurre a partir de una reacción con ácido sulfúrico a 60 % (v/v) de pureza y se utiliza metanol y cloruro de estaño II como catalizador.

2.1 Diseño del reactor químico

Se diseñó un reactor de tipo Batch para la polimerización del ácido láctico. En el dimensionamiento del reactor se trabajó bajo la guía del código ASME sección VIII división I, en donde se describen las normas de construcción de recipientes a presión; además se consideran especificaciones generales de altura (h) y diámetro (D).

2.1.1 Condiciones de operación

En la tabla 1 se presentan las condiciones de operación del reactor diseñado de acuerdo con Briones y Riera [11].

Tabla 1: Condiciones de operación para la obtención de APL

Condiciones	Valor
Temperatura (°C)	120
Presión de vacío (bar)	0.1
Concentración de catalizador (%p/p)	6
Tiempo (h)	7

Fuente: Briones y Riera [11].

2.1.2 Cálculos cinéticos

Según Odian [20], la ruta de polimerización en principio se puede definir como se muestra en la ecuación 1:

$$\frac{-d[COOH]}{dt} = k[COOH][OH][AH] \quad (1)$$

Donde $[COOH]$ es la concentración del grupo carboxilo (g/L), $[OH]$ la concentración del grupo hidroxilo (g/L), la identidad $[HA]$ varía de acuerdo con la adición o no de un ácido fuerte a la reacción como catalizador (g/L), dt es la derivada en función del tiempo, k es la constante cinética de la ecuación ($L \text{ mol} \cdot h$).

Utilizando de 3 gramos a 6 gramos de catalizador, $[AH]$ en la ecuación 1 se transforma en la concentración del catalizador, y dado que esta permanece constante a lo largo de la polimerización, a partir de un análisis desarrollado por Odian [20], se obtiene la ecuación 2:

$$\frac{1}{(1-p)} = [M_0]k'(t + 1) \quad (2)$$

Donde $[M_0]$ es concentración de los grupos funcionales en el tiempo cero, k' es la constante que agrupa los términos constantes de la ecuación, t es el tiempo en horas, p es la fracción de los grupos funcionales carboxilo o hidroxilo que han reaccionado en un tiempo.

De acuerdo con los resultados obtenidos por Escobar y Naranjo [21], la reacción de policondensación entre grupos alcohol y ácido puede asociarse con una serie de reacciones de esterificación sucesivas, además este estudio determinó que la cinética de la reacción de policondensación del ácido láctico sigue una cinética de segundo orden, debido a que $\frac{1}{(1-p)}$ y t guardan una relación lineal.

2.1.3. Cálculo de la densidad APL

En función de la temperatura, es posible aproximar la densidad del APL utilizando la ecuación de Witzke [22], (ecuación 3):

$$\rho = \frac{\rho_{150}}{1+(\alpha_1*(T-150))} \quad (3)$$

Donde ρ es la densidad del APL en g/cm^3 , T es la temperatura de trabajo ($120^\circ C$), ρ_{150} es la densidad del APL a la temperatura de referencia de $150^\circ C$ con un valor de $1.14 g/cm^3$, α_1 es el coeficiente de expansión térmica ($7.4 \times 10^{-4} C^{-1}$).

2.1.4. Cálculo de la viscosidad del APL

De acuerdo con lo expresado por Ramírez y Katime [23], la viscosidad del APL se puede determinar con la ecuación 4, correspondiente a la temperatura de trabajo establecido para el reactor de polimerización.

$$\mu = A * M_w * \left(1 + \left(\frac{M_w}{M_c}\right)^{P-1}\right) \quad (4)$$

Donde μ es la viscosidad del APL ($Pa \cdot s$), A es la variable de la ecuación con un valor de $1.35 \times 10^{-5} \text{ kmol/m} \cdot s$, M_w es el peso molecular promedio en peso ($100,000 \text{ kg/kmol}$), dado que, el APL de alto peso molecular fundido en el reactor de polimerización se comporta como un fluido no newtoniano del tipo pseudoplástico, M_c es el peso molecular crítico ($9,211 \text{ kg/kmol}$), P es la variable de la ecuación con un valor de 3.5.

2.1.5. Cálculo del número de Reynolds

El número de Reynolds es una expresión adimensional que permite caracterizar el movimiento de un fluido. Relaciona densidad, viscosidad, velocidad y la dimensión típica de un flujo. La presencia o ausencia de turbulencia en un fluido que se agita se puede relacionar con un número de Reynolds [24]. Para el cálculo del número de Reynolds se empleó la ecuación 5:

$$R = \frac{D_A^2 * N * \rho}{\mu} \quad (5)$$

Donde D_A es el diámetro del agitador en metros, N es la velocidad de giro (rps), μ es la viscosidad ($Pa \cdot s$), ρ es la densidad (kg/m^3).

2.1.6. Cálculo de la constante de la velocidad de reacción

Para la temperatura de trabajo, se obtuvo la constante de la velocidad de reacción (k) por medio de la ecuación de Arrhenius (Ecuación 6).

$$k = k_1 * e^{\frac{E_a}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T}\right)} \quad (6)$$

Donde k es la constante de velocidad a la temperatura de operación ($L/mol \cdot h$), k_1 es el factor preexponencial referenciado a la temperatura de $25^\circ C$ con un valor de $3.28 \times 10^{-7} (L/mol \cdot h)$, E_a es la energía de activación (J/mol) con un valor de un valor de $57,615 J/mol$ de acuerdo a Pinzón et al [15], R es la constante de los gases ideales $8.31 (J/mol \cdot K)$, T es la temperatura de operación (K) y T_1 es la temperatura de referencia de $150^\circ C$ en escala absoluta ($423.15 K$).

2.1.7. Cálculo de la velocidad de reacción (polimerización)

En función de lo expuesto por Ramírez y Katime [23], el cálculo de la velocidad de polimerización se puede realizar siguiendo la siguiente expresión (ecuación 7):

$$-Y_p = k * (M * (1 - p))^2 \quad (7)$$

Donde $-Y_p$ es la velocidad de reacción en $mol/L \cdot h$, k es la constante cinética ($L/mol \cdot h$), M es el factor promedio con un valor de $13.92 mol/L$, p es la fracción de los grupos funcionales carboxilo o hidroxilo que han reaccionado en un tiempo (0.967).

2.1.8. Cálculo del volumen necesario en función de la velocidad de polimerización

Tomando como punto de inicio la ecuación de diseño para reactores batch, según Lim, Auras y Rubino [25], integrando y modificando las variables para reactores de polimerización, se llega a la ecuación de diseño (ecuación 8) presentada a continuación:

$$V = \frac{N_p * x_p}{-Y_p * t} \quad (8)$$

Donde V es el volumen del reactor de polimerización en L , N_p es el valor de las moles del polímero obtenido experimentalmente por Ramírez y Katime [23] ($0.5802 mol$), X_p es la conversión determinada experimentalmente por Alomoto y Ormazá [26] (0.731), $-Y_p$ es la velocidad de reacción en $mol/L \cdot h$ y t es tiempo de polimerización (h).

2.1.9. Dimensiones del reactor

Para efectuar los cálculos de las dimensiones del cilindro del reactor, se basó en el diámetro de un tubo de acero inoxidable calidad AISI 316 L de $0.147 m$ ecuación 9:

$$V_l = \frac{\pi}{4} * D^2 * h \quad (9)$$

$$\frac{h}{D} = 1.5 \quad (10)$$

Donde V_l es el volumen del reactor en m^3 , D es el diámetro del reactor en m y h es la altura del reactor en m (figura 1). Según Alomoto y Ormazá [26] con el fin de obtener una agitación óptima y contar con una mayor superficie para los gases resultantes de la reacción, se sugiere una relación entre la altura y el diámetro del tanque igual a 1.5 (ecuación 10).

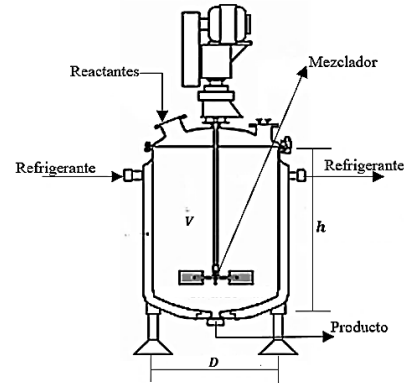


Figura 1. Representación esquemática del Reactor.

2.1.10. Sistema de agitación

Atendiendo al objetivo del sistema de agitación y las propiedades físicas del producto, se elige el impulsor adecuado para el proceso; la potencia para el mezclado se encuentra a partir de correlaciones empíricas establecidas para el impulsor [21].

En función de las propiedades fisicoquímicas (densidad y viscosidad), que poseen los reactivos y el producto a obtener, se establece que el agitador que mejor se adapta al proceso es el de cinta helicoidal. De acuerdo con las relaciones geométricas dadas por Kuriyama, Arai y Saito [27] se utilizaron las ecuaciones 11 a la 16 para agitadores helicoidales, para determinar las dimensiones del sistema de mezclado con cinta helicoidal, debido a que estas proporciones ayudan a minimizar el consumo de potencia y hallar así el valor de la constante geométrica.

$$\frac{D_t}{D_A} = 1.12 \quad (11)$$

$$\frac{S}{D_A} = 1.05 \quad (12)$$

$$\frac{w}{D_A} = 0.12 \quad (13)$$

$$\frac{h_A}{D_A} = 1.05 \quad (14)$$

$$\frac{h_L}{D_A} = 1.16 \quad (15)$$

$$N_R = 2 \quad (16)$$

Donde D_t es el diámetro del reactor en m, D_A es el diámetro del agitador en m, S son los pasos de la cinta helicoidal en m, W es el ancho de la hoja del agitador en m, h_A es la altura del agitador en m, h_L es el nivel del líquido en m y NR es el número de cintas.

2.1.11. Potencia consumida por el agitador

Para hallar la potencia consumida por el agitador, es fundamental fijar la velocidad de giro de este. El nivel de agitación óptimo debe ser bajo por lo que Escobar y Naranjo [21] recomiendan una velocidad de agitación menor a 50 rpm y dado que el sistema lo constituye un fluido viscoso, se estableció una velocidad de agitación de 40 rpm. Con el cálculo del número de Reynolds se conoce el régimen en el que se trabaja, una vez obtenido el valor, este señala que el agitador opera en régimen laminar. En consecuencia, se determina la constante geométrica relacionada al consumo de potencia k_p siguiendo los lineamientos expuestos en el trabajo de Kuriyama, Arai y Saito [27]. Usando la ecuación 17:

$$k_p = (91 * N_R)^{0,79} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{D_T}{D_A} - 1 \right) \right)^{-0,31} \left(\frac{S}{D_A} \right)^{-0,37} \left(\frac{W}{D_A} \right)^{0,16} \left(\frac{h_L}{D_A} \right) \quad (17)$$

Reemplazando las proporciones geométricas se obtiene el valor de k_p el cual es de 107.13 para utilizarlo en el cálculo de la potencia consumida por el sistema de agitación mediante la ecuación 18:

$$P = K_p * \mu * D_A^3 * N^2 \quad (18)$$

Donde P es la potencia consumida en W, k_p la constante geométrica calculada en la ecuación 17, μ es la viscosidad del APL en Pa*s, D_A es el diámetro del agitador en m, N la velocidad de giro en (tps).

3. Resultados y discusión

En lo referente al estudio realizado se tiene que el ácido poliláctico presenta una viscosidad y densidad de 525.63 Pa*s y 1,171.2 kg/m³ respectivamente, con un número de Reynolds de 0.03, este indica que el agitador trabaja en régimen laminar, similar a lo encontrado por Escobar y Naranjo [21], quienes reportaron un valor de 0.026. Para las condiciones de operación de 120°C y una presión de 0.1bar establecidas, se obtiene un volumen del reactor de 3.74x10⁻³ m³, una altura de 0.22 m y una constante geométrica de 118.45 para agitadores helicoidales y una potencia requerida de 0.14 kW, según lo señalado por Kuriyama, Arai y Saito [27] Dado que la potencia es menor a 1 kW, no es necesaria la utilización de un motor trifásico los cuales se emplean al trabajar con mayor potencia.

Estos valores se contrastan con diferentes autores como se observa en la tabla 2, con el trabajo realizado por Rodríguez [28], en el cual se establecen como datos de operación una temperatura de 110°C y una presión de vacío de 10mm de Hg. Se indica que el volumen del reactor es de 0,0013 m³ con una altura de 0.155 m y diámetro de 0.13 m en ambos casos, y para el dimensionamiento del agitador, se obtuvo una potencia de 0.09 kW.

Los resultados presentados por Escobar y Naranjo [21] indican un volumen del reactor de 0.00417 m³ con una altura de 0.23 m y un diámetro de 0.15 m. Estos datos se obtuvieron con una temperatura de 125°C y una presión de 0.1 bar (75 mmHg) como condiciones de operación, además la potencia requerida para el sistema fue de 0.19 kW.

De acuerdo con el trabajo desarrollado por Giaroli y Maggioni [29], utilizando ácido láctico como materia prima con condiciones de operación de 140°C de temperatura y una presión de 25 mm de Hg el reactor presentó un volumen correspondiente a 0.209 m³, debido a que el diseño de este es de índole industrial, con lo cual su sistema de agitación consta de un diámetro del agitador de 0.46 m, diámetro del reactor de 1.38 m y una altura de 1.20 m. La potencia requerida para el sistema de 0.46 kW,

Adicionalmente, se encuentra el trabajo realizado por Yamanuqué Chero [30] mostrando similitud con las condiciones de operación del presente estudio con una temperatura de 120°C y una presión de 75 mm Hg se obtuvo un volumen de reactor de 0.0052 m³ con una altura de 0.23 m y un diámetro de reactor de 0.20 m, lo que permitió obtener la potencia requerida por el proceso de 0.211 kW, siendo estos datos semejantes a los reportados en el estudio.

Tabla 2. Comparación de resultados obtenidos para el diseño del reactor de polimerización en la producción de APL.

Condiciones y resultados	Resultados obtenidos	Rodríguez [28]	Escobar y Naranjo [21]	Giaroli y Maggioni [29]	Yamanuqué Chero [30]
Temperatura (°C)	120	110	125	140	120
Presión (mmHg)	75	10	75	25	75
Volumen (m3)	0.00374	0.001	0.00417	0.209	0.0052
Diámetro (m)	0.147	0.131	0.15	1.38	0.20
Altura (m)	0.22	0.155	0.23	1.10	0.23
Potencia (kW)	0.14	0.09	0.19	0.46	0.211

Dentro de la investigación se logró determinar que la constante de velocidad es de 0.017 L/mol*h a una temperatura de operación de 120°C, la cual resulta menor a la constante obtenida por Castro y Vera [31] la cual tiene un valor de 0.06 L/mol*h, dado que se trabajó con una temperatura de 150°C. Dicha temperatura no puede ser mayor porque se presentaría un aumento en la evaporación de monómero y oligómeros [19], mientras que a una temperatura menor, se disminuiría la conversión. Por otra parte, dentro del trabajo desarrollado por Escobar y Naranjo [21], la constante de velocidad fue de 0.08 L/mol*h a una temperatura de operación de 160°C, lo cual indica que el aumento de la constante de velocidad es directamente proporcional al incremento de temperatura.

La velocidad de reacción dentro del estudio es de 0.0036 mol/L*h, lo que permite establecer el volumen necesario en función de la velocidad de la polimerización y cuyo valor es de 3.74 L. Estos datos se asemejan a los presentados por Escobar y Naranjo [21] con una velocidad de reacción de 0.017 mol/L*h y volumen de 4.13 L, con una temperatura inicial de 125°C y una presión de 0.1 bar mismas que se asemejan a las condiciones de operación establecidas en la presente investigación.

En cuanto a la densidad del APL se obtuvo un valor de 1.17 kg/m³, siendo similar a los resultados reportados en una investigación donde se utilizó almidón de papa a una temperatura de 180°C, una presión de 0.43 bar y un tiempo de 5 horas, para obtener ácido poliláctico con una densidad de 1.64 kg/m³ [32]. Así mismo Briones y Riera [11] utilizaron almidón de yuca y cera de abeja para obtener un ácido poliláctico con una densidad de 1.27 kg/m³ siendo un valor cercano a lo encontrado en esta investigación.

4. Conclusiones

El diseño de un reactor químico comienza con el establecimiento de las condiciones operacionales requeridas en la obtención de ácido poliláctico. A partir de la consulta de fuentes bibliográficas, se establecieron los parámetros de producción de APL, con lo cual se dimensionó un reactor de 3.74 L de volumen, con un sistema de agitación ajustado, contemplando una potencia de 0.14 kW lo que indica que al ser menor a 1 kW no requiere la incorporación de un motor trifásico. Con los cálculos realizados, se obtuvo una densidad de 1,171.21 kg/m³, viscosidad del APL de 525.63 Pa*s y 0.0036 mol/L*h de velocidad de reacción. Los valores correspondientes a características físicas y velocidad de reacción encontrados fueron similares a trabajos contrastados por la bibliografía, presentando claras diferencias especialmente en el tipo de materia prima y en la variación de temperaturas. Este trabajo sirve como referencia, en el diseño

de reactores a medida para la polimerización de ácido láctico. Se recomienda para futuras investigaciones considerar la disponibilidad de materias primas, condiciones operaciones y rendimientos del proceso, para un adecuado cálculo de reactores a emplear en procesos de polimerización además de evaluar la variación que puede presentarse en las condiciones de operación, determinando las óptimas para un proceso a mayor escala.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Departamento de procesos Químicos, Alimentos y Biotecnología de la Universidad Técnica de Manabí donde se desempeñan como estudiantes y docentes de esta institución

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

REFERENCIAS

- [1] N. Msuya, J. Katima, E. Masanja y A. Temu, «Poly(lactic-acid) production from monomer to polymer a review,» Scientific Federation, pp. 1-15, 2017.
- [2] I. O. A. y. O. A. Adebisi, «Agricultural Solid Wastes: Causes, Effects, and Effective Management,» IntechOpen, 2020.
- [3] M. A. Riera, S. Maldonado y R. R. Palma, «Residuos agroindustriales generados en Ecuador para la elaboración de bioplásticos,» Rev. Ing. Ind., vol. 17, n° 3, pp. 227-247, 2018.
- [4] R. C. R. S. R. S. Mohapatra, «Bioethanol From Biorenewable Feedstock: Technology, Economics, and Challenges,» Eds. Academic Press, pp. 3-27, 2019.
- [5] J. H. C. y. D. J. Connor, «Chapter 19- Cassava Crop Physiology Case Histories for Major Crops,» 2019, pp. 3-27.
- [6] N. Paredes Andrade y et al, «EC: INIAP-Estación Experimental de la Amazonía,» Guía para la producción y manejo integrado del cultivo de yuca para la Amazonia Ecuatoriana, 2021. [En línea]. Available: <http://repositorio.iniap.gob.ec/handle/41000/5824>. [Último acceso: 6 mayo 2022].
- [7] K. M. Oghenejoboh, U. M. Orugba, U. M. Oghenejoboh y S. E. Agarry, «Value added cassava waste management and environmental sustainability in Nigeria: A review,» Environ. Chall., vol. 4, pp. 100-127, 2021.
- [8] M. Petre, F. Patrulescu y R. I. Teodorescu, «Controlled cultivation of mushrooms on winery and vineyard wastes,» de Mushroom Biotechnology., Elsevier, 2016, pp. 31-47.
- [9] G. Li y et al., «Synthesis and Biological Application of Polylactic Acid,» Molecules, vol. 25, n° 21, p. 5023, 2020.
- [10] M. S. Lopes, A. Jardini y R. M. Filho, «Synthesis and Characterizations of Poly (Lactic Acid) by Ring-Opening Polymerization for Biomedical Applications,» Chem. Eng. Trans., vol. 38, pp. 331-336, 2014.

- [11] J. S. Briones y M. Riera, «Desarrollo de un material biodegradable a partir de los residuos de la cera de abeja y yuca (Manihot esculenta),» vol. 15, n° 3-11, 2022.
- [12] H. Ismail, A. W. M. Kahar y K. Y. Low, «Study of Thermoplastic Starch Incorporation on Polylactic Acid/Natural Rubber Blends via Dynamic Vulcanization Approach,» de Biofiller-reinforced Biodegradable Polymer Composites, CRC Press, 2020, pp. 91-117.
- [13] X. Montané, J. Montornes, A. Nogalska, M. Olkiewicz, M. Giamberini, R. Garcia-Valls, M. Badia-Fabregat, I. Jubany y B. Tylkowski, «Synthesis and synthetic mechanism of Polylactic acid,» Physical Sciences, vol. 5, n° 12, 2020.
- [14] M. Abdel-Rahman, Y. Tashiroc y K. Sonomotoa, «Lactic acid production from lignocellulose-derived sugars using lactic acid bacteria,» Overview and limits. Journal of Biotechnology, vol. Vol 156, pp. 286-301, 2011.
- [15] J. Pinzón, J. Martínez, A. Espinosa, A. Pérez y P. Narváez, «Polimerización de ácido (DL) láctico mediante policondensación por fusión directa. Estudio cinético De la etapa de oligomerización,» Revista Colombiana de Química, pp. 125-134, 2006.
- [16] P. Yoshida, «US20130267675A1,» Process for producing polylactic acid and reactors for use in said process, 10 Octubre 2013. [En línea]. Available: <http://patents.google.com/patent/US20130267675A1/en>.
- [17] S. Liu, S. Qin, M. He, D. Zhou, Q. Qin y H. Wang, «Current applications of poly(lactic acid) composites in tissue engineering and drug delivery,» de Compos. Part B Eng., vol. 199, 2020, pp. 108-238.
- [18] L. V. Cuervo Garcés y J. C. Echeverry Vargas, Evaluación de la síntesis de ácido poliláctico proveniente del suero de quesería a nivel de laboratorio, Bogotá: Fundación Universidad de América, 2016.
- [19] J. Medina, F. García, B. Paricaguán, J. Rojas, X. Castro y F. Lugo, «Obtención de ácido láctico por fermentación del mosto del fruto de cují (prosopis juliflora) y su posterior policondensación con zinc metálico a poli (ácido láctico) (pla),» Revista INGENIERÍA UC, vol. 21, n° 2, pp. 52-59, 2014.
- [20] G. Odian, Principles of polumerization, Wiley-Interscience., 2004.
- [21] C. Escobar y C. Naranjo, Diseño y construcción de un reactor de polimerización para la síntesis de ácido poliláctico, Quito, 2021.
- [22] D. Witzke, Introduction to properties, engineering, and prospects of polylactide polymers., 1997.
- [23] A. Ramirez y I. Katime, «Diseño de reactores de polimerización,» Revista Iberoamericana de Polímeros, pp. 299-320, 2008.
- [24] V. Castillo, Diseño y cálculo de un agitador, Chile: Universidad del Bío Bío , 2013.
- [25] A. Lim, R. Auras y M. Rubino, «Processing technologies for poly (lactic acid),» Progress in Polymer Science, pp. 820-852, 2008.
- [26] P. Alomoto y E. Ormaza, Obtención de ácido poliláctico (PLA) a partir del ácido láctico mediante el uso del catalizador de octoato de estaño, Quito, 2021.
- [27] M. Kuriyama, K. Arai y S. Saito, Mechanism of heat transfer to pseudoplastic fluids in an agited tank with helical ribbon, Journal of Chemical Engineering Japan, 1983.
- [28] J. A. Rodríguez Rodríguez, «Diseño de un sistema de reacción batch para polimeros biodegradables,» Bogotá, 2004.
- [29] G. N. Giaroli y A. A. Maggioni, Producción de Poliacidolactico por ROP, San Fafael, Mendoza: Universidad Nacional del Cuyo, 2015.
- [30] K. M. Yamanuqué Chero, «Estudio de factibilidad técnico económico en la instalación de una plata química para la producción del biopolímero ácido poliláctico a partir del lactosuero,» Piura, 2015.
- [31] J. Castro y M. Vera, Diseño de reactores de prepolimerización y polimerización para la producción de ácido poliláctico en una planta industrial, Cartagena de Indias : Universidad de Cartagena, 2012.
- [32] A. Amado Siles, «Síntesis, propiedades y aplicación del ácido poliláctico a partir del almidón de la papa,» Universidad Nacional de San Agustín, Arequipa, 2014.