

Artículo de Revisión

**EXPERIENCIAS DE LAS APLICACIONES DE LA PROGRAMACIÓN
LINEAL EN LA INDUSTRIA DE PROCESOS QUÍMICOS EN CUBA**

**APPLICATIONS OF LINEAR PROGRAMMING IN CUBAN CHEMICAL
PROCESS INDUSTRY EXPERIENCES**

Yoelvis Fleites Avila ^{1*} <https://orcid.org/0000-0003-4232-0646>
César Augusto Martí Marcelo ² <https://orcid.org/0000-0002-5934-2844>
Yaillet Albernas Carvajal ¹ <http://orcid.org/0000-0003-4363-4401>
Juan Esteban Miño Valdés ³ <https://orcid.org/0000-0003-4843-5954>
Erenio González Suárez ¹ <https://orcid.org/0000-0001-5741-8959>

¹ Departamento de Ingeniería Química. Facultad de Química y Farmacia. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Carretera a Camajuani Km 5 ½. Santa Clara, Villa Clara, Cuba.

² Ronera Central Agustín Díaz Mena. Corporación Cuba Ron S.A. Calle 2da, CAI George Washington. Santo Domingo. Villa Clara, Cuba.

³ Departamento de Física. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Misiones. Juan Manuel de Rosas 325, N3360 Oberá, Misiones, Argentina.

Recibido: Marzo 5, 2020; Revisado: Abril 9, 2020; Aceptado: Mayo 19, 2020

RESUMEN

Introducción:

En la industria de procesos químicos surgen a diario un número de alternativas sobre cómo controlar el proceso transformativo. Para ayudar en el proceso de toma de decisiones se realizan una serie de cálculos para estimar indicadores energéticos, tecnológicos o ambientales y elegir luego la mejor variante. La presente investigación propone el uso de métodos matemáticos principalmente la optimización haciendo uso de la programación lineal como herramienta en esas decisiones.

Objetivo:

Mostrar las aplicaciones de la programación lineal en la solución de problemas de la industria de Procesos Químicos.

Materiales y Métodos:

Se utilizaron como base para la investigación procedimientos usados en defensas de doctorado en Ciencias Técnicas de la especialidad de Ingeniería Química y artículos derivados de esas investigaciones.



Copyright © 2020. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Yoelvis Fleites, Email: yfavila@uclv.cu



Resultados y Discusión:

Se detallan los resultados alcanzados por investigadores haciendo uso de la programación lineal para cada una de las cuatro direcciones en las cuales se ha clasificado la incertidumbre en la Ingeniería Química según Rudd y Watson (1968). Se agrupan las investigaciones y se ofrece para cada clasificación: el problema de investigación, los requerimientos necesarios para su aplicación, las investigaciones realizadas en cada dirección de trabajo y los resultados alcanzados. Cada grupo de aplicaciones, según los problemas de incertidumbre considerados, tiene rasgos comunes y restricciones.

Conclusiones:

La programación lineal es una herramienta versátil para resolver problemas de incertidumbre en la industria química que está y estará presente en varios momentos de los procedimientos de transformación de instalaciones tradicionales de la industria química en instalaciones más eficientes.

Palabras clave: incertidumbre; industria de procesos químicos; optimización; programación lineal; toma de decisiones.

ABSTRACT

Introduction:

A number of alternatives arise daily on how to control transformative process in chemical process industry. To help in decision-making process, some calculations are carried out to estimate energy, technological or environmental indicators and then choose the best variant. Present investigation proposes mathematical methods use, mainly optimization, using linear programming as a tool in these decisions.

Objective:

To show linear programming applications in solving Chemical Processes industry problems.

Materials and methods:

Procedures used in Chemical Engineering doctorate defenses and articles derived from these investigations were used as this investigation basis.

Results and Discussion:

Results achieved by researchers using linear programming are detailed for each four directions in which uncertainty has been classified in Chemical Engineering according to Rudd and Watson. Investigations are grouped and offered for each classification: research problem, necessary requirements for its application, investigations carried out in each work direction and achieved results. Each applications group, according to uncertainty problems considered, has common features and restrictions.

Conclusions:

Linear programming is a versatile tool for solving uncertainty problems in chemical industry that is and will be present in traditional chemical industry facilities into more efficient facilities transformation procedures.

Keywords: uncertainty; chemical process industry; optimization; linear programming; decision making.

1. INTRODUCCIÓN

En la industria de procesos químicos, diariamente hay que tomar decisiones sobre el diseño o control operacional del proceso transformativo. Frecuentemente estas decisiones se basan en la evaluación, de alternativas, donde cada una tiene ventajas e inconvenientes sin que se pueda comprender de inmediato, a causa de la complejidad de la situación, qué variante es mejor y por qué razón.

Para ayudar a una decisión, aclarando y comparando las diferentes alternativas, se deben realizar una serie de cálculos para estimar indicadores de carácter económico, tecnológico, energético o ambiental y elegir definitivamente una variante. Estos problemas en general, requieren para su solución concepciones metodológicas comunes independientemente de su origen y han sido agrupados en el terreno de la investigación de operaciones, lo que incluye principalmente los métodos matemáticos de optimización conteniendo la programación lineal, no lineal y dinámica, aunque otros autores envuelven también otros campos de la matemática (Ventsel, 1980).

La Programación Lineal (PL), entendida como la optimización de una función lineal sujeta a restricciones también lineales, es simple en su estructura matemática, pero poderosa en su adaptabilidad a una amplia gama de aplicaciones (Gass, 1969). En la literatura científica internacional se refieren aplicaciones de la PL, tales como:

- a) Minimizar los costos de transportación entre varias plantas de la industria química.
- b) Optimizar el mezclado de los flujos de una refinería para producir grados específicos de gasolina con una máxima utilidad.
- c) Formular un esquema de producción que considere el pronóstico de ventas, mientras que minimiza el costo de producción y comercializaciones.

Es por ello que los ejemplos de aplicación de este poderoso método de optimización requieren de atención. Por la experiencia conocida por los autores, es interés exponer las aplicaciones de la PL en investigaciones aplicadas desarrolladas en su entorno en la solución de problemas de interés para la industria química. Con ello se concluye sobre el posible impacto de la PL en el desarrollo de la industria química y fermentativa y sugerir las posibles aplicaciones futuras con el objetivo de mostrar las aplicaciones de la programación lineal en la solución de problemas de la industria de Procesos Químicos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó sobre la base de estudiar los procedimientos utilizados en las defensas de Tesis de Doctorado en Ciencias Técnicas de la especialidad de Ingeniería Química en los últimos 40 años y los artículos científicos derivados de esas investigaciones. En muchos casos se accedió a los doctorandos, tutores o investigadores principales de los proyectos a los cuales tributaron las referidas tesis doctorales. Este método de trabajo que combinó la investigación documental con las entrevistas a investigadores, permitió hacer una tipificación de las aplicaciones de las investigaciones respaldando cada una de las cuatro direcciones en las cuales se ha clasificado la incertidumbre en la Ingeniería Química (Rudd y Watson, 1968). Las investigaciones se ordenaron para su análisis como sigue:

- Optimización de los parámetros de calidad de proceso industriales (considerando la incertidumbre en el diseño).

- Macrolocalización de instalaciones industriales (considerando la incertidumbre sobre los cambios futuros).
- Optimización de mezclas, uso de materias primas y recursos energéticos (considerando la incertidumbre sobre cambios en el entorno).
- Optimización de los valores inversionistas (considerando la incertidumbre en los fallos de los equipos e instalaciones).

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al realizar el estudio de las aplicaciones de la PL se emplea siempre el procedimiento básico de este método, es decir una o varias funciones objetivo lineales y restricciones lineales. También se encuentran problemas comunes a cada grupo de aplicaciones de investigación y requerimientos para la aplicación, siendo distintivo la formulación de los modelos de las funciones lineales. Como enseña la experiencia, el problema de optimización, desde la Ingeniería de Procesos Químicos, no se centra en los métodos matemáticos, sino en las cuestiones metodológicas, es decir, en el planteamiento del problema que incluye la selección del parámetro de optimización, la selección del modelo matemático y comprende la definición de las restricciones que hacen real la solución al problema estudiado. Cada grupo de aplicaciones, según los problemas de incertidumbre considerados tiene rasgos comunes y restricciones para su aplicación.

3.1. Optimización de los parámetros de calidad de proceso industriales sin incrementos innecesarios de costos (incertidumbre en el diseño de equipos y esquemas tecnológicos).

3.1.1. Problema común de la investigación

Necesidad de cumplir las normas de calidad de los productos independientemente de variaciones en la calidad de las materias primas, deterioro de los equipamientos y obsolescencia de los esquemas tecnológicos.

3.1.2. Requerimientos

Conceptualizar la posibilidad y necesidad de simular el comportamiento de los sistemas con apoyo de modelos lineales del proceso elaborados con métodos estadísticos de análisis de la confiabilidad de datos de procesos y laboratorios, así como de regresión múltiple que fortalezca la selección de los datos de trabajo mejorando su confiabilidad y significación a partir de la información que generan los propios procesos industriales y su funcionamiento (González et al., 1984), (González, 1985). Para ello habrá que tenerse en cuenta las posibilidades de elaborar y validar el modelo global del proceso a partir del procesamiento estadístico de los datos del control del proceso, González (1982).

3.1.3. Investigaciones realizadas

En esta dirección de trabajo, González (1982) logró a partir del procesamiento estadístico de los datos de control de un proceso tecnológico; la optimización de un proceso para la producción de cartoncillo para corrugar, de idéntico modo y principios metodológicos adaptados a las condiciones específicas de cada proceso o etapa industrial. González y García (1988), y Rodríguez (1988) determinaron las condiciones

óptimas de operación de una planta de pulpa para papel y Morales (1994) propuso las condiciones óptimas de operación y propuestas de alternativas de desarrollo de un combinado de papeles blancos. Así mismo González (2008), se apoyó en las posibilidades reales de optimizar las condiciones de operación e una instalación con alto deterioro para fundamentar su reconversión. Por su parte, Santos (1997) brindó una Metodología de análisis técnico económico para el incremento de la capacidad de producción de papeles industriales a partir de optimizar las posibilidades de incrementar capacidades de equipamiento. Esto sin dudas, estuvo antecedido del trabajo de Gómez (1984) sobre la optimización de la selección del tipo de equipos empleados en la etapa de purificación de los jugos de la caña de azúcar. Albernas (2014) con una concepción más audaz logró y aplicó un procedimiento para la síntesis y el diseño óptimo de plantas discontinuas de obtención de bioetanol empleando bagazo de caña de azúcar.

3.1.4. Resultados alcanzados

1. La determinación del tiempo óptimo de cambio de los discos del refinador de simple disco instalado en una fábrica de pulpa semiquímica posibilitando organizar los ciclos de cambios de esos elementos minimizando las pérdidas por tiempo o interrupciones operacionales maximizando los beneficios económicos (González y Acevedo, 1982).
2. La selección de alternativas de disposición de equipos según las tecnologías disponibles para la etapa de purificación de jugos de la industria de la caña de azúcar (Gómez, 1984).
3. La determinación de las condiciones operacionales que posibilitan la ganancia óptima en la operación de una instalación productora de cloro y sosa con un alto grado de deterioro (Ruiz et al., 1992).
4. Prescribir con un criterio multiobjetivo las mejores condiciones de operación del proceso de producción de pulpa blanqueada en un combinado de fabricación de papeles blancos (Rodríguez et al., 1993).
5. La determinación de las condiciones óptimas para el diseño industrial de una instalación productora de etanol de segunda generación (Albernas et al., 2014).
6. Estimar alternativas de crecimiento de la producción de biocombustibles en Guatemala con un máximo aprovechamiento de las materias primas y las instalaciones existentes con un mínimo de nuevas inversiones (García et al., 2015).
7. Fundamentar las necesidades técnico económicas de reconstrucción de una instalación industrial (González y González, 2007).
8. Precisar las condiciones operacionales que posibilitan la ganancia óptima en la operación de una instalación productora de papeles blancos utilizando papel reciclado en la mezcla de pasta de papel (González y Santos, 1994).

3.2. Macrolocalización de instalaciones industriales considerando la incertidumbre sobre los cambios futuros.

3.2.1. Problema común de la investigación

Existen diferentes fuentes de materias primas para las producciones requeridas y en ocasiones también diferentes destinos de los productos y además incertidumbre en la

demanda del mercado y la disponibilidad de la materia prima. Se quiere determinar la localización de las plantas de producción, con una distribución óptima de las materias primas y productos terminados.

3.2.2. Requerimientos

Se requiere establecer la proyección de la demanda de los productos y de la disponibilidad de las materias primas, con apoyo de métodos estadísticos de regresión que permiten establecer los cambios en función del tiempo, de manera que se puedan comparar los resultados por ambas vías y buscar soluciones que consideren los cambios futuros tanto, en disponibilidad como en demanda (Pérez et al., 2008).

3.2.3. Investigaciones realizadas

En la aplicación de la PL en el desarrollo de la industria química entre otros trabajos se reportan los estudios de alternativas de desarrollo prospectivo de los derivados de la caña de azúcar (Oquendo, 2002), la macrolocalización de la digestión anaerobia como medio para la optimización del aprovechamiento de los residuos orgánicos, (Barreto, 2007). Más recientemente la macrolocalización de una instalación productora de biodiesel a partir de cachaza de la industria de la caña de azúcar (García, 2012).

3.2.4. Resultados alcanzados

1. Se propuso dónde debía estar instalada una nueva planta productora de etanol en Camagüey, considerando la incertidumbre en la demanda del producto y en la materia prima, su vínculo con una refinería de alcohol (Oquendo y González, 2001).
2. Se evaluaron las diferentes posibilidades de macrolocalización de productos derivados en la provincia de Camagüey considerando las disponibilidades de materias primas y los encadenamientos productivos (Oquendo et al., 2001).
3. Se propusieron las macro localizaciones de instalaciones de producción de biogás mediante la digestión anaerobia como medio para la optimización del aprovechamiento de los residuos orgánicos en una región en desarrollo (Barreto, 2007).
4. La determinación de los lugares para invertir en instalaciones productoras de biodiesel de aceite de palma africana para reciclado de aluminio en Cabinda Angola (Muto et al., 2018).
5. La macrolocalización de una instalación productora de biodiesel de residuos sólidos industriales en una región azucarera (García, 2012).

3.3. Optimización de mezclas, uso de materias primas y recursos energéticos (cambios en el entorno).

3.3.1. Problema común de la investigación

Existen cambios en los costos y fuentes de adquisición de materias primas y portadores energéticos para las producciones requeridas y en ocasiones también cambios en las exigencias de calidad de los productos para dedicarlos a la exportación por lo que las tecnologías originales de las instalaciones industriales deben ser modificadas para ser competitivas asegurando bajos costos y la calidad exigida en las producciones

3.3.2. Requerimientos

Estudios experimentales, mediante diseños experimentales de mezclas, para evaluar con expresiones matemáticas el uso de diferentes mezclas de materias primas en los objetivos del proceso, y también una adecuada valoración a través de la influencia de los balances de materiales y energía en los indicadores económicos de producción y la minimización de los impactos ambientales (González et al., 2010).

3.3.3. Investigaciones realizadas

Los estudios aplicando la PL para optimizar la composición de las mezclas de materias primas fueron abordados por varios autores, en investigaciones en las que resalta: la determinación de proporción óptima de pulpa de bagazo y pulpa de papel reciclado para la producción de cartón para corrugar (González, 1982). La mejor proporción de arena y vidrio roto en la fabricación de vidrio (Borges, 1996). Las mejores condiciones de mezclas para cerámicas técnicas fueron determinadas por Garcés (1996). La mezcla óptima para papeles blancos utilizando pulpa de madera y papel reciclado (Morales, 1994) y la producción de etanol de mezclas de fermentación de miel y jugo de los filtros (de la Cruz, 2002); (García, 2012), o de mezclas de sustratos de tres generaciones (de Armas, 2019).

La consideración de la incertidumbre en la integración de procesos abordada por (Catá, 2006) ha logrado interesantes resultados ahorrando portadores energéticos (combustibles y agua).

3.3.4. Resultados alcanzados

1. Se determinó la composición de mezcla óptima de pulpa de bagazo y papel para reciclar en la producción de cartón para ondular en una instalación industrial (González et al., 1985).
2. Se prescribió la proporción óptima de la mezcla para la producción de cerámica antiácida en una instalación industrial definida (Garcés et al., 1995 b).
3. Se estableció el porcentaje permisible de vidrio roto en la minimización de los consumos de combustible en un horno de vidrio (Borges et al., 1995).
4. Se estipuló la mejor composición de la mezcla para la producción de materiales en la producción de cerámica para aisladores (Garcés et al., 1995 a).
5. Se demostró la posibilidad de incorporación de otras materias primas como fuente de azúcares fermentables en destilerías existentes de etanol (García et al., 2015).
6. Una propuesta de alternativa óptima de integración material y energética para la producción de aditivos oxigenados a partir de bioetanol en una instalación de una empresa solicitante (Pedraza et al., 2003), (González et al., 2006).
7. La valoración de las alternativas de integración de una industria de aditivos oxigenado a una fábrica de azúcar (Pedraza et al., 2003).
8. Una propuesta de nueva tecnología más limpia a través de la integración de procesos en la producción de papel para ondular (González, 2004), (González et al., 2005).
9. Se demostró la factibilidad de la integración energética entre los procesos de fabricación de azúcar y etanol (Corso et al., 2010).
10. La minimización los consumos de agua en la industria de pulpa y papel mediante

la integración óptima de los sistemas de agua (González et al., 2004).

3.4. Optimización de los valores inversionistas considerando la incertidumbre en la falla de los equipos-instalaciones.

3.4.1. Problema común de la investigación

Debido a que los equipos móviles de las instalaciones industriales de procesos químicos fallan con más frecuencia que los equipos que permanecen estáticos, pero que comúnmente son aquellos en los cuales se realizan las operaciones fundamentales del proceso industrial y además tienen un costo inversionista mayor; se ha recomendado considerar la fiabilidad de los equipos en los estudios inversionistas de la industria de procesos químicos (González et al., 1994) con el objetivo de minimizar los costos inversionistas y optimizar los sistemas de mantenimiento industrial.

3.4.2. Requerimientos

Son necesarios estudios de la historia de fallos de los equipos y la construcción de diagramas de fiabilidad de los procesos en análisis, para con apoyo de métodos estadísticos de análisis de fallos históricos establecer funciones de probabilidad de trabajo sin fallos y evaluar las diferentes posibilidades de redundancia de los equipos a instalar (Rosa et al., 2003).

3.4.3. Resultados alcanzados

1. Optimización de los valores inversionistas para una destilería de etanol (Rosa et al., 2003).
2. Optimización de las inversiones en procesos para incrementar la eficiencia de una fábrica de azúcar con diversos derivados integrados (Morales y González, 2017).
3. Valoración del efecto del incremento de las posibilidades de integración de proceso considerando la fiabilidad de los equipos (Catá et al., 2006).

3.5. Proyecciones futuras

Conociendo la tendencia de desarrollo de la Ciencia y la Tecnología permiten sugerir que una proyección en el desarrollo de las biorrefinerías según las experiencias de González (1982), Morales (1994), Pérez (2013) y de Armas (2019); así como el análisis de la posible interacción de cada uno de los trabajos que la aplicación de la PL estará presente en los procesos de desarrollo y producción de la industria de procesos químicos y fermentativos (González et al., 2016).

Con este propósito, una síntesis del diagrama del complejo proceso heurístico para el trabajo futuro se presenta en la Figura 1. El diagrama evidencia una posible heurística a aplicar en la industria que permite obtener condiciones de operaciones óptimas luego de aplicar una serie de procedimientos basados en métodos estadísticos y en la programación lineal.

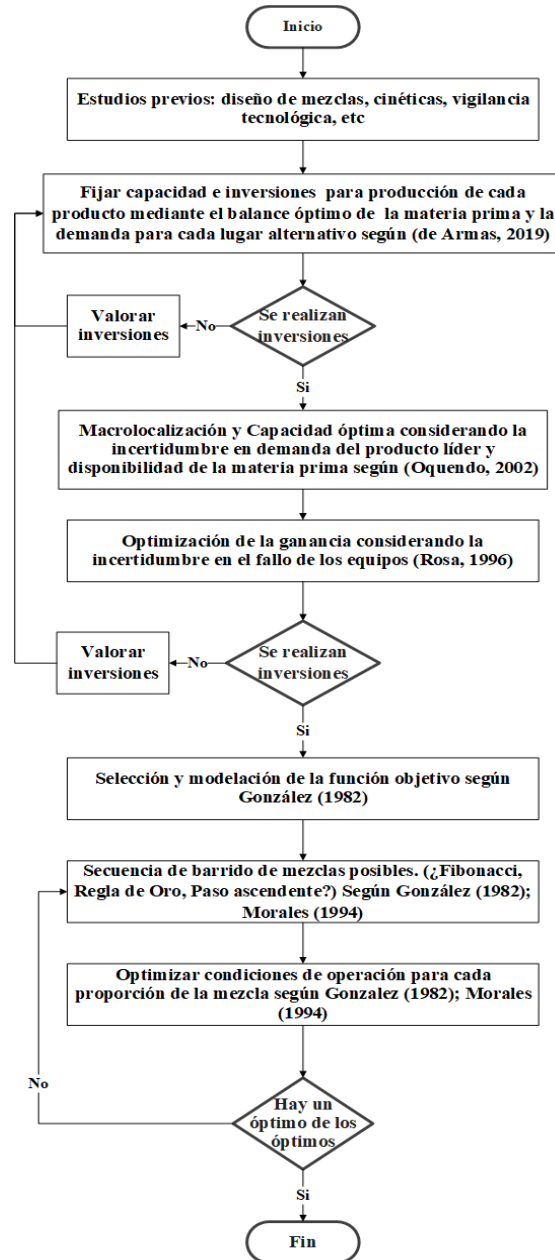


Figura 1. Síntesis del diagrama heurístico para el trabajo futuro

4. CONCLUSIONES

1. La PL ha sido una herramienta versátil para resolver los problemas de incertidumbre en los procesos de la industria química.
2. Se requiere de otros métodos matemáticos como complemento al uso de la PL en la solución de los problemas de la industria de procesos químicos.
3. La PL estará presente en varios momentos de los procedimientos de transformación de instalaciones tradicionales de la industria química en instalaciones más eficientes.

REFERENCIAS

Albernas, Y., Procedimiento para la síntesis y el diseño óptimo de plantas discontinuas de obtención de bioetanol empleando bagazo de caña de azúcar., 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, 2014.
- Albernas, Y., Corsano, G., Morales, M., González, M., Santos, R. & González, E., Optimal design for an ethanol plant combining first and second-generation Technologies., *Ciencia Tecnología y Futuro (ct&f)*, Vol. 5, No. 5, 2014, pp. 97-120.
- Barreto, S., Empleo y macrolocalización de la digestión anaerobia como medio para la optimización del aprovechamiento de los residuos orgánicos., Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Especialidad Ingeniería Química en la Universidad “Ignacio Agramonte” de Camagüey, Cuba, 2007.
- Borges, A., Alternativas de intensificación energética y tecnológica de la industria del Vidrio., 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, 1996.
- Borges, A., González, E., y Regalado, N., Determinación del porcentaje permisible de vidrio roto en la minimización de los consumos de combustible en un horno de vidrio., *Centro Azúcar*, Vol. 22, No. 3, 1995, pp. 75-76.
- Catá, Y., Metodología para la consideración de la incertidumbre en la integración de procesos. 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, 2006.
- Catá, Y., González, M., González, E., y Corsano, G., Estudio de fiabilidad en un complejo fabril integrado considerando la incertidumbre., *Revista Cubana de Química*, Vol. 18 No. 1, 2006, pp. 183-184.
- Corso, Y., González, M., González, V., y González, E., Factibilidad de la integración energética entre los procesos de fabricación de azúcar y alcohol., *Centro Azúcar*, Vol. 37, No. 1, 2010, pp. 1-7.
- de Armas, A.C., Alternativas de obtención de etanol y coproductos utilizando tecnologías de tercera generación e integrado a una fábrica de azúcar en el concepto de biorrefinería., 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, 2019.
- de la Cruz, R., Aplicación del análisis de Procesos en la intensificación de la integración del CAI - Destilería en Melanio Hernández de Sancti Spíritus., Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Especialidad Ingeniería Química en la Universidad José Martí de Sancti Spíritus “José Martí Pérez”, Cuba, 2002.
- García, R., Estrategia para la producción de biocombustibles en Guatemala., 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, 2012.
- García, R., Pérez, A., Diéguez, K., Mesa, L., González, I., González; M., y González, E., Incorporación de otras materias primas como fuentes de azúcares fermentables en destilerías existentes de alcohol., *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, No. 75, 2015, pp. 130-142.
- Garcés, L., Alternativas de optimización de las producciones de cerámicas técnicas

- 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, 1996.
- Garcés, L., González, E., y Regalado, N., Determinación de la mejor composición de la mezcla para la producción de materiales en la producción de cerámica para aisladores., *Centro Azúcar*, Vol. 22, No. 3, 1995 a, pp. 65-74.
- Garcés, L., González, E., y Regalado, N., Determinación de la proporción óptima de la mezcla para la producción de cerámica antiácida., *Centro Azúcar*, Vol. 22, No. 3, 1995 b, pp. 84-89.
- Gass, S.I., *Linear Programming.*, Edición, McGraw - Hill., N.Y., 1969, pp. 11-19.
- Gómez, L., Método para la modelación matemática y optimización de la etapa de purificación de los jugos de la caña de azúcar., 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, 1984.
- González, I., Rabasa, G., Pérez, A., González, E., y Castro, E., Herramienta para apoyar la toma de decisiones en el desarrollo de biorrefinerías., *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, Vol. 15, No. 3, 2016, pp. 943-951.
- González, E., González, V., y Peralta, L.M., Consideraciones sobre la elaboración de modelos lineales de procesos industriales., *Centro Azúcar*, Vol. 11, No. 2, 1984, pp. 91- 98.
- González, E., Modelación y optimización de un proceso tecnológico para la producción de cartoncillo para corrugar., 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, 1982.
- González, E., Fundamento científico del empleo de modelos lineales en la optimización de las condiciones de operación de las instalaciones de los procesos químicos., *Centro Azúcar*, Vol. 12, Número Especial, 1985, pp. 1-17.
- González, E. y Acevedo, A., Estudio del tiempo óptimo de cambio de los discos de refinador de simple disco., *Centro Azúcar*, Vol. 9, No. 2, 1982, pp. 91-94.
- González, E., Catá, Y., Pedraza, J., Análisis de las variantes de integración material y energética de un combinado para la producción de aditivos oxigenados anexo a una fábrica de azúcar., *Revista Universidad EAFIT*, Vol. 42, No. 143, 2006, pp. 103-109.
- González, E., González, V., Guirado, B., Martínez, V., y García M., Uso combinado del Simplex y la técnica de Fibonacci en la optimización económica de un proceso tecnológico de producción de cartoncillo., *Tecnología Química*, Vol. VI, No. 4, 1985, pp. 53-64.
- González, E., y García, R., Efecto estimado del desgaste de los discos y la calidad del tipo de bagazo en la eficiencia de la producción de cartoncillo., *Tecnología Química*, Vol. IX, No. 1, 1988, pp. 83-86.
- González, E., y Santos, N., Posibilidades de la Programación Lineal en la intensificación de la industria del papel., *Centro Azúcar*, Vol. 21, No. 1, 1994, pp. 3-10.
- González, E., Martín, M.M., y Rosa, E., Necesidad de incluir los estudios de fiabilidad en el análisis inversionista., *Centro Azúcar*, Vol. 21, No. 1, 1994, pp. 81-88.
- González, M., Impacto global de una tecnología más limpia en la fabricación de papel

- para ondular., 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, 2004.
- González, M., González, E., Aguirre, P., y Corsano, G., Integración óptima en el Sistema de Reciclado de Aguas en Procesos Papeleros., Revista Información Tecnológica, Vol. 15, No 3, 2004, pp. 71-74.
- González, M., González E., y Corsano G., Tecnología más limpia a través de la integración de procesos en la producción de papel para ondular., Afinidad, Vol. 62, No. 520, 2005, pp. 584-588.
- González, M., Catá, Y., y González, E., Integración de masa para la prevención de la contaminación., Afinidad, Vol. 66, No. 539, 2010, pp. 173-177.
- González, N., y González, E., Aplicación del análisis de proceso en la asimilación de nuevas tecnologías para la modernización en el caso de alto deterioro del estado técnico de la instalación., Tecnología Química, Vol. XXVII, No. 1, 2007, pp. 5-9.
- González, N., Estrategia de reconversión de una instalación de la industria química., 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, 2008.
- Morales, M., Determinación de las condiciones óptimas de operación y propuesta de alternativas de desarrollo del combinado de Papeles Blancos de Jatibónico., 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, 1994.
- Morales, M., y González E., Evaluación de la fiabilidad en una industria diversificada a partir de la reconversión de sus instalaciones., Tecnología Química, Vol. XXXVII, No. 1, 2017, pp. 5- 15.
- Muto, D., González, E., Hernández, G.D., Miño, J.E., y González, I., Inversiones en biodiesel de aceite de palma africana para el reciclado de aluminio en Cabinda Angola., Visión de futuro, Vol. 22, No. 1, 2018, pp. 71-93.
- Oquendo, H., Alternativas de desarrollo prospectivo de los derivados de la caña de azúcar., Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Especialidad Ingeniería Química en la Universidad “Ignacio Agramonte” de Camagüey, Cuba, 2002.
- Oquendo, H., y González, E., Aplicación de la programación lineal para determinar la macrolocalización de una planta de alcohol en Camagüey., Centro Azúcar, Vol. 28, No. 2, 2001, pp. 23-26.
- Oquendo, H., Parra, C., Crespo, L., y González, E., Aplicación de la programación lineal a la diversificación azucarera., Centro Azúcar, Vol. 28, No.3, 2001, pp. 63-68.
- Pedraza, J., González, E., Matos, L., y Fuentes, M., Alternativas de integración material y energética para la producción de aditivos oxigenados a partir de bioetanol en condiciones de incertidumbre., Centro Azúcar, Vol. 30, No. 2, 2003, pp. 52-59.
- Pérez, A., Procedimiento metodológico para el diseño de procesos sostenibles de la agroindustria cubana., Tesis presentada en opción al Grado Científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Especialidad Ingeniería Química en la Universidad “Ignacio Agramonte” de Camagüey, Cuba, 2013.

- Pérez, A., Oquendo, H., y González E., Metodología para la macrolocalización de plantas de la industria de procesos, considerando la incertidumbre y la integración de estos., Centro Azúcar, Vol. 35, No. 3, 2008, pp. 1-4.
- Rodríguez, I., Determinación de las condiciones óptimas de operación de la Planta de Pulpa del combinado de Papeles Blancos de Jatibónico., 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, 1988.
- Rodríguez, I., Díaz, I., Gutiérrez, O., y González. E., Optimización con objetivos múltiples del proceso de producción de pulpa blanqueada en el combinado de papeles blancos Panchito Gómez Toro., Centro Azúcar, Vol. 20, No. 1, 1993, pp. 36-42.
- Rosa, E., González, E., y Hauptmanns, U., La fiabilidad de los equipos en el diseño de una instalación para la producción de bioetanol., Centro Azúcar, Vol. 30, No. 1, 2003, pp. 35-42.
- Rudd, D., y Watson, C. Strategy of Process Engineering., McGraw Hill. NY., 1968, pp. 309-411.
- Ruiz, M., Águila, L., González, E., González, N., Condiciones para la ganancia óptima en una Planta de Cloro y Sosa., Revista Tecnología Química, Vol. XIII, No. 2, 1992, pp. 37- 40.
- Santos, N., Metodología de Análisis Técnico Económico para el incremento de la capacidad de producción de papeles industriales. 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, 1997.
- Ventsel, E.S., Investigación de Operaciones, problemas, principios, metodología. Editorial MIR, Moscú, 1980, pp. 7-20.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no existe conflicto de interés.

CONTRIBUCIONES DE LOS AUTORES

- Ing. Yoelvis Fleites Avila. Realizó revisión bibliográfica, su integración y proyección, así como la escritura y corrección del artículo.
- Ing. César Augusto Martí Marcelo. Participó en la aplicación a casos específicos, así como en la escritura y corrección del artículo.
- Dra.C. Yaillet Albernas Carvajal. Participó en la aplicación a casos específicos, así como en la proyección, escritura y corrección del artículo.
- Dr.C. Juan Esteban Miño Valdés. Colaboró con la revisión bibliográfica, así como en la proyección futura.
- Dr.Sc. Erenio González Suárez. Aportó la experiencia histórica de la investigación y asesoró en la proyección futura.