

27

Fecha de presentación: julio, 2021
Fecha de aceptación: agosto, 2021
Fecha de publicación: septiembre, 2021

LOS MÉTODOS MATEMÁTICOS

EN LAS ACCIONES POSTGRADO DE GESTIÓN DE CONOCIMIENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA

MATHEMATICAL METHODS IN POSTGRADUATE KNOWLEDGE MANAGEMENT ACTIONS IN CHEMICAL ENGINEERING

Erenio González Suárez¹

E-mail: erenio@uclv.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5741-8959>

Diana Niurka Concepción Toledo¹

E-mail: dianac@uclv.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4432-140X>

Fernando Ramos Miranda²

E-mail: framos@ucf.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0601-6228>

Roxana Cortés Martínez²

E-mail: rcortes@ucf.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2040-6548>

Eduardo Julio López Bastida²

E-mail: kuten@ucf.edu.cu

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8503-3025>

¹ Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Santa Clara. Cuba.

² Universidad de Cienfuegos “Carlos Rafael Rodríguez”, Cuba.

Cita sugerida (APA, séptima edición)

González Suárez, E., Concepción Toledo, D. N., Ramos Miranda, F., Cortés Martínez, R., & López Bastida, E. J. (2021). Los métodos matemáticos en las acciones postgrado de Gestión de Conocimiento de Ingeniería Química. *Revista Universidad y Sociedad*, 13(5), 259-267.

RESUMEN

Desde la concepción de la idea hasta su introducción y adaptación, a las condiciones del mundo productivo real se demandan varios pasos que implica la obtención de información de variables químico física y de diseño requeridas para el diseño industrial. Esto implica gastos de recursos materiales, financieros de equipamiento y de tiempo, está es la más importante, pues el tiempo es lo más preciado de aquellos que solo tiene a su talento como fortuna. El objetivo de este trabajo es explicar las características comunes de los métodos reportadas en el quehacer científico y en particular la propia experiencia en más de 40 años de los autores en conexión con la solución de problemas en la industria. En la aplicación de métodos matemáticos en la estrategia del análisis e ingeniería de procesos químicos se requiere, para la asimilación y desarrollo de nuevas tecnologías, una gran demanda de información que solo es posible procesar gracias a los métodos matemáticos de investigación. La formación en la utilización práctica y sistemática de las herramientas matemáticas es un rasgo distintivo de la época en la formación de pregrado y postgrado del Ingeniero Químico.

Palabras clave: Estrategia, matemáticas, métodos, industria química, ingeniería.

ABSTRACT

From the conception of the idea to its introduction and adaptation, several steps are required to the conditions of the real productive world, which implies obtaining information on chemical, physical and design variables required for industrial design. This implies expenses of material resources, financial equipment and time, this is the most important, since time is the most precious of those who only have their talent as their fortune. The objective of this work is to explain the common characteristics of the methods reported in the scientific endeavor and in particular the authors' own experience in more than 40 years in connection with the solution of problems in the industry. In the application of mathematical methods in the strategy of analysis and engineering of chemical processes, a great demand for information is required for the assimilation and development of new technologies that can only be processed thanks to mathematical research methods. Training in the practical and systematic use of mathematical tools is a distinctive feature of the time in the undergraduate and postgraduate training of the Chemical Engineer.

Keywords: Strategy, mathematics, methods, chemical industry, engineering.

INTRODUCCIÓN

Los procesos de la industria química y fermentativa tiene como objetivo fundamental lograr productos de alto valor agregado, con ese propósito se utilizan materias primas fundamentales, productos químicos auxiliares, recursos energéticos, fuerza de trabajo e instalaciones de procesos industriales que han requerido un costo de adquisición y gastos inversionista, de manera que los recursos financieros, son requisito indispensable para lograr los objetivos primarios de las industrias de procesos químicos y fermentativos. Además, como se conoce, este sector es fuente de residuos de agresividad al medio ambiente y la minimización de este efecto debe considerarse (Hájek & Stejskal, 2018).

El mundo moderno exige de los dirigentes industriales, el empleo de ideas nuevas para incrementar al máximo la eficiencia en la utilización de los recursos, se comprende que cualquier idea que tienda a reducir gastos en la industria es, hoy por hoy, una fuerza que actúa positivamente sobre la eficiencia económica (Miró Pérez, 2017).

Cualquier idea de nuevo tipo requiere de un proceso de experimentación para conocer las tendencias reales de comportamiento en la práctica tecnológica, así desde la concepción de la idea hasta su introducción y adaptación, a las condiciones del mundo productivo real se demandan varios pasos que incluyen el escalado de las tecnologías hasta nivel industrial, lo que implica también varias etapas y la obtención de información de variables química física requeridas para el diseño industrial (Díaz López & Montalvo, 2015).

Todo esto implica gastos de recursos materiales, financieros de equipamiento y de tiempo, está es quizás la menos considerada, pero la más importante, pues como se ha dicho el tiempo es el único recurso que no se recupera y los más preciado de que disponen aquellos que solo tiene a su talento como recurso. Para ello debemos encastrar nuestros esfuerzos en relación a varios aspectos.

Los métodos utilizados en este trabajo son los empleados en una investigación de tipo explicativa - cualitativa. La intención de la misma ha estado centrada en explicar las características comunes de los modos de actuación reportadas en el quehacer científico nacional e internacional y en particular las propias experiencias en más de 40 años de labor desarrolladas por los autores en estrecha conexión con el mundo empresarial proponiendo enriquecer con ello en profundidad y valor de las acciones en la temática.

DESARROLLO

En la época actual, para acelerar los resultados y enfoques multilaterales de las investigaciones, los modernos métodos matemáticos se han convertido en un poderoso arsenal metodológico para la solución actuales y prospectivos y posibilitan ya, no solo el desarrollo de los procesos óptimos, sino de problemas también la dirección de estos con vista a mantenerlos siempre en los regímenes óptimos y las rutas deseadas en lo que se destaca (Mamade Toure, et al., 2017):

- El uso de los métodos de diseño de experimento.
- La modelación matemática fenomenológica.

Experiencias de aplicaciones de la Programación Lineal en la industria de Procesos Químicos

Al realizar el estudio de las aplicaciones de la Programación Lineal empleamos siempre el procedimiento básico de este método, es decir una o varias funciones objetivo lineales y restricciones también lineales, pero también encontramos problemas comunes a cada grupo de aplicaciones de investigación y requerimientos para la aplicación siendo distintivo precisamente la formulación de los modelos de las funciones lineales, pues 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, selección del modelo matemático, comprendido la definición de las restricciones que hacen real la solución al problema estudiado (Maußner & Freund, 2018). Cada grupo de aplicaciones, según los problemas de incertidumbre considerados tienen rasgos comunes y restricciones para su aplicación, como se enuncia a continuación en su vínculo con los problemas de incertidumbre (Fleites Ávila, et al., 2020):

- Optimización de los parámetros de calidad de proceso industriales sin incrementos innecesarios de costos (incertidumbre en el diseño de equipos y esquemas tecnológicos).
- Macrolocalización de instalaciones Industriales (considerando la incertidumbre sobre los cambios futuros).
- Optimización de mezclas, uso de materias primas y recursos energéticos (incertidumbre en cambios en el entorno).
- Optimización de los valores inversionistas considerando la incertidumbre en la falla de los equipos –instalaciones (incertidumbre en las fallas operacionales).

Una proyección del trabajo futuro en esta dirección ha sido presentada por González, et al. (2016).

La modelación de procesos químicos y fermentativos en el estudio de las etapas con reacción química mediante modelos matemáticos

Las investigaciones encaminadas al conocimiento de la cinética de las reacciones presentan en muchos casos un alto grado de complejidad en lo referente a recursos materiales y técnicas analíticas, lo que en ocasiones justifica que se planteen simplificaciones que faciliten el análisis cinético (Luciano & Svoboda, 2019; Mao & Campbell, 2019; Vasudev, et al., 2019).

Por otra parte, es muy importante la investigación del mecanismo para reacciones complejas. Ello requiere el análisis de los posibles mecanismos de reacción y el diseño experimental y analítico detallado que permita dar solución a dicha problemática. Para ello también es imprescindible establecer el análisis de distribución de producto, las condiciones de operación y el modelo de contacto adecuado para lograr dicha distribución. A estos aspectos brindan un tratamiento adecuado los trabajos como referidos a la cinética y distribución de productos (Pérez, et al., 2019).

Dichos trabajos ilustran además como la adecuada selección de los parámetros de operación del proceso permite que una reacción compleja pueda ser considerada como una reacción simple en determinadas condiciones.

Es posible plantear una metodología general aplicable a cualquier situación específica a modo de modelo heurístico, capaz de considerar las particularidades de un sistema y tomar decisiones que permitan evaluar con buena precisión su modelo.

Los estudios para la caracterización de reactores, realizados a escala de laboratorio permiten modelar su cinética como paso básico en la obtención del modelo global del reactor. Dichas pruebas y las efectuadas en equipos pilotos, se pueden plantear como experimentos a escala de planta que bien meditados logran la máxima eficiencia en la investigación.

La modelación de reactores químicos a escala industrial tiene en general tres aspectos a considerar con la mayor profundidad:

- Las características experimentales que se tienen en la industria elegida y la información disponible.
- Los modelos matemáticos posibles a evaluar.
- Los procedimientos estadísticos y matemáticos que permiten el análisis del ajuste de cada modelo.

El objetivo central que rige el trabajo de modelación de un reactor es determinar las condiciones óptimas (o región óptima de operación) de los reactores químicos sin profundizar totalmente en el mecanismo o cinética de las reacciones que en ellos se producen, pero a la vez sin desatenderlas. Esto se puede asegurar en gran medida con la adecuada selección del modelo, conjugando aspectos cinéticos y estadísticos (Pérez, et al., 2019).

Métodos matemáticos aplicados en la estrategia de la ingeniería de procesos químicos

La solución de problemas reales en la industria de procesos químicos requiere la aplicación de una combinación de métodos matemáticos que deben adecuarse a las demandas concretas del caso en estudio (González & Rabasa, 2012). Se reportan ejemplos de estudios de maestría y doctorados donde se evidencia el uso de esta valiosa herramienta en diferentes campos de la Ingeniería Química:

- Aplicación de los métodos matemáticos en la definición de la estrategia de neutralización de compuestos sulfurosos con sosa cáustica en la obtención de gas licuado del petróleo.

Cortés Martínez (2019), en su investigación aplicó los métodos matemáticos en dos momentos fundamentales. En primer lugar, utilizó el método diferencial aplicando la regresión polinomial para obtener las expresiones cinéticas de las reacciones que ocurren en el proceso de desulfuración de la nafta virgen ligera inestable. Este proceso es la primera fase de la obtención del gas licuado del petróleo pues es donde se eliminan los compuestos sulfurosos que son indeseables en el producto final. Para esto se utilizaron datos experimentales obtenidos del control operacional y los análisis de laboratorio realizados a la solución de sosa, además se tuvo en cuenta que en la refinería de petróleo se procesan diferentes mezclas de crudos con diferentes proporciones.

Las expresiones cinéticas obtenidas tienen órdenes de reacción de 4,35 y 2,17 con desviaciones del comportamiento experimental por debajo de 1 % lo que demuestra su validez. Por último, se utilizaron los métodos de optimización para minimizar la producción de agua sulfurosa alcalina que es el principal residual que se genera en este proceso y que es altamente contaminante calificado como residuo peligro. Se utilizaron tres modelos matemáticos: uno para representar el consumo de la sosa cáustica, otro para el costo total de producción unitario y por último para la restricción de la calidad del producto final respecto a su contenido de azufre. Para el proceso de optimización se utilizó el software Matlab con la función fmincon que utiliza el método matemático quasi-Newton. Se

obtuvo como resultado la concentración de sosa cáustica y el tiempo óptimo para cada mezcla de crudo analizado, además se puede predecir el tiempo de recambio de la sosa cáustica permitiendo trazar una estrategia para el control del proceso de neutralización de los compuestos sulfurosos en la obtención de gas licuado del petróleo.

- Aplicación del Método Delphi Difuso e Inferencia Difusa en la industria azucarera para evaluar alternativas de conversión a biorrefinería.

En este estudio doctoral, Ramos Miranda (2014), aplica los métodos matemáticos aprovechando el modelo al que se ha llamado ADEII (Aplicación Difusa para la Evaluación Integral de Inversiones) que es un modelo metodológico elaborado para los fines de esta investigación y que tiene como fin el procesamiento del Método Delphi-Fuzzy planteado en la selección de alternativas de reconversión de la industria azucarera cubana con técnicas difusas. Del diagnóstico y el estudio de la proyección cañera de los productores asociados al ingenio estudiado se evidenció que con las condiciones tecnológicas actuales de la agricultura solo se tiene condiciones favorables para asegurar la materia prima de 153 días de zafra, por lo que es necesario realizar inversiones agrícolas o posponer la propuesta hacia fecha posterior. Se estudiaron trece alternativas y los expertos consideraron que en el caso de las alternativas numeradas como XI, XII y XIII no debía continuarse el análisis debido principalmente a que los jugos de la región son de alta pureza toda la zafra y es preferible mantener las instalaciones produciendo miel final y evitar convertirlas a fábricas de azúcar trabajando con miel B. Las cuatro alternativas menos importantes fueron la III por considerarse que la habilitación de una caldera bagacera para petróleo resulta en una baja eficiencia de combustión, en la VI alternativa se consideró que aunque este tipo de evaluación es efectiva para otros escenarios, en el caso de la agroindustria azucarera cubana deben evaluarse separadamente las inversiones industriales de las cañeras debido a la complejidad de las tecnologías agrícolas y la forma de evaluar los indicadores dinámicos. La Alternativa VIII no se seleccionó, debido a que precisamente uno de los objetivos de este trabajo fue valorar la conveniencia de producir co-productos de alto valor agregado, cuestión que en ésta no se contempla. En la alternativa IX se consideró que un sistema BIG-GT no debe ser evaluado para trabajar en zafra solamente, por el alto costo de inversión. Se compararon las alternativas I y II y no se apreciaron diferencias significativas en los indicadores, lo que evidenció que las variantes de jugos pobres-jugos ricos no son tan influyentes en los indicadores con los precios y costos actuales. Por otra parte, cuando se compararon la I (o la II) con la IV, se evidenció que los relativos altos costos de inversión y operación

que todavía existen en la tecnología lignocelulósica y que se proponen en las primeras dos alternativas, afectan significativamente en el resultado del indicador global Sostenibilidad ISA, lo que evidencia esta fuerte influencia. Esta circunstancia hace que la IV alternativa posea el mejor VAN (excepto el caso de la VII), debido principalmente a los relativos altos precios del alimento animal y los también relativos bajos costos de producción. La IV Alternativa es beneficiada también al ser indirectamente una fuente de alimentos para la población lo que hace que se incremente significativamente el Índice Social.

En González, et al. (2020), se recopilan varios estudios doctorales donde se utilizan los métodos matemáticos:

- Aplicación de los métodos matemáticos a un caso que incluye la remodelación y ampliación de la planta para resolver problemas de costo y contaminación.

La fábrica estudiada, Papelera Damují, fue construida antes del año 1959 y puesta en funcionamiento en los inicios de los años 60, con una tecnología desbalanceada pues su planta de producción de pulpa semi-química, a partir de bagazo de caña, era insuficiente en cuanto a la calidad y proporción que para la producción de cartoncillo se requiere. El bagazo que se obtiene del procesamiento industrial de la caña de azúcar, ya sea a granel o en pacas, es heterogéneo. Por otro lado, desde su puesta en operación, la fábrica originó un efecto contaminante en el río Damují, hacia el cual se derraman sus licores residuales con un alto contenido de lignina.

Por lo anterior, fue propósito de la industria, fundamentar una estrategia de desarrollo tecnológico global que permitiera: disminuir los costos de producción, incrementar los niveles de calidad y producción y posibilitar la inversión en un sistema de tratamiento de residuales. Aquí se consideró que dados la probable magnitud de un proceso inversionista que incluya la solución del tratamiento de residuales y el tiempo que se requiere para su materialización, se debe organizar primero el trabajo de intensificación de la instalación existente y después evaluar las posibilidades de una modernización y reordenamiento de la instalación, para lo cual se requiere un análisis de la fiabilidad del proceso y el estado técnico de la planta.

En la primera etapa de análisis parciales y de completamiento de la profundización científica se realizaron estudios de los elementos y aspectos fundamentales en la planta, entre los que se incluyeron los siguientes: 1- los balances de materiales y energía del proceso que permitieron determinar la eficiencia de los ciclos de calor y los consumos y pérdidas de fibras, 2- un estudio de los factores que inciden en la etapa de reacción química a escala industrial con la ayuda de diseños de experimentos,

permitió modelar la etapa y analizar el efecto de las materias primas fundamentales, 3- se cuantificó la eficiencia energética del refinador de discos simples /86/, estudiando su comportamiento a escala industrial con ayuda del método de Plackett-Bürman, las variables que afectan las propiedades físico-mecánicas de la pulpa refinada, lo que sirvió de base para, mediante un diseño factorial 2^{5-2} obtener los modelos estadísticos de la producción de pulpa refinada, consumo de potencia y costo de operación y 4- se estudió el efecto económico del desmeollamiento en la producción de pulpa comprobándose además las limitadas posibilidades que para desmedular tiene la instalación existente en la fábrica de azúcar que entrega bagazo a la papelería objeto del análisis. Con el estudio se obtuvieron resultados económicos y sociales como:

- Más de 200.000 pesos anuales por cambio en la formulación de la mezcla fibrosa con ahorro de materias primas y portadores energéticos al operar en condiciones óptimas el proceso tecnológico y la generación de vapor.
- Más de 10.000 pesos anuales por concepto de ciclo óptimo de reposición de los discos del Refinador RP6-36.
- Asegura una adecuada proyección inversionista en los sistemas de desmedulado de la planta.
- Ofrece alternativas económicas para que en la estrategia inversionista de la planta se puedan resolver importantes problemas de contaminación ambiental y de carácter social.
- Aplicación de los métodos matemáticos en el caso en que se desea variar la proporción de materias primas empleadas en el proceso.

Para la fabricación de papel se emplea una mezcla fibrosa de pulpa química obtenida de la cocción al sulfato de bagazo de caña de azúcar desmedulado en húmedo. La instalación cuenta con una planta para el tratamiento de los residuales. En la fábrica existen dificultades con la instrumentación, estabilidad y dirección del proceso tecnológico, lo que ha incidido en los niveles de producción, la calidad del producto terminado y los costos de producción.

En la eficiencia económica de la fábrica han incidido en particular los altos costos de producción de pulpa química de bagazo, una parte de la cual es vendida como materia prima a otras fábricas y potencialmente es un producto para la exportación por la creciente demanda de fibra en el mercado internacional. En la etapa de profundización científica del proceso, se desarrollaron balances de materiales y energía para determinar los flujos más importantes del proceso. Considerando la importancia técnico-económica de la Planta de Pulpa, se siguió la estrategia

de optimizar en una primera etapa la operación de esta planta, y, en trabajo paralelo, con una necesaria fecha de culminación posterior, proceder a la determinación de las condiciones óptimas de operación y proporción de la mezcla para todo el proceso tecnológico.

Durante el estudio estuvo la necesidad de realizar un profundo estudio tanto a escala de laboratorio como a escala industrial de la cocción del bagazo, elemento determinante de la calidad, rendimiento y costo de la pulpa química. La complejidad del análisis del elemento de cocción estuvo dada por el número de variables reportadas en la literatura como influyentes en el proceso, por el hecho de efectuarse la reacción en un sistema heterogéneo, sólido-líquido, unido a la compleja estructura de los materiales lignocelulósicos y además por ocurrir las reacciones al sulfato (caso en estudio) en varias etapas. El estudio cinético a escala de laboratorio tuvo, como uno de los principales objetivos, la determinación de la energía de activación de acuerdo con un Plan Experimental cuyos resultados fueron evaluados mediante el Análisis Diferencial. Concluido el estudio del elemento de cocción de la planta de Pulpa se procedió a la modelación del proceso tecnológico de la producción de pulpa obteniéndose modelos matriciales de los elementos componentes y su consecuente ordenamiento. Se obtuvo como resultados:

- Más de 100 000 pesos anuales por disminución de los costos de producción de pulpa de bagazo.
- Más de 115 000 pesos anuales por disminución de los costos de producción de papel y garantía de su calidad.
- Elaboración de una estrategia inversionista para la creación de condiciones con vistas a exportar pulpa de bagazo.
- Aplicación de los métodos matemáticos para intensificar etapas con reacción química y ampliar la capacidad instalada de una industria.

La fábrica estudiada se organizó a finales de los años sesenta en base a la unificación de dos fábricas. En los años setenta se ejecutó un proceso inversionista que resolvió problemas relacionados con la contaminación ambiental y la capacidad de almacenamiento del producto terminado, pero no alcanzó los niveles de producción planificados. Los objetivos de esta investigación fueron: lograr incrementos de los niveles de producción que permitan hacer rentable la inversión realizada y promover tareas de reconstrucción de la instalación que incluyan la modernización y ampliación de su capacidad instalada. El estudio incluyó en la primera fase la determinación de la etapa limitante de la capacidad de producción, que corresponde a la etapa con reacción química. Siendo el

proceso de vulcanización no sólo determinante para la capacidad de la planta, sino también decisivo en la calidad del neumático recapado y los consumos de portadores energéticos, se realizó una investigación para determinar el efecto de cada una de las variables que pueden decidir tecnológicamente en cada etapa, mediante un diseño experimental 2⁴.

Los resultados de este experimento confirmaron que la temperatura y el tiempo de vulcanización son los parámetros que determinan el proceso, por lo que se realizó un experimento para obtener la expresión de la ecuación de la Velocidad de Reacción a diferentes temperaturas. El estudio realizado permitió determinar el efecto del incremento de la temperatura en la disminución de los tiempos de reacción por espesor de Camelback para la Cura Rápida y para la Cura Convencional. Esto permitió elevar la producción de la Planta de forma estable, alcanzando una cifra récord de producción para un día de 297 neumáticos, muy superior a los 192 neumáticos de capacidad de diseño. El incremento de la temperatura de operación permite ahorros de consumo de portadores energéticos.

El paso posterior, intensificación de la planta, fue un proceso inversionista para incrementar la capacidad instalada realizado en 1984, después del cual se procedió a optimizar el Plan de Promoción Operativo de la planta de acuerdo con la recolección de neumáticos para recapar y la disponibilidad técnica de los equipos. El análisis del problema se realizó a través de un balance de cargas y capacidades de las cuatro etapas del proceso de recape.

La disponibilidad de tiempo de producción de los equipos y la cantidad de neumáticos disponibles por tipo se determinó mediante una función probabilística desarrollada por TOURE BINKO. Finalmente se estudió el Efecto Económico de incrementar la fiabilidad del equipamiento con vista a aumentar la disponibilidad del proceso tecnológico y además pasar a un régimen de producción ininterrumpida durante todos los días de la semana. Para lo cual se calculó la inversión en un taller de mantenimiento por valor de 118 000 pesos, lo que para un Coeficiente de Recuperación de la Inversión de 0,125 representa un efecto anual de 9 452,00.

- Aplicación de los métodos matemáticos en un caso de alto deterioro del estado técnico de la instalación.

La planta estudiada inició sus trabajos en 1980, empleando como materia prima el cloruro de sodio y obteniendo por vía electrolítica sosa cáustica y cloro líquido. El elemento más importante de la instalación es la etapa de electrólisis con 14 celdas de cátodos de mercurio y ánodos metálicos de Titanio, después de la cual la

sosa cáustica y el cloro obtenido reciben un proceso de beneficio.

En su operación la planta ha presentado problemas con el alto nivel de hidrógeno de cloro, lo que afecta la seguridad de su operación (por peligro de explosión), y ocasiona un bajo rendimiento productivo de cloro y sosa cáustica por día de producción y cantidad de materias primas procesadas, con incidencia en la eficiencia económica de la instalación por inestabilidad y días fuera de operación.

En la investigación se tuvo como objetivos: determinar las condiciones para poder operar la planta con niveles aceptables de hidrógeno en cloro, eliminando los riesgos de operación y las interrupciones de la planta por esa causa, determinar las condiciones de las materias primas y estado técnico de la instalación que permiten elevar la producción y el rendimiento de recursos materiales y determinar los factores que inciden en la eficiencia económica de la instalación y encontrar vías para su incremento.

Se decidió como primer paso en el estudio analizar las celdas electrolíticas desde el doble aspecto de su estado técnico y el efecto que sobre su funcionamiento tiene la calidad de las materias primas, por lo que a diferencia de otros análisis complejos la investigación se concentró inicialmente en esta etapa, aunque desde un enfoque multilateral. Aquí también se descansa en el tratamiento estadístico de la información del control del proceso. El segundo aspecto fue el estudio de la Eficiencia Electrolítica, que según la literatura puede estar afectada por impurezas metálicas, para ello se realizó una investigación a nivel industrial controlando la eficiencia electrolítica y el porcentaje de hidrógeno en cloro como variables de respuesta y el contenido de magnesio, hierro y de otras impurezas metálicas, así como el pH de la Salmuera y la densidad de corriente en las celdas como variables de entrada al sistema.

Los resultados experimentales se procesaron mediante Análisis de Regresión Múltiple con ayuda del programa STEPWISE disponible en el Instituto de Informática de la Universidad Central de Las Villas. Aquí se hizo evidente la influencia de la calidad de la sal en la Eficiencia Electrolítica y el nivel de hidrógeno en Cloro, pero también los parámetros vinculados a la operación de las celdas, por lo que se decidió realizar un estudio global sobre todos los factores que inciden en la producción de cloro y sosa cáustica en la planta con la ayuda del modelo matemático del proceso principal de la instalación, es decir omitiendo el estudio y modelación de las etapas de tratamiento de cloro o la de síntesis de ácido clorhídrico.

En la modelación del proceso tecnológico se incluyen las 6 etapas a las que se redujo el proceso en su síntesis obteniéndose un modelo global de forma matricial que incluye entre los parámetros de respuesta el porcentaje de pureza del cloro y la producción por hora. Con estos modelos se pueden determinar las condiciones de operación para obtener un mínimo de nivel de Hidrógeno en Cloro mediante la utilización de la ecuación de este parámetro como función objetivo y manteniendo el resto como restricciones del Simplex.

El estudio para la intensificación del proceso se completó a través del análisis de la fiabilidad del proceso, la que, debido a la pérdida de la Vida Útil de varios sistemas de bombeo disminuye rápidamente por debajo de un 50 % para toda la instalación, lo que puede mejorarse mediante la reposición de algunos equipos y el incremento de la calidad del mantenimiento. Aquí se incluyó un reajuste de la planificación de mantenimiento de la industria y se previó en la inversión la reposición de los sistemas que perdieron su Vida Útil. Como resultados:

- Se elaboró un procedimiento normalizativo para el control del estado técnico y la calidad de las reparaciones de las celdas electrolíticas.
- Se determinó la eficiencia electrolítica y la capacidad real alcanzable en la instalación.
- Se determinaron las condiciones de operación para minimizar el porcentaje de Hidrógeno en Cloro e incrementar la seguridad operacional de la planta.
- Se elaboraron un conjunto de medidas para incrementar la disponibilidad de la instalación y operarla en condiciones óptimas, con un Efecto Económico de más de 120.000 pesos anuales.
- Aplicación de los métodos matemáticos para el cambio de tecnología de un proceso de la industria química.

El combinado textil de tecnología japonesa fue puesto en marcha en 1980 y se caracterizó desde sus inicios por un alto consumo energético y de materias primas importadas en divisas. El taller de blanqueo trabaja con diferentes tipos de tejidos (algodón, poliéster algodón y poliéster viscosas) en tres líneas paralelas. La instalación tiene un consumo anual de $4,3 \times 10^6$ USD en materias primas y gastos de portadores energéticos por $7,53 \times 10^5$ USD. Por ello un objetivo decisivo para el Análisis de Procesos fue la reducción del consumo de materias primas importadas con vistas a lograr el aseguramiento de la calidad requerida en los productos destinados a la exportación. La etapa de profundización científica estuvo encaminado a la determinación de los puntos débiles del proceso y a la búsqueda

de vías para la intensificación. En realidad se encontraron dos alternativas:

- a) Optimizar los parámetros de la tecnología importada con objetivos acordes con las nuevas condiciones a las cuales tiene que trabajar.
- b) Adaptación del equipamiento a las nuevas tecnologías que trabajen fundamentalmente con materias primas. Para ello se decidió investigar paralelamente ambas alternativas como estrategia de intensificación a través de lo cual el resultado final tiene el carácter de decisión contenida en el análisis de evaluación de alternativas.

Para la intensificación se analizaron experimentos a escala de laboratorio para determinar los parámetros que deben extrapolarse industrialmente. La parte experimental incluyó investigaciones de laboratorio de los pasos fundamentales de esas tecnologías para lo cual se elaboró un diseño experimental ²³ para la etapa de chamuscado, para lo cual se tomó en cuenta el efecto de la velocidad de la máquina y de la presión del gas a la entrada del quemador, así como las variables que caracterizan el chamuscado como parámetros de respuesta. El funcionamiento óptimo de la instalación se determinó mediante la minimización de los costos de producción los que se calculan de los consumos de materiales y productos químicos; como restricciones se utilizaron los modelos lineales obtenidos de la agregación de las etapas explicadas. En la obtención de una segunda alternativa de blanqueo se realizaron experimentos mediante el método del paso ascendente para determinar los valores en condiciones óptimas de los factores que inciden en la etapa. Se comenzó con un diseño factorial ²⁴ que incluyó los factores siguientes: La concentración de cloro activo, el tiempo de tratamiento con vapor, la concentración de silicato de sodio y de ácido sulfúrico.

En un segundo plan experimental se relacionó el mejor rango determinado en el experimento anterior con el efecto de dos nuevos factores: concentración de humectante (3 - 6 g/L) y la temperatura del vapor (25 - 40 °C) variándose mediante un diseño ²³ el tiempo de tratamiento con vapor (15 - 50 minutos). La determinación del valor de las variables para las condiciones óptimas se realizó con ayuda de un diseño factorial compuesto con ocho ensayos en el centro con el cual se obtuvieron modelos para cada una de las 6 variables independientes.

Los modelos del sistema se optimizaron mediante un método de poli-optimización. Para el blanqueo de tejidos de algodón se implementó el mismo procedimiento, pero partiendo de los mejores resultados en el blanqueo del poliéster-algodón y siguiendo una estrategia de reducción progresiva de peróxido de hidrógeno hasta su

completa eliminación. El estudio del proceso de blanqueo de poliéster viscosa se realizó por medio de un diseño factorial 2^4 con el mismo procedimiento, el cual incluyó la utilización de carbonato de sodio de producción nacional. El diseño se completó con un Plan Rotacional Central que permitió fijar los valores deseados en la etapa des-encolado y un diseño 2^2 para la etapa de termofijación. Se obtuvo como resultados: 200 000 USD anuales por el ahorro de portadores energéticos y 30 000 USD anuales por la utilización del carbonato de sodio de producción nacional.

- Aplicación de los métodos matemáticos para el caso en que se desarrollan nuevos equipos en la industria cerámica.

La producción de cerámica en Cuba incluye las producciones de vajillas, artículos de uso social, artístico, ornamental y la industrial o técnica. Estas producciones se desarrollaron en un proceso acelerado de inversiones pequeñas, medianas y grandes las que se diferenciaron fundamentalmente en que las pequeñas y medianas se ejecutaron con esfuerzos propios, a partir de proyectos y equipos de producción nacional y las grandes mediante la importación de tecnologías.

El desarrollo se planificó originalmente sin un análisis técnico-económico multilateral que consideró solamente la disponibilidad de recursos minerales de las diferentes regiones, lo que lo hizo propenso a errores que no solamente afectaron su concepción inicial, sino que, en muchos casos, comprometieron el proceso de maduración y la eficiencia técnico-económica del mismo. Además, con el desarrollo de la de Cerámica Fina se incrementan y diversifican los volúmenes de producción y con ello el surgimiento de nuevos problemas, como son: la necesidad de seleccionar mejores esquemas y escalas de capacidades tecnológicas, de disminuir los consumos energéticos, la selección adecuada del equipamiento y su diseño, considerando las posibilidades de construcción nacional y las importaciones para la modernización, ampliación y creación de nuevas capacidades. Para la intensificación de la Industria Cerámica Cubana requirió de trabajar en dos direcciones principales:

a) El problema energético, mediante la evaluación de los equipos existentes y el desarrollo de nuevas alternativas.

b) Las materias primas y su influencia en los surtidos, los esquemas de producción, y capacidades de los equipos.

En la industria cerámica tienen gran importancia los balances de calor en el horno por ser el equipo donde se emplea gran parte de la energía requerida para la fabricación. El cálculo de las pérdidas y la aplicación de los balances permiten la evaluación de los equipos en

funcionamiento y el desarrollo de nuevos proyectos o alternativas de hornos. En general podemos establecer tres grandes grupos de desarrollo como son los hornos cámaras de solera fija, los hornos gavetas de solera móvil (Gavetas) y los hornos túneles. Desde el punto de vista energético estas mejoras e innovaciones tienden a elevar el rendimiento energético de las distintas operaciones. Las líneas de actuación para la disminución del consumo energético se pueden resumir en:

- Disminuir los calores de reacción.
- Reducir los niveles de temperatura utilizados.
- Acortar la duración de las operaciones.
- Disminuir la pérdida de calor y consumo en la masa muerta.
- Mejorar la calidad de los productos finales.

Las tareas realizadas para el perfeccionamiento energético y tecnológico de la industria cerámica fueron:

- Balance y evaluación energética de los hornos cámaras actualmente en explotación.
- Proyecto, construcción y evaluación energética de un horno cámara de nuevo diseño.
- Proyecto, construcción y evaluación energética de un horno gaveta como alternativa energética y tecnológica.
- Proyecto, construcción y evaluación energética de un horno túnel como alternativa energética y tecnológica.
- Evaluación de alternativas para la creación de capacidades en la Industria Cerámica.

Como resultados se obtuvieron:

- Se lograron ahorros de portadores energéticos de más de 800.000 USD anuales en la instalación estudiada como base en la investigación.
- Se dieron soluciones técnico-económicas para incrementar las capacidades instaladas en más de un 12% anual sin grandes desembolsos en USD.
- Se logró una estrategia científicamente fundamentada para la intensificación tecnológica y energética de la Industria Cerámica.

CONCLUSIONES

En las condiciones actuales se ha requerido, para la asimilación y desarrollo de nuevas tecnologías, una gran demanda de información que solo ha sido posible procesar gracias a los modernos métodos matemáticos de investigación.

La Programación Lineal ha sido una herramienta versátil para resolver los problemas de incertidumbre en los procesos de la industria química, pero requiere de otros métodos matemáticos como complemento de su uso.

La formación en la utilización práctica y sistemática de las herramientas matemáticas es un rasgo distintivo de la época en lo referente a la formación de pregrado y postgrado del Ingeniero Químico.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cortés Martínez, R. (2019) Intensificación de la neutralización con sosa cáustica en la unidad de fraccionamiento de gases en refinerías de petróleo. (Tesis de Maestría). Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- Díaz López, F.J., & Montalvo, C. (2015). A comprehensive review of the evolving and cumulative nature of eco-innovation in the chemical industry. *Journal of Cleaner Production*, 102, 30-43. _
- Fleites Ávila, Y., Martí Marcelo, C.A., Albernas Carvajal, Y., Miño Valdés, J.E., & González Suárez, E. (2020). Experiencias de las aplicaciones de la programación lineal en la industria de procesos químicos en Cuba. *Centro Azúcar*, 47(4), 99-102. _
- González, E. & Rabasa, G. (2012). El Análisis Complejo de Procesos. Su lugar en la Industria Química Actual. *Centro Azúcar*, 39(1), 33-39.
- González, E., Miño, J. E., & Cortés, R. (2020). Métodos Matemáticos en la Estrategia de Procesos para la Solución de Problemas en la Industria Química. Editorial Universidad Nacional de Misiones (UNaM).
- González, I., Rabasa, G., Pérez, A., González, E., & Castro, E. (2016). Herramienta para apoyar la toma de decisiones en el desarrollo de biorrefinerías. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 15(3), 943-951.
- Hájek, P. & Stejskal, J. (2018). R&D Cooperation and Knowledge Spillover Effects for Sustainable Business Innovation in the Chemical Industry. *Sustainability*, 10(4), 1064-1083.
- Luciano, G., & Svoboda, R. (2019). Activation Energy Determination in Case of Independent Complex Kinetic Processes. *Processes* 2019, 7(10).
- Mamade Toure, B, González Suárez, E., Curbelo, Sánchez A., Peralta Suárez, L.M., & Miño Valdés, J.E., (2017). Herramientas de investigación para incrementar el impacto de la ciencia en la industria química *Revista Científica de la UCSA*, 4(2), 67-77. _
- Mao, Z., & Campbell, C.T. (2019). Apparent Activation Energies in Complex Reaction Mechanisms: A Simple Relationship via Degrees of Rate Control. *ACS Catal*, 9(10), 9465-9473.
- Maußner, J., & Freund, H. (2018). Optimization under uncertainty in chemical engineering: Comparative evaluation of unscented transformation methods and cubature rules. *Chemical Engineering Science*, 183, 329-345. _
- Miró Pérez, A. (2017). Productividad, Eficiencia Técnica e Internacionalización del Sector Química español 2007-2011. (Tesis Doctoral). Universitat de Vic-Universitat Central de Catalunya.
- Pérez, O., Miño, J. E., García, A., & González, E. (2019). Fermentative Kinetic Modelling for Protein Biomass from Sugar Diversification. *Curr Trends Biomedical Engineering and Biosciences*, 18(5), 99-102. _
- Ramos Miranda, F.E. (2014). Metodología de evaluación para la conversión de fábricas de azúcar a biorrefinerías mediante lógica difusa. (Tesis Doctoral). Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- Vasudev, V., Ku, X., & Lin, J. (2019). Kinetic study and pyrolysis characteristics of algal and lignocellulosic biomasses. *Bioresource Technology*, 288, 121496. _