

**Artículo Original**

**CONCEPCIÓN TECNOLÓGICA Y ANÁLISIS COMPARATIVO PARA LA OPERACIÓN DE HIDRÓLISIS ÁCIDA O ENZIMÁTICA DE LA SACAROSA**

**TECHNOLOGICAL CONCEPTION AND COMPARATIVE ANALYSIS FOR THE OPERATION OF ACID OR ENZYMATIC HYDROLYSIS OF SUCROSE**

Amanda Acosta Solares<sup>1\*</sup> <https://orcid.org/0000-0002-7656-5476>

Omar Pérez Navarro<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6963-1327>

Mariano F. Cortés Falcón<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6227-9869>

Claudia M. Suarez Pargas<sup>1</sup> <https://orcid.org/0009-0005-4500-9636>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Junio 26, 2023; Revisado: Julio 20, 2023; Aceptado: Agosto 4, 2023

**RESUMEN**

**Introducción:**

La implementación de una tecnología enzimática capaz de operar a elevadas temperaturas con una termoestabilidad que permita la hidrólisis de soluciones concentradas de sacarosa, constituye una alternativa novedosa en el proceso de producción de glucosa.

**Objetivo:**

Realizar un análisis comparativo de los métodos de producción de glucosa por hidrólisis ácida y enzimática de la sacarosa, considerando la tecnología instalada en la UEB Derivados Chiquitico Fabregat y la concepción tecnológica para la operación que emplea el biocatalizador.

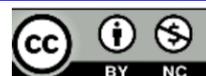
**Materiales y Métodos:**

Se desarrollaron los balances de masa y energía en la tecnología instalada que emplea la hidrólisis ácida de la sacarosa. Con los resultados experimentales reportados en la utilización de la enzima invertasa termoestable, se desarrolló el estudio cinético, la concepción tecnológica y la cuantificación de las corrientes que intervienen. Con estos



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

\* Autor para la correspondencia: Amanda Acosta, Email: [aasolares@uclv.cu](mailto:aasolares@uclv.cu)



resultados se realizó un análisis comparativo de los consumos anuales para la etapa de hidrólisis y los productos que se generan por ambos métodos.

**Resultados y Discusión:**

Se obtuvo un bajo rendimiento de glucosa ácida, mientras que la hidrólisis enzimática arrojó un incremento en la producción de 1,83 veces. El comportamiento cinético del biocatalizador se ajustó a una reacción de primer orden. La concepción tecnológica para el empleo de la hidrólisis enzimática incluyó tres biorreactores, un tanque disolutor y un intercambiador de calor, que garantizan un balance productivo anual favorable.

**Conclusiones:**

En condiciones de máximo aprovechamiento de la capacidad instalada, los elevados rendimientos de glucosa enzimática y la sustitución de sustancias agresivas, garantizan la factibilidad técnica, económica y ambiental del proceso.

**Palabras clave:** análisis comparativo; glucosa; hidrólisis ácida; hidrólisis enzimática.

**ABSTRACT**

**Introduction:**

The implementation of an enzymatic technology capable of operating at high temperatures with a thermostability that allows the hydrolysis of concentrated sucrose solutions; it constitutes a novel alternative in the glucose production process.

**Objective:**

To carry out a comparative analysis of the methods of glucose production by acid and enzymatic hydrolysis of sucrose, considering the technology installed in the UEB Derivados Chiquitico Fabregat and the technological conception for the operation using the biocatalyst.

**Materials and Methods:**

Mass and energy balances were developed for the installed technology employing acid hydrolysis of sucrose. With the experimental results reported on the use of the thermostable invertase enzyme, the kinetic study, the technological conception and the quantification of the currents involved were developed. With these results, a comparative analysis of the annual consumption for the hydrolysis stage and the products generated by both methods was carried out.

**Results and Discussion:**

A low output of acid glucose was obtained, while enzymatic hydrolysis evidenced a 1.83 times increase in production. The kinetic behavior of the biocatalyst was adjusted to a first order reaction. The technological design for the use of enzymatic hydrolysis included three bioreactors, a dissolving tank and a heat exchanger, which guarantee a favorable annual production balance.

**Conclusions:**

Under conditions of maximum utilization of the installed capacity, the high efficiency of enzymatic glucose and the substitution of aggressive substances guarantee the technical, economic and environmental feasibility of the process.

**Keywords:** comparative analysis; glucose; acid hydrolysis; enzymatic hydrolysis.

---

## **1. INTRODUCCIÓN**

La biotecnología ha tenido en los últimos años un gran impacto en el área de producción de edulcorantes, no solo desde el punto de vista tecnológico sino también en lo económico y social. En la actualidad existen diferentes tipos, algunos de estos se encuentran de forma natural en los alimentos, tal es el caso de la sacarosa. Este disacárido se agrega a diferentes tipos de alimentos, bebidas y jarabes.

La sacarosa es el azúcar de mesa que se obtiene de la caña y de la remolacha y es el compuesto orgánico de mayor producción en forma pura (Cortés y col., 2020 a).

La glucosa es una aldohexosa, fuente de energía en el metabolismo del ser humano y precursor metabólico de prácticamente todos los azúcares, incluyendo los amino azúcares. Puede ser convertida en fructosa potenciando su capacidad edulcorante.

La fructuosa es el azúcar más dulce de los edulcorantes naturales que unido a su gran estabilidad en alimentos ácidos y bebidas, constituye una alternativa atractiva al empleo de la sacarosa. De acuerdo a estas propiedades alcanza una gran aplicabilidad en la elaboración de dulces y bebidas refrescantes. Mientras que la glucosa, con un poder edulcorante menor que la sacarosa, tiene un amplio mercado en la industria química, farmacéutica y alimentaria, constituyendo una fuente de materia prima fundamental para otras producciones.

A nivel global una de las principales fuentes de obtención de glucosa es a partir del azúcar refino, al igual que el almidón de maíz como sustratos más utilizados; donde la inversión se logra a partir de la acción de un ácido a temperatura elevada, por intercambio iónico o por la presencia de la enzima invertasa (Díaz y col., 2020).

En la UEB Derivados Chiquitico Fabregat existe una planta productora de glucosa y fructosa a partir de la inversión ácida de la sacarosa. La glucosa obtenida en dicha planta es empleada como materia prima en la obtención de sorbitol. El empleo de este método de inversión unido con deficiencias operacionales y tecnológicas, ha ocasionado que los niveles productivos de glucosa anuales son insuficientes para satisfacer la demanda actual de este producto (Cortés y col., 2020 b), (Acosta, 2021).

Resultados obtenidos con el empleo de la hidrólisis enzimática de la sacarosa demuestran un aumento del rendimiento del proceso en comparación al reportado con la utilización de un ácido (Cortés y col., 2020 a), además de ofrecer otras ventajas como: mayor estabilidad química y microbiológica de la glucosa; y la eliminación de los procesos corrosivos, los productos coloreados y la generación de cenizas.

El CIGB de Sancti Spíritus en Cuba, desarrolló un biocatalizador de enzima invertasa recombinante termoestable, a partir de la expresión consecutiva a altos niveles en *Pichia Pastoris* de un gen con uso de codones optimizados que codifica la invertasa de *Thermotoga marítima* (BfrA) (Menéndez y col., 2014).

Para el empleo de esta enzima recombinante termoestable en la producción de glucosa, Cortés (2021) determinó las condiciones operacionales óptimas para la inversión en operación sumergida a escala de laboratorio con resultados satisfactorios para la operación de hidrólisis. De acuerdo a estos resultados, la implementación de una tecnología enzimática capaz de operar a elevadas temperaturas con una termoestabilidad que permita la hidrólisis de soluciones concentradas de sacarosa, constituye una alternativa novedosa desde el punto de vista técnico-económico.

Teniendo en cuenta estos antecedentes, el objetivo del presente trabajo es realizar un

---

análisis comparativo de los métodos de producción de glucosa por hidrólisis ácida y enzimática de la sacarosa, considerando la tecnología instalada en la UEB Derivados Chiquitico Fabregat y la concepción tecnológica para la operación que emplea el biocatalizador.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### ***2.1. Balances de masa y energía en el proceso por hidrólisis ácida de la sacarosa***

Para la cuantificación de las corrientes que intervienen en cada una de las etapas del proceso, se tuvo en cuenta la tecnología instalada (Gómez, 2015) y la secuencia operacional que garantiza el flujo productivo. Se estructuró el proceso en seis etapas en correspondencia a lo establecido por Acosta (2021): disolución e inversión, primera cristalización, filtración, disolución de la torta, segunda cristalización y centrifugación. Se estableció como base de cálculo el procesamiento de 22 500 kg de azúcar refino correspondientes a un ciclo de operación. Los datos de las corrientes fueron obtenidos en la práctica productiva y a través de las especificaciones de los manuales operacionales.

### ***2.2. Estudio cinético del biocatalizador en un reactor tipo tanque agitado***

Se emplearon los resultados de los estudios realizados con el biocatalizador de enzima invertasa termoestable ofertado por el CIGB de Sancti Spíritus. Se obtuvieron datos de la concentración de azúcares reductores totales presentes en el medio en el transcurso del tiempo para evaluar el avance de la reacción, según los experimentos desarrollados por (Cortés, 2021). El estudio se realizó en un volumen de trabajo de 500 mL, un pH ajustado a 5,5, velocidad de agitación de 200 rpm, una temperatura de 86 °C y en las condiciones óptimas de concentración de sustrato (Azúcar refino A) y concentración de enzima, para un valor de 75°Brix y 28 U/g refino respectivamente.

Se evaluó el ajuste a una ecuación que describa su comportamiento cinético según los modelos descritos por Michaelis – Menten y para el caso de una reacción monomolecular irreversible de primer orden.

De la aproximación de estado causi-estacionario de Michaelis – Menten (Ismail y col., 2017) se obtuvo que la velocidad de reacción a la que se forma el producto, integrando en las condiciones límites  $C_S = C_{S0}$  para  $t=0$  y arreglando, representa un relación lineal de pendiente negativa como se muestra en la ecuación (1).

$$\frac{1}{t} \cdot \ln \frac{C_{S0}}{C_S} = \frac{V_{m\acute{a}x}}{km} - \frac{1}{km} \cdot \frac{C_{S0} - C_S}{t} \quad (1)$$

Donde:  $V_{m\acute{a}x}$  es la velocidad máxima de reacción (mol/Lh);  $C_S$  es la concentración de sustrato (mol/L);  $C_{S0}$  es la concentración de sustrato inicial (mol/L);  $km$  es la constante de Michaelis-Menten (mol/L) y  $t$  es el tiempo de reacción (h).

Se ensayó la ecuación cinética para reacciones monomoleculares irreversibles de primer orden (Viera, 2007), donde para un sistema de densidad constante se obtiene la relación lineal que se representa en la ecuación (2).

$$-\ln(1 - XA) = k \cdot t \quad (2)$$

Donde:  $XA$  es la conversión del sustrato en fracción,  $t$  es el tiempo de reacción (h) y  $k$  es la  $k$  constante cinética de la reacción ( $h^{-1}$ ).

---

### 2.3. Balance de masa y energía para el desarrollo de la hidrólisis enzimática de la sacarosa

Las evaluaciones de la hidrólisis enzimática a escala industrial se realizaron para las capacidades instaladas y la disponibilidad de tres biorreactores de 10 m<sup>3</sup> con un volumen de trabajo de 7,51 m<sup>3</sup>, para los cuales se determinaron los consumos asociados mediante balances de materiales y energía. En la concepción tecnológica de esta etapa se tuvo en cuenta, al igual que para el empleo de esta enzima inmovilizada (PpABfrA) (Acosta y col., 2022), la inserción de un tanque disolutor y un intercambiador de calor, que garanticen los parámetros operacionales en el reactor. El diagrama de flujo concebido se muestra en la figura 1, donde A y A1, indican corrientes de agua; AR, azúcar refino; SAR, solución de azúcar refino; VE, vapor de escape; C, condensado; SAR, solución de azúcar refino caliente; AC, ácido clorhídrico; SA5, SA6 y SA7, soluciones alimentadas a los biorreactores y LI5, LI6 y LI7, licor invertido que se obtiene en la salida de los biorreactores.

Se asumió como base de cálculo un ciclo de inversión como criterio comparativo con el método de hidrólisis ácida. Se tuvo en cuenta además igual concentración y temperatura en el medio de reacción, dadas las características termoactivas y termosestables de la enzima.

En el balance energético para elevar la temperatura del sustrato desde 30 °C hasta 86 °C (Espinosa y col., 2019; Núñez y col., 2020), se determinó la demanda de vapor de escape (Mv) como medio de calentamiento a 113 °C y 156 040,5 Pa.

Con la concentración de enzima óptima con que se trabajó en el estudio cinético (28 U/grefino) y una actividad reportada de 400 U/ mLenzima, se determinó el volumen de biocatalizador requerido para cada biorreactor.

A partir de la concentración molar de la sacarosa en el medio, se determinó la concentración de glucosa generada para la conversión reportada en el estudio cinético (XA) y por tanto la masa de acuerdo a su peso molecular.

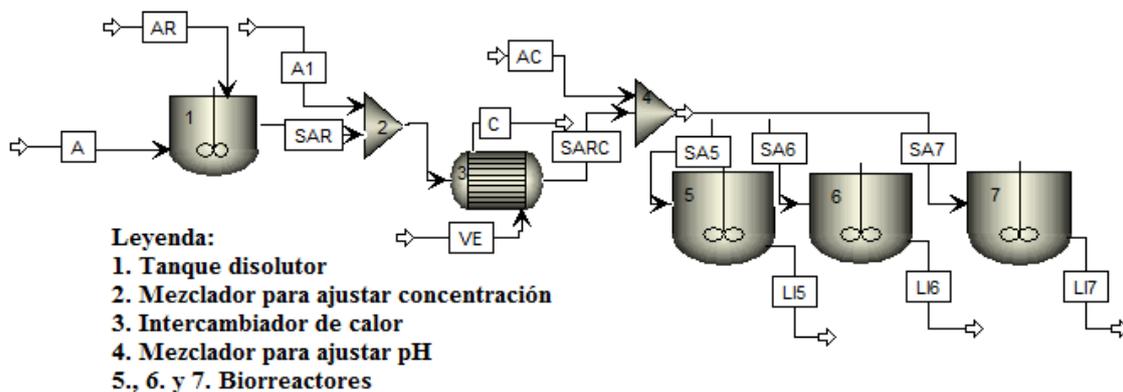


Figura 1. Diagrama de flujo de la etapa de hidrólisis enzimática de la sacarosa

### 2.4. Escalado de la reacción de hidrólisis enzimática de la sacarosa y diseño del sistema de disolución

En base a los estudios experimentales desarrollados, se realizó la propuesta de escalado a un volumen piloto de 0,0536 m<sup>3</sup> y para la inversión de un volumen de solución de sacarosa de 7,51 m<sup>3</sup> en cada biorreactor industrial. Se consideraron las relaciones de escalado aplicadas por Martínez y col., (2017) y Acosta y col., (2022) para el desarrollo

de la reacción biocatalítica de esta enzima inmovilizada (PpABfrA), garantizando la similitud geométrica, química e igual velocidad en la punta del impulsor.

En el diseño de la chaqueta para la circulación del medio de intercambio con régimen de flujo en mezcla perfecta, que permite mantener las condiciones isotérmicas en el reactor, se calculó el calor de reacción mediante el modelo de Kirchoff (Matos y Hing, 2014) a una temperatura constante de 86 °C según el procedimiento aplicado por Pérez y col., (2022) adecuado a las sustancias participantes. Además, se tuvo en cuenta la constante cinética determinada para las condiciones ensayadas. La determinación de los coeficientes de transferencia de calor y el área requerida se realizó por la metodología reportada para sistemas con estas características (Viera, 2007), (Espinosa y col., 2019). El sistema de disolución que garantiza la alimentación al sistema de reacción de la solución de sacarosa a una concentración de 75°Brix, se diseñó en función de las características del fluido y los criterios establecidos por Kasatkin, (1985).

### 2.5. Indicadores de consumo y generación anuales para ambos métodos de hidrólisis

Para la valoración anual de los indicadores de consumo de la etapa de hidrólisis y la generación de productos del proceso por ambos métodos, se tuvo en cuenta un periodo anual laborable de 330 días, donde se realizan por hidrólisis ácida un total de 165 ciclos con una inversión cada uno. Para la tecnología propuesta se concibió el mismo número de ciclos con la sustitución del método de inversión y preparación de la materia prima. Se consideró en este análisis el consumo de potencia eléctrica para la tecnología instalada, y se determinó dichos requerimientos para la agitación y bombeo en la preparación del sustrato para la hidrólisis enzimática.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1. Cuantificación de las corrientes del proceso por hidrólisis ácida de la sacarosa

En la Tabla 1 se muestran los resultados del balance de masa y energía en cada una de las etapas del proceso de producción de glucosa por hidrólisis ácida de la sacarosa para un ciclo de inversión.

**Tabla 1.** Resultados de los balances de masa y energía del proceso de producción de glucosa por hidrólisis ácida

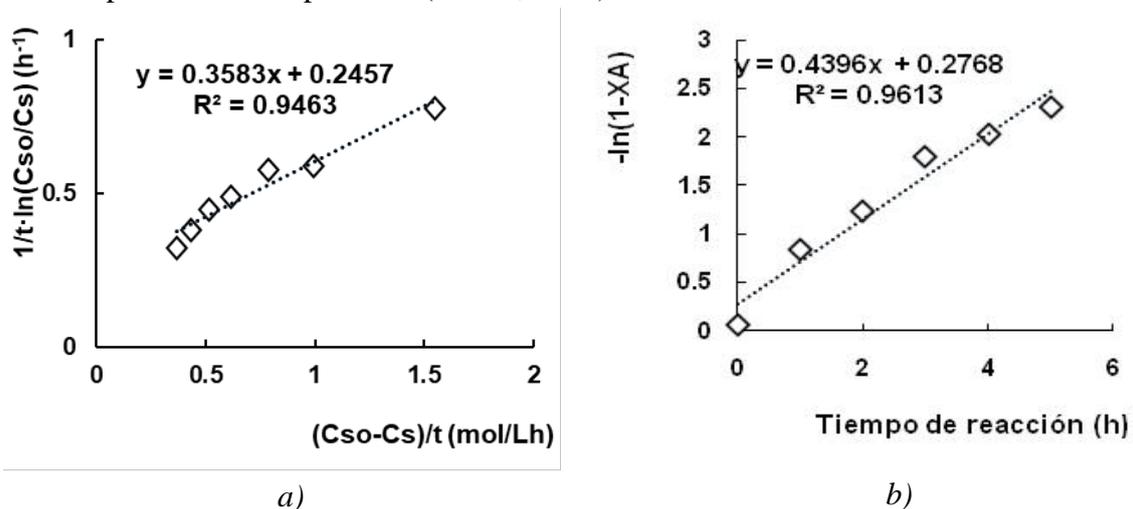
<i>Etapas</i>	<i>Corriente</i>		<i>Valor</i>
	<i>Identificación</i>	<i>Comentario</i>	
Disolución e inversión	SInAR (kg)	Solución de azúcar refino	29 191
	VH <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> )	Volumen de agua consumido en la disolución	6,80
	Q (J)	Calor intercambiado	3,94·10 <sup>9</sup>
	Mv (kg)	Vapor consumido	1 962,27
	V <sub>H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub></sub> (m <sup>3</sup> )	Volumen de ácido consumido	0,014
	SI (kg)	Sirope invertido	29 215,14
Primera Cristalización	MC1 (kg)	Masa cristalizada	32 786,24
	SG (kg)	Sirope de glucosa recirculado	2 554,73
	SE1 (kg)	Pie de semilla	1 016,37

Filtración	SF (kg)	Sirope rico en fructosa generado	26 550
	TG (kg)	Torta de glucosa	6 236,24
Disolución de la torta	TG <sub>(D)</sub> (kg)	Torta de glucosa disuelta	6 564,46
	VH <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> )	Volumen de agua consumido en la disolución	0,32
	Q (J)	Calor intercambiado	7,48·10 <sup>8</sup>
	Mv (kg)	Vapor consumido	372,46
Segunda cristalización	MC2 (kg)	Masa cristalizada	6 520
	SE2 (kg)	Pie de semilla	69,77
Centrifugación	G (kg)	Glucosa producida	5 253,40
	VH <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> )	Volumen de agua consumido en la centrifugación	1,29

En los valores calculados se reportan bajos rendimientos de glucosa para un elevado consumo de azúcar refinado, de acuerdo a lo planteado por (Cortés y col., 2020a) para este método de operación. Este indicador a su vez está influenciado por la existencia de zonas muertas en el reactor, que ocasiona dificultades para lograr la homogenización del medio. Por otra parte, la operación con soluciones ácidas acelera los procesos corrosivos en el equipamiento instalado y la generación de productos ácidos que afectan la calidad de la glucosa obtenida. En base a estos planteamientos, se recurre al estudio del empleo de la hidrólisis enzimática de la sacarosa teniendo en cuenta los resultados reportados al efecto (Cortés, 2021); (Acosta y col., 2022).

### 3.2. Parámetros cinéticos de la reacción de hidrólisis enzimática de la sacarosa

En la figura 1 se representan las relaciones de las ecuaciones (1) y (2) a partir de los datos experimentales reportados (Cortés, 2021).



**Figura 1.** Estudio cinético de la reacción de hidrólisis enzimática:

- Relación lineal para la determinación de los parámetros del modelo de Michaelis-Menten;
- Ensayo de la reacción de primer orden

En la representación a) se muestra una recta de pendiente positiva, por lo que a partir de la misma no es posible obtener el modelo que describe el comportamiento de los datos en el tiempo de estudio.

Para un ajuste adecuado en la predicción del tiempo de hidrólisis a concentraciones iniciales de sacarosa de 75°Brix, en la representación b) se obtiene una recta que pasa por el origen cuya pendiente se corresponde con el valor de k. Del gráfico se obtiene que la constante cinética  $k = 0,44 \text{ h}^{-1}$ , con un coeficiente de regresión ( $R^2$ ) igual a 96,13 %. Para este valor, se verifica a las 4 horas de reacción una concentración de sacarosa remanente de 168,21 g/L para un 84 % de hidrólisis, lo que no representa una diferencia significativa respecto a 86,79 % que se reporta experimentalmente para el mismo tiempo (Cortés, 2021). Cabe desatacar, que al igual que el comportamiento anterior, se registró el ajuste a una cinética de reacción de primer orden con el empleo del biocatalizador PpABfrA en soluciones concentradas de sacarosa (Martínez y col., 2015). Este parámetro cinético determinado fue empleado en la determinación del régimen de transferencia de calor que permite mantener la temperatura constante en el medio de reacción (Pérez, 2018).

### 3.3. Cuantificación de las corrientes de la etapa de hidrólisis enzimática de la sacarosa

En la tabla 2 se muestran los resultados del balance de masa y energía en las etapas de preparación del sustrato e hidrólisis enzimática para un ciclo de inversión.

**Tabla 2.** Resultados de los balances de masa y energía en las etapas de preparación del sustrato e hidrólisis enzimática

<i>Corriente</i>		<i>Valor</i>	
<i>Identificación</i>	<i>Comentario</i>	<i>1 biorreactor</i>	<i>3 biorreactores</i>
AR (kg)	Azúcar refino	7 241,64	21 724,92
SlnAR (kg)	Solución de azúcar refino	9 408	28 224
VH <sub>2</sub> O (m <sup>3</sup> )	Volumen de agua consumido en la disolución	2,16	6,48
V <sub>enzima</sub> (m <sup>3</sup> )	Volumen de enzima	0,51	1,53
G (kg)	Glucosa generada	3 199,39	9 598,17
SF (kg)	Sirope rico en fructosa generado	7 418,88	22 256,64
Q (J)	Calor intercambiado en el calentador	$1,47 \cdot 10^9$	$4,41 \cdot 10^9$
Mv (kg)	Vapor consumido	731,34	2 194,03

Los valores de las corrientes de la tabla 2 indican que esta tecnología es más exigente en cuanto a requerimiento auxiliar de vapor, lo que unido al volumen de enzima demandado, significa un incremento del costo operacional del proceso. Sin embargo, la especificidad de este biocatalizador por el sustrato (Mendoza y col., 2021), genera un elevado rendimiento de glucosa en la operación de hidrólisis.

### 3.4. Parámetros de diseño de los biorreactores y el sistema de disolución

En la tabla 3 se muestran las características de diseño y los parámetros operacionales de los biorreactores en las distintas escalas. La determinación de las consecuencias se realizó a través del cálculo teórico de cada uno de los parámetros para una densidad ( $\rho$ ) de 1344 kg/m<sup>3</sup> y una viscosidad ( $\mu$ ) igual a 0,046 Pa.s.

**Tabla 3.** Características de diseño y parámetros operacionales de los biorreactores experimental, piloto e industrial

<i>Características</i>	<i>Experimental</i>	<i>Piloto</i>	<i>Industrial</i>
Diámetro del impelente (m)	0,04	0,19	1
Diámetro del biorreactor (m)	0,10	0,63	3,33
Altura del impelente (m)	0,02	0,09	0,50
Volumen total (m <sup>3</sup> )	0,00065	0,07	10,00
Volumen de trabajo (m <sup>3</sup> )	0,0005	0,0536	7,51
Tipo de impelente	hélice	hélice	hélice
Velocidad de agitación (rpm)	200	42,1	8,11
Número de Reynold	156	741,16	3848,49
Potencia (W)	0,003	0,06	1,23
Potencia por unidad de volumen (W/m <sup>3</sup> )	6	1,26	0,25

La entalpía de hidrólisis a una temperatura de trabajo de 86 °C arrojó un valor de 106,98 kJ/mol. Este resultado muestra que la reacción se desarrolla sin efectos energéticos apreciables, pero con un comportamiento ligeramente endotérmico.

En la tabla 4 se muestran los resultados de la determinación de la demanda de transferencia de calor. Para el intercambio energético necesario, se calculó un área de transferencia de 18 m<sup>2</sup> inferior a 21 m<sup>2</sup> de superficie lateral que presentan los biorreactores.

**Tabla 4.** Resultados de la determinación de los requerimientos de transferencia de calor en la hidrólisis enzimática de la sacarosa

<i>Parámetros calculados</i>	<i>Resultados</i>
Coefficiente pelicular de transferencia de calor (J/s m <sup>2</sup> °C)	77,97
Coefficiente pelicular de transferencia de calor referido al diámetro exterior (J/s m <sup>2</sup> °C)	76,41
Coefficiente total de transferencia de calor limpio (J/s m <sup>2</sup> °C)	38,60
Coefficiente total de transferencia de calor sucio (J/s m <sup>2</sup> °C)	38,10
Área de transferencia de calor (m <sup>2</sup> )	18
Calor intercambiado (J/s)	950
Temperatura de entrada del medio (°C)	90
Temperatura de salida del medio (°C)	87

Un tanque agitado con un volumen de trabajo de 3,5 m<sup>3</sup>, un diámetro de 1,6 m y agitador de hélice de 0,4 m de diámetro, garantiza la obtención de una solución concentrada de sacarosa (75 °Bx) que se alimenta al sistema de reacción. Establecido un régimen turbulento de mezclado (Re) de 4 000, la velocidad de agitación requerida según la ecuación es de 692 rpm, con un consumo de potencia de 7,08 kW para un Kn correspondiente de 0,3.

### 3.5. Indicadores de consumo y generación comparativos de las etapas de hidrólisis ácida y enzimática de la sacarosa

En la tabla 5 se muestran principales consumos anuales de la etapa de hidrólisis y los productos que se generan por ambos métodos.

**Tabla 5.** Resumen de los principales consumos anuales de las etapas de hidrólisis ácida y enzimática y los productos generados en el proceso

<i>Indicadores de consumo y generación</i>		<i>Hidrólisis ácida</i>	<i>Hidrólisis enzimática</i>
Materias primas	Azúcar refino (t)	3712,00	3583,80
Materiales	Ácido fosfórico (t)	3,89	-
	Biocatalizador (m <sup>3</sup> )	-	252,45
Requerimientos	Agua* (m <sup>3</sup> )	1 122,30	1 069,20
	Vapor (t)	323,40	361,35
	Electricidad (kWh)	32 914,20	28 632,00
Productos generados	Sirope rico en fructosa (t)	4 380,75	3 672,90
	Glucosa (t)	866,75	1 583,69

\* Incluye agua para la disolución del azúcar refino

En un análisis comparativo de los resultados de la tabla 5, se puede apreciar que la producción anual de glucosa enzimática supera en 1,83 veces a la producción de la glucosa ácida. Aunque con una disminución de la masa de sirope rico en fructosa generado, la producción total de ambos productos por la vía enzimática supera al del empleo de un ácido, lo que se traduce en igual diferencia del valor de la producción.

La demanda de biocatalizador sin posibilidad de reuso influye considerablemente en los costos totales de esta variante, sin embargo, los elevados rendimientos en glucosa, garantizan un costo unitario inferior al de la tecnología instalada, según los resultados obtenidos por Gómez y col., (2017) con el empleo del biocatalizador invertasa-quitosana: quitina-carboximetilcelulosa.

## 4. CONCLUSIONES

1. El desarrollo de los balances de masa y energía para la tecnología instalada en la UEB Derivados Chiquitico Fabregat y la propuesta de implementación de la hidrólisis enzimática de la sacarosa, permite establecer criterios comparativos y decisivos sobre los procesos productivos e inversionistas.
2. En el empleo de la hidrólisis enzimática de la sacarosa se alcanza un elevado porcentaje de inversión con la enzima invertasa termoestable, donde los datos experimentales se ajustan a la cinética de una reacción irreversible de primer orden.
3. El análisis comparativo a través del estudio cinético y los parámetros operacionales a escala industrial para la operación de hidrólisis enzimática y las tecnologías asociadas a la preparación del sustrato, arroja resultados alentadores para el empleo de este método, donde el incremento de la producción de glucosa para igual número de ciclos y la sustitución de sustancias agresivas, garantizan la factibilidad técnica, económica y ambiental del proceso.

## REFERENCIAS

- Acosta, A., Desarrollo y evaluación de tecnologías para la producción de glucosa por vía enzimática a partir de un biocatalizador termoestable en la UEB Derivados Chiquitico Fabregat., Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, 2021. <https://dspace.uclv.edu.cu/handle/123456789/12998>
- Acosta, A., Pérez, O., Pérez, E.R., y Martínez, D., Optimización de parámetros operacionales, escalado y determinación de requerimientos para la inversión enzimática de sacarosa., Centro Azúcar, Vol. 49, No. 2, 2022, pp. 1-14. [http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro\\_azucar/article/view/697](http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/697)
- Gómez, L., Estabilización funcional y operacional de enzimas hidrolíticas de interés industrial., Tesis presentada en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Centro de Estudios Biotecnológicos, Universidad de Matanzas, Cuba, 2015.
- Gómez, L., Luis, J., Ramírez, H.L., Yll, M., Díaz, S., Michelena, G., y Dustet, J.C., Comparison of economic indicators of the sucrose acid inversion or by enzymatic hydrolysis., Biotecnología Aplicada, Vol. 34, No. 4, 2017, pp. 4401-4404. <http://scielo.sld.cu/pdf/bta/v34n4/bta04417.pdf>
- Cortés, M.F., Efecto de la extracción del jugo de los filtros en los costos y en la calidad del azúcar crudo y refinado para la producción de glucosa., Tesis presentada en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Especialidad Ingeniería Química en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Cuba, 2021.
- Cortés, M.F., Ruíz, I.C., Alomá, I., González, E., y Carrillo, L.E., Diseño de intercambiadores de calor para intensificar el proceso de obtención de glucosa en la UEB Chiquitico Fabregat., Centro Azúcar, Vol. 47, No. 1, 2020a, pp. 10-21. [http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro\\_azucar/article/view/165](http://centroazucar.uclv.edu.cu/index.php/centro_azucar/article/view/165)
- Cortés, M.F., Pérez, O., Alomá, I. C., y Leiva, J., La regresión óptima para la hidrólisis enzimática en la producción de glucosa., Revista ICIDCA, Vol. 53, No. 2, 2020b, pp. 17-25. <https://www.revista.icidca.azcuba.cu/wp-content/uploads/2020/05/articulo-9-1.pdf>
- Díaz, L.R., Zumalacárregui, L., Pérez, O., y González, G.A., Evaluación del proceso de producción de glucosa a partir de Sacarosa en la UEB Argentina., Tecnología Química, Vol. 40, No. 3, 2020, pp. 611-626. <http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v40n3/2224-6185-rtq-40-03-611.pdf>
- Espinosa, R.O., Hernández, J.P., Goya, F.A., y Leiva, J., Integración de procesos energéticos, cogeneración y avances en transferencia de calor en la industria química., Editorial Feijóo, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, 2019, pp. 9-141. <https://1library.co/document/zlgeex2y-integracion-procesos-energeticos-cogeneracion-avances-transferencia-industria-quimica.html>
- Ismail, I., Oluleye, G., Oluwafemi, I.J., Omofuma, O.I., & Olufemi, A.S., Mathematical modelling of an enzyme-based biosensor., International Journal of Biosensors & Bioelectronics, Vol. 3, No. 2, 2017, pp. 265-268. <https://medcraveonline.com/IJBSBE/IJBSBE-03-00062.pdf>
- Kasatkin, A.G., Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química., Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 1985, pp. 401-424.
-

- Martínez, D., Menéndez, C., Echemendía, F.M., Hernández, L., Sobrino, A., Trujillo, L.E., Rodríguez, I., & Pérez, E.R., Kinetics of Sucrose hydrolysis by immobilized recombinant *pichia pastoris* cells in a batch reactor., *Journal of Microbial & Biochemical Technology*, Vol. 7, No. 5, 2015, pp. 294-298. <http://dx.doi.org/10.4172/1948-5948.1000228>
- Martínez, D., Menéndez, C., Hernández, L., Sobrino, A., Trujillo, L.E., Rodríguez, I., & Pérez, E.R., Scaling-up batch conditions for efficient sucrose hydrolysis catalyzed by an immobilized recombinant *Pichia Pastoris* cells in a stirrer tank reactor., *Electronic Journal of Biotechnology*, Vol. 25, 2017, pp. 39-42. <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2016.11.003>
- Matos, R., y Hing, R., Aspectos fundamentales de la química física., Tomo I, Editorial Félix Varela, La Habana, 2014, pp. 84-105.
- Mendoza, S., Rodríguez, Y., y Ribas, G., Optimización del tiempo de inversión en la hidrólisis enzimática de la sacarosa., *Centro Azúcar*, Vol. 48, No. 4, 2021, pp. 53-62. <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v48n4/2223-4861-caz-48-04-53.pdf>
- Menéndez, C., Martínez, D., Hernández, L., y Pérez, E., Desarrollo de biocatalizadores termoestables basados en la invertasa de *Thermotoga Maritima* para la hidrólisis total de azúcar de caña., *Anales de la Academia de Ciencias de Cuba*, Vol. 4, No. 2, 2014, pp. 1-14. <http://www.revistaccuba.cu/index.php/revacc/article/view/114>
- Núñez, L.N., Hortelano, J.G., Kantun, M.C., y Téllez, J.S., Metodología para el diseño de intercambiadores de calor tipo coraza y tubos., *Revista de Aplicaciones de la Ingeniería*, Vol. 7, No. 23, 2020, pp. 7-18. <https://doi.org/10.35429/JEA.2020.23.7.7.18>
- Pérez, O., Procedimiento estratégico de desarrollo de procesos agroindustriales complementado con asimilación tecnológica aplicado a los productos de *Manihot esculenta Crantz.*, Tesis presentada en Opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Especialidad Ingeniería Química en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Cuba, 2018.
- Pérez, O., González, E., Ley, N., y Dustet, J.C., Diseño y escalado para gelatinización y acetilación de almidón proveniente de Manihot Esculenta Crantz., *Afinidad*, Vol. 79, No. 595, 2022, pp. 209-217. <https://raco.cat/index.php/afinidad/article/view/397463>
- Viera, R., Diseño y Análisis de Reactores Químicos., Tomo I, Editorial Félix Varela, La Habana, 2007, pp. 93-211

## **CONFLICTO DE INTERÉS**

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

## **CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES**

- Ing. Amanda Acosta Solares. Investigación, redacción-revisión y edición.
  - Dr.C. Omar Pérez Navarro. Gestión de proyectos, análisis formal, validación.
  - Dr.C. Mariano F. Cortés Falcón. Supervisión, metodología.
  - Estud. Claudia M. Suarez Pargas. Investigación.
-