

Artículo Original

ESTRATEGIA PARA LA EVALUACIÓN DE LAS POSIBILIDADES DE MODIFICACIÓN DE UNA PLANTA DE ÁCIDO SULFÚRICO

STRATEGY FOR EVALUATING THE POSSIBILITIES OF MODIFYING A SULFURIC ACID PLANT

Jenny Castillo Serrano ^{1*} <https://orcid.org/0000-0002-7555-2315>
Jessica Carmona Molina ² <https://orcid.org/0000-0001-5261-3675>
Néstor Ley Chong ³ <https://orcid.org/0000-0001-5575-246X>
Erenio González Suárez ³ <https://orcid.org/0000-0001-5741-8959>
Juan Bautista de León Benítez ⁴ <https://orcid.org/0000-0002-1689-2301>

¹ UEB de Cienfuegos, Centro de Ingeniería e Investigaciones Químicas, Zona Industrial No.3, Finca Carolina, Cienfuegos, Cienfuegos, Cuba.

² UB "Desembarco del Granma", Carretera a Camajuaní km 2 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

³ Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Carretera a Camajuaní, km 5 ½, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

⁴ Empresa SICTE S.A. Sociedad Mercantil Interfaz de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Carretera a Camajuaní, km 5 ½, Las Antillas, Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

Recibido: Octubre 2, 2020; Revisado: Febrero 3, 2021; Aceptado: Abril 30, 2021

RESUMEN

Introducción:

En el artículo se aborda la problemática de evaluar las posibilidades de crecimiento de producciones de la industria química; para ello se propone un procedimiento heurístico que incluye la evaluación de las posibilidades de una nueva inversión o modernizar e intensificar una instalación existente. Específicamente se analiza la posible solución para la producción industrial en la provincia de Matanzas, Cuba, fundada en los años cuarenta.

Objetivo:

Aplicar una estrategia elaborada para la evaluación de las posibilidades de modificación de una planta de ácido sulfúrico sobre bases científicamente fundamentadas.

Materiales y Métodos:

Se propone una metodología que sea aplicable a la solución al problema planteado en el país. La misma consta de varias etapas que permiten: identificar el problema, magnitud, definir los surtidos de productos químicos, la tecnología, la existencia o no de plantas para satisfacer las necesidades de estos productos, así como de la necesidad de



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: Jenny Castillo, Email: jenny@cfq.ciq.cu



modificarlas o de realizar nuevas inversiones y el estudio técnico económico de la inversión propuesta.

Resultados y Discusión:

El proceso del estudio de la planta de ácido sulfúrico de la provincia de Matanzas es un caso típico en el cual, se requiere, una modernización de la instalación, siendo aplicable la metodología propuesta para evaluar alternativas de desarrollo de la industria química.

Conclusiones:

La metodología propuesta es aplicable para evaluar alternativas de desarrollo de la industria química, siendo el proceso del estudio de la planta de ácido sulfúrico de Matanzas un caso típico en el cual, se requiere una modernización de la instalación.

Palabras clave: ácido sulfúrico; optimización; procesos químicos; reconstrucción.

ABSTRACT

Introduction:

The article addresses to problem of evaluate productions growth possibilities in chemical industry. A heuristic procedure is proposed that includes possibilities of a new investment or modernizing and intensifying an existing installation evaluation. Specifically, the possible solution for sulfuric acid production is analyzed, in which the existence of an industrial facility in Matanzas province, Cuba, founded in the 1940s plays a key role.

Objective:

To apply an elaborated strategy to increase the availability of a chemical product with minimal investment expenses on scientifically founded bases.

Materials and Methods:

A methodology is proposed that is applicable to the country problem solution. The methodology consists of several stages that allow: problem determination, problem magnitude measurement, chemical products mesh definition, technological study, plants to satisfy needs of these products' existence or not, as well as the need to modify them or to make new investments and to carry out the investment technical economic study.

Results and Discussion:

The studied process of Matanzas' sulfuric acid plant is a typical case in which an installation modernization is required. The proposed methodology is applicable to evaluate alternatives for chemical industry development.

Conclusions:

The proposed methodology is applicable to evaluate alternatives for chemical industry development. The studied process in Matanzas' sulfuric acid plant is a typical case in which an installation modernization is required.

Keywords: sulfuric acid; optimization; chemical process; rebuilding.

1. INTRODUCCIÓN

En el diseño de instalaciones químicas en la actualidad, en la economía mundial ocurre una globalización de los mercados, caracterizada por una competencia creciente, que

presiona hacia la búsqueda de tecnologías basadas en conocimientos científicos, cuya incorporación al sistema productivo permiten reducir costos, mejorar la calidad, ahorrar energía y materias primas escasas, a la par de aumentar la productividad de la fuerza de trabajo. En estas condiciones es un problema socio-económico y científico la no implementación de una metodología científicamente fundamentada que permita evaluar el camino más apropiado para el desarrollo de la industria química en Cuba.

En el desarrollo de la Industria Química se ha trabajado con especial fuerza en la intensificación de procesos químicos con varios trabajos, en resumidos por González y col., (2020), en los que resalta su aplicación la Gestión Tecnológica integrada al Análisis de Procesos (Guzmán y col., 2019), que ha dado lugar a una profundización fenomenológica en procesos de la industria nacional (Martí y col., 2020) y las mejoras operacionales en grandes instalaciones industriales (Cortés y col., 2021), se ha trabajado también en el desarrollo de nuevos procesos tecnológicos en la agroindustria alimentaria (Pérez y col., 2020), y desarrollo de nuevas producciones de la industria de la caña de azúcar en el concepto de biorrefinería (González y Castro, 2012), (de Armas y col., 2018), así como en producciones específicas (Cerdeja-Mejía y col., 2020), (Cerdeja-Mejía y col., 2021), y en acciones de transferencia de tecnología (García y col., 2019), sin embargo todos estos trabajos son insuficientes para enfrentar la tarea que hoy se plantea sobre el desarrollo de la industria química y fermentativa.

Por lo que el objetivo general del presente trabajo es aplicar una estrategia elaborada para la evaluación de las posibilidades de modificación de una planta de ácido sulfúrico sobre bases científicamente fundamentadas.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

De acuerdo con el objetivo trazado se propone una metodología que sea aplicable a la solución al problema planteado en el país (Figura 1).

El análisis de la primera etapa del proceso, el estudio del mercado, teniendo en cuenta los siguientes pasos:

2.1. Paso 1

El primer paso es determinar el problema que es la falta de productos químicos en el país para darle una solución óptima a este y para ello es necesario conocer la cantidad que se requiere o se necesita de este producto para poder darle solución a las necesidades del pueblo y cumplir con lo que exigen estos y así incrementar la economía del país.

2.1.1. Paso 2

El segundo paso es definir la malla de productos químicos para saber si existe ese producto en el mercado, si hay disponibilidad de los insumos necesarios, si existen otros productos derivados y materia prima disponible. Esto genera una nueva malla química necesaria para garantizar las producciones prospectivamente.

2.1.3. Paso 3

El tercer paso: si existe o no la fábrica las variantes que son posibles analizar:

- Si no existe una instalación se debe realizar una inversión destinada a ella y

satisfacer la demanda reduciendo significativamente a cero la importación del producto.

- Si existe una instalación se debe evaluar
 - Si se satisface la demanda actual y prospectiva intensificando la instalación.
 - Si es necesario alguna modificación y aplicar el método de reconversión.

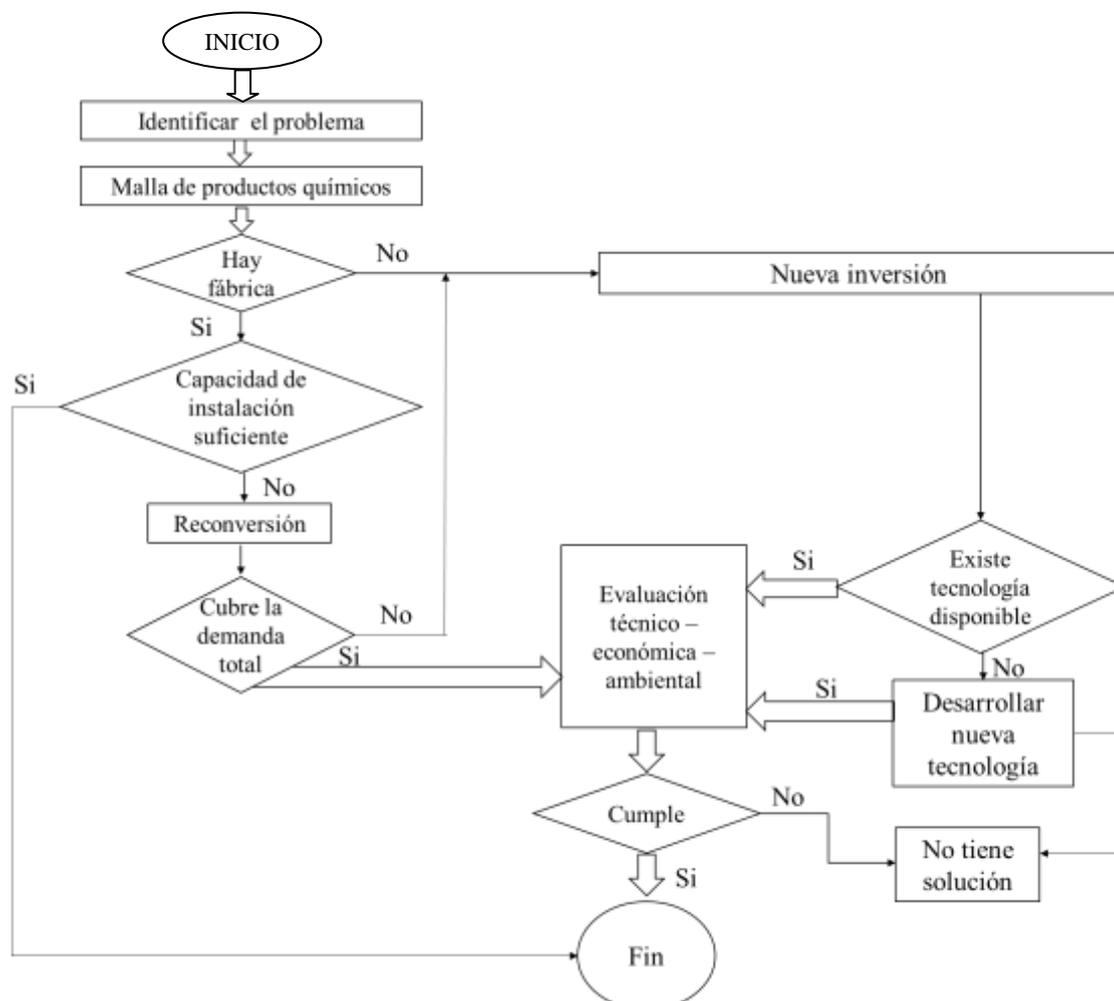


Figura 1. Metodología general para evaluar alternativas de desarrollo en la industria química

Una actividad obligatoria aquí es saber si existe la tecnología, para ello se pueden plantear dos variantes:

- Si existe la tecnología disponible en el mercado se realiza la inversión.
- Si no existe desarrollarla y realizar la inversión.

En todo caso deben utilizarse los métodos de análisis de inversiones utilizados en la industria de procesos químicos (Peters y Timmerhaus, 1991).

2.1.4. Paso 4

Cuarto paso: Estudio técnico económico.

Seguido del estudio tecnológico se realiza un estudio técnico económico que lleva consigo la continuación de los pasos a seguir para concluir la metodología planteada en el objetivo general de este proyecto de investigación.

En dicho estudio se calculan los márgenes de utilidad, siempre reduciendo los costos y teniendo en cuenta la evaluación ambiental, y luego se evalúa si es rentable la planta siendo este el primer filtrado.

En el segundo filtrado es necesario detallar el proceso de producción, materias primas, flujo de fondo), presentación de cartas de producción, perfil descriptivo del producto. Análisis de entrada al negocio (Estrategias de entrada). Si cumple las estrategias aplicar la solución y evaluar, en este sentido se ha realizado una propuesta para la evaluación de oportunidades de negocios en la agroindustria cubana (Rabassa, 2016).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Aplicando la metodología se detecta la necesidad de incremento de las producciones de ácido sulfúrico para lo cual se cuenta con una planta en la provincia de Matanzas, Cuba (Carmona, 2019). La misma no se explota a toda su capacidad debido a deficiencias técnicas, por lo que se propone un proyecto de reconversión. Los resultados alcanzados fueron:

3.1 Estudio de mercado (Serrano, 2018).

Principales clientes de la Planta de Ácido Sulfúrico son: Termoeléctricas, Centrales Azucareros, Industria de fertilizantes, Industria Textil, Industria Alimenticia, Refinerías de Petróleo, Industria Electroquímica, Industria Metalúrgica, Comercio Minorista, etc (Serrano, 2018).

La modernización de la Planta de Ácido Sulfúrico de la Unidad Empresarial de Base Rayonitro, permitirá no solo el aseguramiento del consumo nacional actual de este producto sino, la sustitución de importaciones de sulfato de magnesio, sulfato de zinc, sulfato ferroso y sulfato de manganeso. El precio promedio del ácido es (200-250 USD).

3.1.1. Balance entre la demanda y la capacidad

La planta ya existente en Matanzas cuenta con una capacidad de 70 t/d para una demanda de 14 t/d, lo que demuestra que la capacidad instalada de producción es mucho mayor que la demanda actual (Serrano, 2018).

3.2 Proyecto tecnológico.

La fabricación de ácido sulfúrico involucra tres operaciones o fases distintas:

- Obtención de gases conteniendo anhídrido sulfuroso (SO_2) y preparación de estos gases para ser destinados a la fabricación. Generalmente, la corriente gaseosa de SO_2 debe someterse a un proceso de purificación en el que se eliminen componentes que pueden interferir en etapas posteriores.
- Oxidación del SO_2 para convertirlo en anhídrido sulfúrico (SO_3) con la ayuda de los óxidos de nitrógeno, en los aparatos de contacto.
- Absorción del anhídrido sulfúrico (SO_3) en una solución de agua para formar el ácido sulfúrico (H_2SO_4), (Serrano, 2018), (Carmona, 2019).

De acuerdo con lo planteado anteriormente se presenta el siguiente esquema tecnológico:

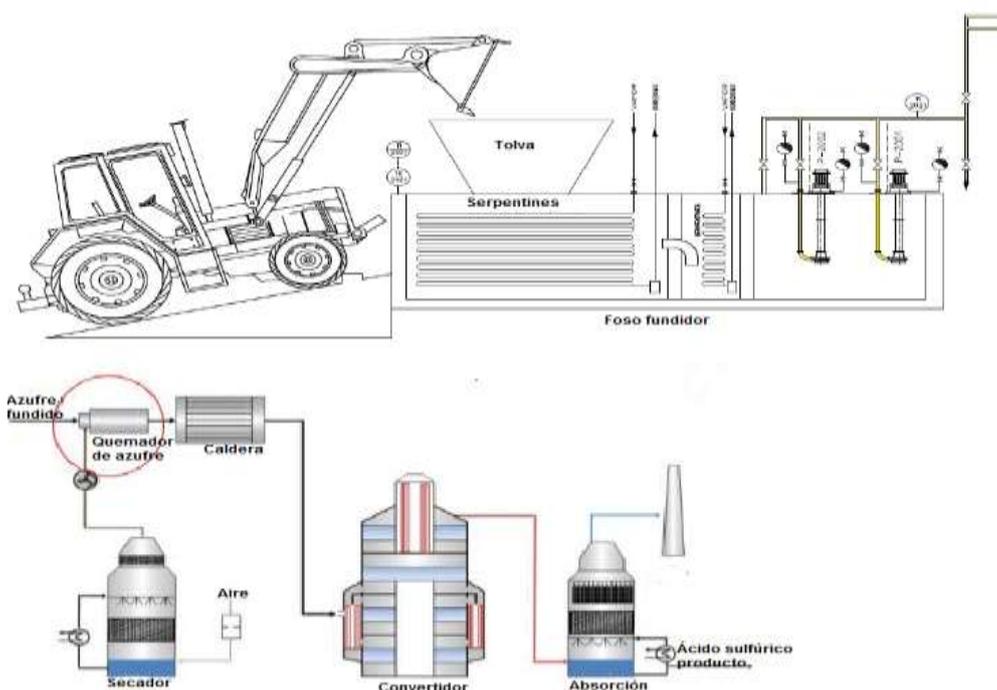


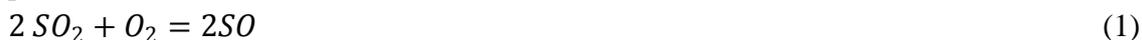
Figura 2. Esquema tecnológico para la producción de ácido sulfúrico

El método utilizado, es el de simple contacto (Serrano, 2018) que es un proceso catalítico de mayor rendimiento y menor tiempo de proceso para las materias primas. En la producción de ácido sulfúrico por este método se diferencian varias operaciones importantes:

1. Obtención de SO₂, depuración de los gases.
2. Catálisis, conversión de SO₂ a SO₃.
3. Absorción de SO₃.

3.3. Balance de masa del ácido sulfúrico.

De acuerdo con la estequiometría de la reacción de oxidación catalítica de SO₂ a SO₃ en presencia de aire es:



La posterior absorción de SO₃:



Los resultados del balance de materiales en cada convertidor se expresan en la Tabla 1:

Tabla 1. Resultados de los balances en cada etapa

Convertidores masa (t/h)					
Gases	Entrada 1	Salida 1/ Entrada 2	Salida 2/ Entrada 3	Salida 3/ Entrada 4	Salida 4
SO ₂	1,90	0,64	0,26	0,11	0
O ₂	1,14	0,83	0,73	0,69	0,67
N ₂	5,32	5,32	5,32	5,32	5,32
SO ₃	0	1,57	2,04	2,24	2,38
Total	8,37	8,37	8,37	8,37	8,37

3.4. Balance de energía.

Se utiliza la metodología propuesta en la literatura científica (Hougen y Watson, 1959) en cada uno de los intercambiadores del proceso, de acuerdo con el procedimiento siguiente para cada intercambiador (Figura 3):

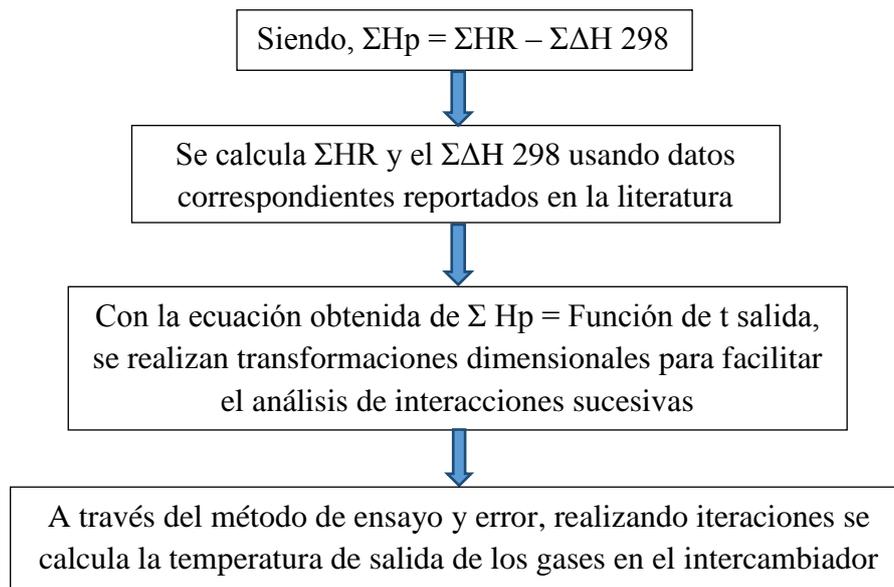


Figura 3. Procedimiento para determinar la temperatura de salida de la mezcla de gases de cada intercambiador

Los resultados de cada intercambiador se muestran en la tabla 2:

Tabla 2. Temperaturas de salida de gases en intercambiadores

<i>Intercambiador</i>	<i>Temperatura de los gases de salida (K)</i>
1	815,3
2	711,2
3	728,0

3.5. Optimización de los intercambiadores de calor a través del método de Lagrange

Para el diseño óptimo económico se consideró como función objetivo el costo total, por lo que se determinaron las condiciones donde el costo total es un mínimo, por consiguiente el problema de optimización es: minimizar la suma del costo variable anual para la operación del intercambiador.

Caso General:

El diseño de muchos intercambiadores de calor incluye condiciones iniciales en el cual las siguientes variables son conocidas:

- Razón de flujo del fluido del proceso
- Cambio en la temperatura del fluido del proceso
- Temperatura de entrada del fluido útil (para enfriamiento o calentamiento)

Con esta información, el ingeniero puede preparar un diseño óptimo de intercambiador que cumpla con los requerimientos del proceso, los resultados siguientes deben ser determinados:

- Área de transferencia de calor
- Temperatura de salida y razón de flujo de fluido útil
- Cantidad, longitud, diámetro, y arreglo de los tubos
- Caída de presión en el lado de los tubos y en el lado de la concha

El costo total anual, utilizado como función objetivo para la optimización, puede ser representado por la ecuación 3:

$$CT = A_0 \cdot K_f \cdot CA_0 + W_u \cdot H_y \cdot C_u + A_0 \cdot E_i \cdot H_y \cdot C_i + A_0 \cdot E_o \cdot H_y \cdot C_o \quad (3)$$

Donde:

A_0 : Área de transferencia de calor, el subíndice 0 designa el lado exterior de los tubos (m^2).

K_f : Cargos fijos anuales, incluyen mantenimiento, expresado como una fracción del costo inicial para la unidad completamente instalada (USD/año).

CA : Costo de instalación del intercambiador de calor por unidad de superficie de transferencia de calor exterior de los tubos (USD/ m^2).

W_u : Razón de flujo de fluido útil (t/hora).

H_y : Horas de operación por año (h).

C_u : Costo del fluido útil (USD/t).

E_i : Pérdida de potencia en el lado interior de los tubos por unidad de área exterior de los tubos (Watt/ m^2).

C_i : Costo de suministro de un Watt para bombear el fluido a través de los tubos (USD/Watt).

E_i : Pérdida de potencia por unidad de área interior de los tubos (Watt/ m^2).

C_i : Costo para suministrar un Watt para bombear el fluido a través de los tubos (USD/Watt).

E_o : Pérdidas de potencia por unidad de área exterior de los tubos (Watt/ m^2).

C_o : Costo para suministrar un Watt para bombear el fluido a través de la carcasa (USD/Watt).

Siendo las restricciones los valores reales de las variables de diseño.

Un diseño óptimo puede desarrollarse desde los resultados del sistema de ecuaciones de derivadas parciales de la ecuación 3 en los que se utiliza el método de Lagrange por un procedimiento laborioso de ensayo y error, considerando todas las variantes posibles (Peters y Timmerhaus, 1991), (González y col., 2020). El procedimiento propuesto se puede resumir en el diagrama de la Figura 4.

De su aplicación a los tres intercambiadores necesarios a la salida del convertidor 1, 2 y 4, respectivamente, mostraron los siguientes resultados:

Se conocen las condiciones de:

- La razón de flujo y el cambio necesario de temperatura del fluido del proceso es conocido.
- La temperatura del fluido útil es conocido.
- Se conocen las características de flujo si es turbulento tanto del lado de los tubos como de la carcasa.

- No hay cambios parciales de fases.
- Los necesarios factores de seguridad son conocidos.

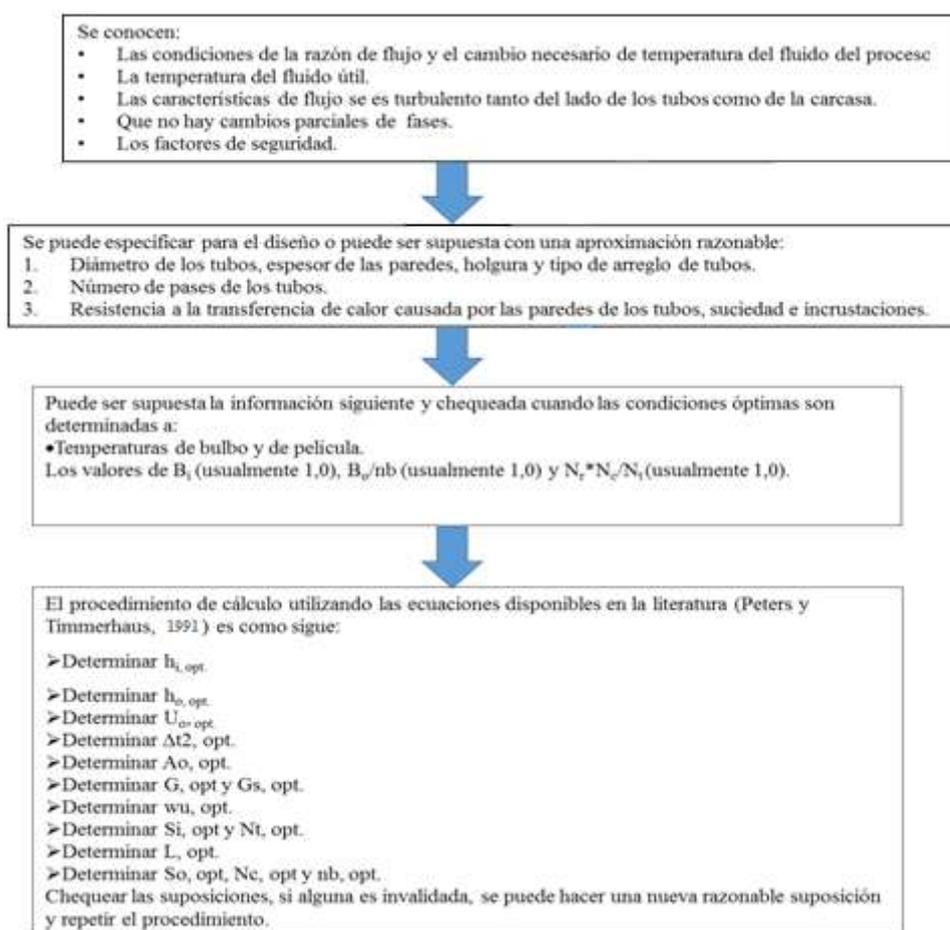


Figura 4. Diagrama para el diseño óptimo de intercambiadores de calor

Tabla 3. Resultados del diseño óptimo de los intercambiadores de calor

<i>Intercambiador</i>	<i>A_o (m²)</i>	<i>Valor de la Inversión (USD)</i>
I	4,13	1 079,84
II	0,79	207,66
III	24,46	6 396,48
Total	29,38	7 683,98

3.6. Diseño óptimo de la torre de enfriamiento.

Para garantizar las temperaturas del agua utilizada para el enfriamiento de los gases en cada convertidor se invierte en una torre de enfriamiento, que asegure toda el agua fría necesaria, que es la siguiente: 187 289,31 kg/h.

La metodología para calcular las torres de enfriamiento acopladas a intercambiadores de calor y fermentadores, se muestra en la Figura 5, (Jiménez y col., 2015):

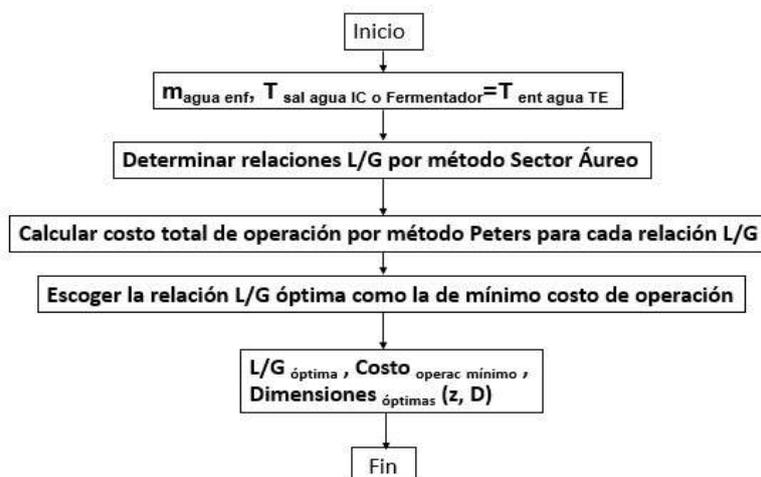


Figura 5. Metodología para calcular torres de enfriamiento

Los resultados del diseño óptimo de la torre fueron los siguientes:

Tabla 4. Resultados del diseño óptimo de la torre de enfriamiento

G's/G'sm	1,5	1,67	1,75	1,84	Unidades
Ntog	5,542	5,542	5,542	5,542	Adimensional
Htog	0,9	0,9	0,9	0,9	m
Z	4,9878	4,9878	4,9878	4,9878	m
Área	17,744	19,137	19,137	19,137	m ²
D	4,75	4,936	4,936	4,936	m
Volumen	23,70	24,62	24,62	24,62	m ³

3.7. Análisis dinámico de las inversiones realizadas.

Para analizar los indicadores dinámicos de la inversión es necesario considerar las variaciones en el flujo de caja, para ello se debe incluir el ahorro por disminución de los consumos energéticos y los valores inversionistas. Los resultados del análisis dinámico fueron:

- El ahorro anual de electricidad es de 292 103,57 USD/año.
- Costo de inversión: 137 974,36 USD.
- Luego entonces los indicadores dinámicos son:
 - VAN: 343 719 USD
 - TIR: 46%
 - PRD: 3,5 años

4. CONCLUSIONES

- El proceso del estudio de la planta de ácido sulfúrico de Matanzas es un caso típico en el cual, se requiere, una modernización de la instalación, siendo aplicable la metodología propuesta para evaluar alternativas de desarrollo de la industria química.
- Es factible sustituir el enfriamiento de los gases productos de la reacción en cada intercambiador por agua, diseñando de forma óptima los intercambiadores.

- El agua de enfriamiento requerida para el sistema de intercambio puede lograrse a través de una torre de enfriamiento, diseñada óptimamente con apoyo del método del Segmento Áureo, de relativamente bajo costo y de condiciones óptimas de 1,5 de la relación mínima L/G.
- Los indicadores económicos de este estudio, aunque pueden calcularse con mayor precisión mediante solicitudes de oferta a suministradores y determinación exactas de los consumos energéticos, fueron: VAN: 343 719 USD, una TIR: 46%, y PRD de 3,5 años, lo que hace recomendable a la instalación de producción de Ácido Sulfúrico.

REFERENCIAS

- Carmona, J., Estrategia para la evaluación de las posibilidades de modificación de una planta de Ácido Sulfúrico., Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Departamento de Ingeniería Química, Cuba, 2019.
- Cerda-Mejía, V., Pérez, A., & González, E., Procedimiento para el diseño óptimo de procesos considerando la calidad: aplicación en la elaboración de miel de caña., Centro Azúcar, Vol. 47, No.4, 2020, pp. 103-113.
- Cerda-Mejía, V., Pérez, A., Guardado, E., Cerda, G., Diéguez, K., Benítez, I., & González, E., Estrategia de simulación para disminuir la incertidumbre en la calidad en el diseño del proceso tecnológico de producción de miel de caña de azúcar., Revista Ingeniería e Investigación, Vol. 41 No. 1, 2021, pp. 1-11. Disponible en: <https://dx.doi.org/10.15446/ing.investig.v41n1.81484>
- Cortés, R., Font, D.Y., Lobelles, G.O., González, E., & Ramos, E. Mejoras operacionales para disminuir efluentes sulfurosos alcalinos en la Refinería Cienfuegos S.A., Centro Azúcar, Vol. 48, No. 2, 2021, pp. 78-88.
- de Armas, A.C., Morales M., Albernas Y., & González, E., Alternativas para convertir una fábrica azucarera cubana en una industria biorefinera., Centro Azúcar, Vol. 45, No. 3, 2018, pp. 65-77.
- García, R., Pérez, A., González, I., Villanueva, G., & González, E., Transferencia de tecnología para producir de biodiesel con cachaza en la industria azucarera de Guatemala., Ingeniería, Investigación y tecnología, Vol. XX, No. 1, 2019, pp. 1 - 10.
- González, E., & Castro, E, Aspectos técnico económicos de los estudios previos inversionistas para la producción de etanol de caña de azúcar en el concepto de biorefinería., Editorial Cooperación Iberoamérica y Espacio Mediterráneo, Jaén, España, 2012, pp. 25-64.
- González, E., Cortés, R., & Miño, J.E., Métodos Matemáticos en la estrategia de procesos para la solución de problemas en la Industria Química., Editorial Universidad Nacional de Misiones, Posadas, Argentina, 2020, pp. 45-58.
- Guzmán, M., González, E., & Morales, M., Metodología para gestionar la innovación tecnológica con integración del Análisis Complejo de Proceso en la Industria Ronera Cubana., Revista Tecnología Química, Vol. 39, No. 2, 2019, pp. 370-383. Disponible en: <https://tecnologiaquimica.uo.edu.cu/index.php/tq/article/view/5181>

- Hougen, O.A., & Watson, K.M., Chemical Process Principles., United Kingdom, John Wiley & Sons, 1959, pp. 452-471.
- Jiménez, O., González, V.M., Miño, J.E., & González, E., Diseño óptimo económico de la etapa de preparación de residuos de destilerías de etanol para producir crema nutriente., Centro Azúcar, Vol. 42, No. 2, 2015, pp. 61-71.
- Martí, C.A., Fabelo, J.A, González, E., & Rodríguez, Y., Metodología para la obtención de los modelos cinéticos de reacciones complejas en añejamientos de bebidas espirituosas., Afinidad, Vol. LXXVII, No. 589, 2020, pp. 587-590.
- Pérez, O., González, E., Concepción, D., & Ley, N., El desarrollo de procesos y la asimilación de tecnologías en el perfeccionamiento de la industria agroalimentaria., Universidad y Sociedad, Vol. 12, No. 3, 2020, pp. 364-369.
<https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/1892>
- Peters, M.S., & Timmerhaus, K.D., Plant design and economics for Chemical Engineers., McGraw Hill International Edition, 1991, pp. 1-897.
- Rabassa, G., Procedimiento para la selección y evaluación de oportunidades de negocios en la industria de la caña de azúcar., Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Departamento de Ingeniería Química, 2016, Cuba.
- Serrano, J., Estudio de Mercado del Ácido Sulfúrico., Informe Técnico Grupo Empresarial de la Industria Química, Centro de Ingeniería e Investigaciones Química - Cienfuegos, Cuba, 2018.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Lic. Jenny Castillo Serrano. Elaboró la estrategia de intensificación de la instalación y asesoró trabajos de campo y evaluación de las condiciones operacionales.
- Ing. Jessica Carmona Molina. Realizó los cálculos de los equipos y las condiciones óptimas.
- Dr.C. Néstor Ley Chong. Contribuyó en el análisis de resultados y la estructura del artículo, asesoró la realización de la investigación.
- Dr.Sc. Erenio González Suárez. Contribuyó en el análisis de resultados y la estructura del artículo, asesoró la realización de la investigación.
- Dr.C. Juan Bautista de León Benítez. Colaboró con el análisis de los resultados.