

---

Presentado en el XVII Taller Internacional de "Formación de posgrado para un desarrollo sostenible"

Artículo científico

## Herramientas investigativas para aplicar en la formación de doctores de la industria química

### Research tools to be applied in the training of doctors in the chemical industry

**Erenio González Suárez**<sup>1</sup>  0000-0001-5741-8959  [erenio@uclv.edu](mailto:erenio@uclv.edu)

**Diana Niurka Concepción Toledo**<sup>1</sup>  0000-0002-4432-140X  [dianac@uclv.edu.cu](mailto:dianac@uclv.edu.cu)

**Eduardo Julio López Bastida**<sup>2</sup>  0000-0003-1305-852X  [kuten@ucf.edu.cu](mailto:kuten@ucf.edu.cu)

<sup>1</sup> Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Santa Clara, Cuba.

<sup>2</sup> Universidad de Cienfuegos "Carlos Rafael Rodríguez". Cienfuegos, Cuba.

**Recibido:** 19/01/2025

**Aceptado:** 30/04/2025

---

#### RESUMEN

Las demandas de la práctica productiva en las empresas y su propio desarrollo prospectivo fueron consideradas como el fundamento de muchas de las investigaciones científicas, lo que justificó la necesidad y posibilidad en la industria, de realizarlas desde su propio seno y en su beneficio. A partir de experiencias propias, se hizo un registro de herramientas de investigación que incluyeron métodos matemáticos, empleados por el personal de instalaciones de la industria química durante la formación doctoral. El objetivo consistió en presentar la experiencia adquirida, herramientas y métodos, durante la formación doctoral cuya génesis en sus temas de investigaciones fueron problemas de las empresas. Se incluyó el uso de los diagramas heurísticos, el procesamiento estadístico de datos industriales, el diseño de experimentos, la integración, modelación y optimización de procesos, a través de los modernos métodos cibernéticos. Se concluyó que en la escuela de formación de doctores para los especialistas de la industria, del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, los diagramas heurísticos y su combinación con los

---

métodos matemáticos fueron un rasgo común distintivo en la metodología utilizada, al enfrentar las tareas demandadas para el desarrollo empresarial de la industria de procesos químicos.

**Palabras clave:** herramientas y métodos científicos; formación doctoral; relación universidad-empresa.

---

## ABSTRACT

The demands of the productive practice in the companies and their own prospective development were considered as the basis of many of the scientific researches, which justified the need and possibility in the industry, to carry them out from its own bosom and for its benefit. Based on their own experiences, a record was made of research tools, including mathematical methods, used by the personnel of chemical industry facilities during their doctoral training. The objective was to present the acquired experience, tools and methods, during the doctoral training whose genesis in their research topics were company problems. It included the use of heuristic diagrams, statistical processing of industrial data, design of experiments, integration, modeling and optimization of processes, through modern cybernetic methods. It was concluded that in the doctoral training school for industry specialists, of the Chemical Engineering Department of the Central University "Marta Abreu" of Las Villas, heuristic diagrams and their combination with mathematical methods were a distinctive common feature in the methodology used, when facing the tasks demanded for the entrepreneurial development of the chemical process industry.

**Keywords:** scientific tools and methods; doctoral training; university-industry relationship.

---

## INTRODUCCIÓN

Entre los conocimientos que necesita apropiarse el sector industrial para su desarrollo, se destacan los métodos científicos de trabajo, donde las herramientas y métodos matemáticos son sin duda instrumentos especialmente útiles. Esto favorece el trabajo en equipos interdisciplinarios y conduce a la producción, el intercambio y la aplicación de conocimientos con un enfoque sistémico e interdisciplinar, a partir del aporte individual, la creatividad y el consenso colectivo para la toma de decisiones (González *et al.*, 2022).

Un aspecto que se considera clave para la introducción de las ciencias en las industrias de procesos químicos y fermentativos es la presencia de científicos en el sector empresarial desde su formación, por lo que este trabajo tuvo como objetivo presentar la experiencia adquirida, herramientas y métodos, durante la formación doctoral cuya génesis en sus temas de investigaciones fueron problemas de las empresas.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

Se incluyó el uso de los diagramas heurísticos, el procesamiento estadístico de datos industriales, el diseño de experimentos, la integración, modelación y optimización de procesos, todo sobre la concepción de modernos métodos cibernéticos.

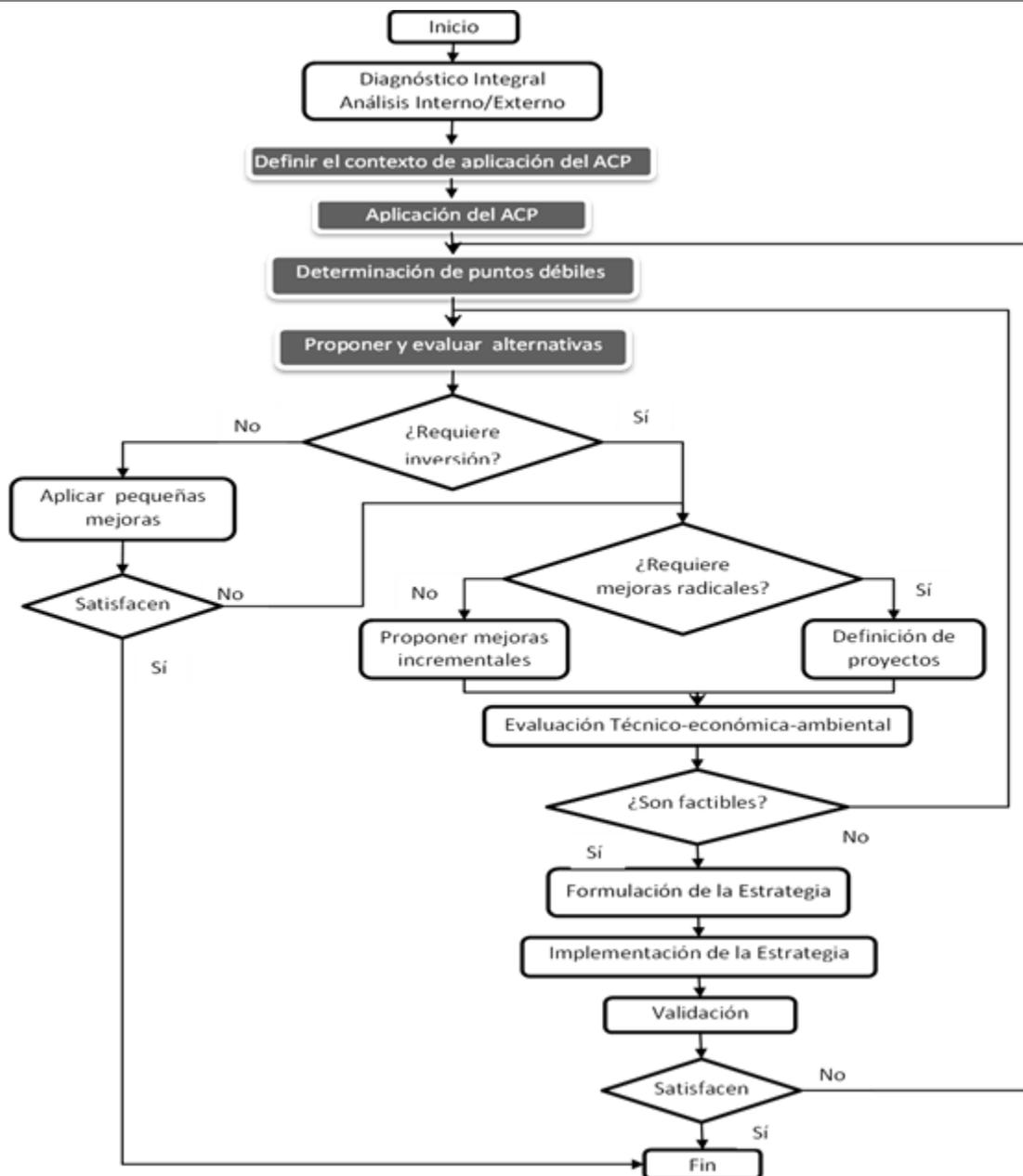
El tema abordado se trató desde las experiencias en tesis, como resultado de la formación de doctores en Ingeniería Química, realizadas por científicos de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas que laboraron como profesionales en la industria al momento de realizarlas.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En el estudio, se consideró que esta necesidad del desarrollo, se integró con los métodos cibernéticos que se concretaron en la industria de procesos químicos, a través de los análisis de procesos que incluyeron estudios de redes de calor (Bonachea *et al.*, 2021).

### **Los diagramas heurísticos**

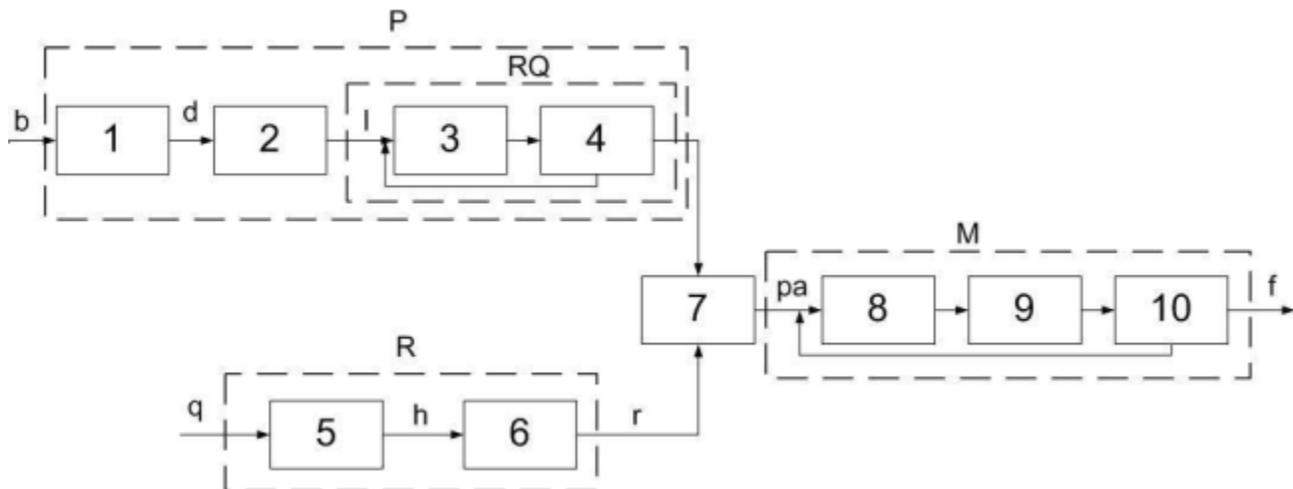
Una herramienta de uso general en los análisis de procesos estudiados fue los diagramas heurísticos que permitieron, desde los primeros pasos, ordenar la estrategia investigativa para alcanzar los objetivos propuestos en la complejidad de estudios multilaterales, dirigidos a lograr resultados concretos con rapidez y gasto mínimo de recursos humanos, financieros y materiales, lo que constituyó una impronta de las investigaciones y la formación de recursos humanos desde el esfuerzo de profesionales que laboraron en las empresas. Resaltó, entre otros, el aplicado por Guzmán *et al.* (2019) en su estudio doctoral en ciencias técnicas (Figura 1).



**Figura 1.** Diagrama heurístico para la gestión de tecnología e innovación, integrada al análisis complejo de procesos (Guzmán *et al.*, 2019)

Los modelos de procesos industriales, sobre la base del procesamiento estadístico de los datos de control del proceso instalado, como una herramienta de trabajo en el análisis e intensificación del proceso fueron utilizados por González (1982) en un estudio que tributó a las ciencias técnicas, como la modelación y optimización de un proceso tecnológico sobre la producción de cartón para ondular, mediante la modelación matemática de todo el sistema se logró la interrelación global de la calidad

de las materias primas, las variables de operación inherentes a cada elemento del sistema en los parámetros económicos, y la calidad en el producto final del proceso (Figura 2).



**Figura 2.** Diagrama del proceso tecnológico de Papelera Damují

La metodología empleada en el proceso, se fundamentó en la modelación estadística de los elementos del sistema y su posterior agregación, mediante el método matricial para el caso en el cual no hay reciclos, y si hay, una etapa de mezcla en cuyo caso los diseños de experimentos para mezclas fueron determinantes en la representación y optimización del sistema (González & González, 1985).

De idéntico recurso, se valió González (2008) en su investigación doctoral sobre Estrategia de reconversión de una instalación de la industria química, desde las en ciencias técnicas. Se realizó un estudio global sobre todos los factores que incidieron en la producción de cloro y sosa cáustica en la planta, con la ayuda del modelo matemático del proceso principal de la instalación. En la modelación del proceso tecnológico, se incluyeron las seis etapas a las que se redujo el proceso en su síntesis (Ruiz *et al.*, 1992).

Los modelos de las etapas se elaboraron a partir de los datos del control operacional del proceso, desde las premisas vinculadas a la confiabilidad de los datos y la representatividad de la muestra de la población en estudio. Esto permitió obtener un modelo global matricial que incluyó en los parámetros de respuesta el porcentaje de pureza del cloro y la producción por hora, de manera que se encontró un sistema de ecuaciones descrito por Kafarov (1976) (Ecuaciones 1 y 2).

$$[C_1] \begin{bmatrix} Y_{10} \\ Y_{11} \\ \vdots \\ Y_{n-1} \\ Y_n \end{bmatrix} + [B_1] \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_{21} \\ X_9 \\ 1 \end{bmatrix} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} Y_{16} \\ Y_{17} \\ \vdots \\ Y_{47} \end{bmatrix} [C_2] \begin{bmatrix} Y_{10} \\ Y_{11} \\ \vdots \\ Y_{n-1} \\ Y_n \end{bmatrix} + [B_2] \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_{21} \\ X_9 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

En ambos casos, a través de la ecuación general del costo de producción y con ayuda de la expresión de la eficiencia tecnológica de cada caso, se logró desarrollar una función lineal del costo de producción, en función de las variables tecnológicas lo que permitió aplicar el simplex con la función de costo y ganancia.

### Modelos de procesos industriales

Sobre la base del análisis fenomenológico de etapas del proceso instalado, como una herramienta de trabajo en el análisis e intensificación, en los casos en los que hay reacciones químicas, González (1991) reportó la intensificación de la producción de una Planta de Recape (Recauchado) de neumáticos, la estrategia elaborada incluyó en la primera fase, la determinación y estudio de la cinética de la reacción (González & Otero, 1983) de la etapa limitante de la capacidad de producción, que correspondió a la etapa con reacción química.

El proceso de vulcanización no solo fue determinante para la capacidad de la planta, sino también en la calidad del neumático recapado y los consumos de portadores energéticos, se realizó una investigación mediante un modelo fenomenológico de la etapa de vulcanización que incluyó el comportamiento del equipo donde ocurre el proceso. El experimento se realizó a escala industrial para calcular la energía de activación y el tiempo de cura por espesor de Camelback para cada temperatura de trabajo y se propuso una expresión de la forma (Ecuación 3).

$$v_r = K_o e^{-E/RT} C_a^m C_e^n \quad (3)$$

Donde:

Ca: Concentración de Azufre

Ce: Concentración de Caucho

Ko: Constante específica de la velocidad de reacción

E: Energía de activación

El estudio posibilitó elevar la producción de la planta de forma estable, hasta alcanzar una cifra récord de producción de 297 neumáticos para un día, muy superior a los 192 neumáticos de capacidad de diseño.

En tanto Martí (2020) en su estudio sobre la modelación cinética y optimización del añejamiento en la industria ronera cubana, aplicados al Ron Cubay incluyó los estudios cinéticos para la intensificación de su producción (Martí *et al.*, 2019). El modelo de reacción propuesto contempló la oxidación de etanol (A) a acetaldehído (B) y luego este a ácido acético (C) como reacciones en serie o consecutivas, mientras que la esterificación de etanol y el ácido acético para formar acetato de etilo (D), donde "K", representó los valores de la constante de reacción para cada ecuación estequiométrica.

Las expresiones de velocidad se definieron como se muestra en las siguientes ecuaciones, las cuales se determinaron a partir de un balance de masa en estado no estacionario, lo que se consideró un aporte teórico de la investigación (Ecuaciones 4, 5, 6 y 7).

$$\frac{dCA}{dt} = k_1CA + k_3CA \quad (4)$$

$$\frac{dCB}{dt} = k_1CA - k_2 \quad (5)$$

$$\frac{dCC}{dt} = k_2CB - k_3CA \times CC + k_4CD \quad (6)$$

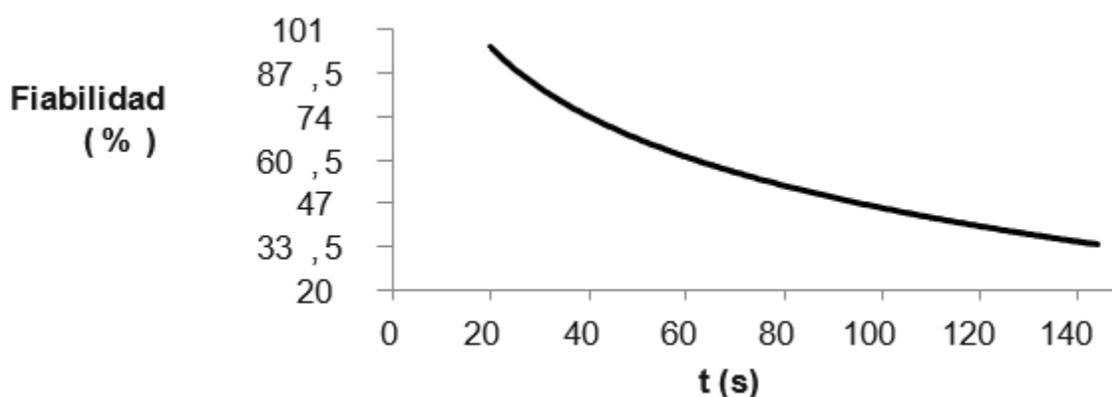
$$\frac{dCD}{dt} = k_3CA \times CC - k_4CD \quad (7)$$

### Los balances de materiales, energía y el tratamiento estadístico de los datos disponibles

Un recurso de indudable fuerza en las investigaciones industriales es el tratamiento estadístico de los resultados del control del propio proceso industrial, pues estos no solo engendran productos, sino

información, la que bien procesada genera conocimientos. Por lo tanto, del control del proceso industrial se obtuvieron resultados desde la etapa exploratoria de una investigación, por ejemplo:

En la investigación doctoral de González (2008) sobre la intensificación del proceso, esta se completó a través del análisis de la fiabilidad, la que debido a la pérdida de la vida útil de varios sistemas disminuyó rápidamente por debajo de un 50 % para toda la instalación (Figura 3), lo que pudo 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.



**Figura 3.** Variación de la fiabilidad de la instalación con el tiempo

### **La planificación experimental y sus aplicaciones en las experiencias de formación de doctores desde la industria**

Los métodos tradicionales de experimentación implican un considerable esfuerzo, tiempo y recursos para su ejecución, elevan los costos de los resultados investigativos, sobre todo si son necesarios realizarlos a nivel de planta piloto o industrial. En concordancia con el objetivo de la investigación se necesitó obtener información sobre el fenómeno estudiado, para después actuar sobre el mismo, y pudo definirse la eficiencia de la investigación como la cantidad de información útil obtenida por unidad de costo, por consiguiente, fue extremadamente importante utilizar métodos experimentales que brindaron la máxima cantidad de información con el menor costo y esfuerzo.

El uso del diseño estadístico de experimento facilitó un incremento apreciable en la productividad de los investigadores, así como la confiabilidad de los resultados obtenidos, estos métodos por su naturaleza universal fueron aplicables en la mayoría de los campos de investigación y significaron una contribución a la optimización de la experimentación.

La idea de que un experimento se puede diseñar es de tiempos antiguos, sin embargo, solo a principios del presente siglo, se introdujeron los métodos estadísticos de diseño de experimentos. En la década de los años cincuenta, se inició una nueva etapa en los trabajos de diseño de experimentos encaminado a encontrar las condiciones óptimas (Box & Wilson, 1951).

Los planes experimentales (diseño de experimentos) en investigaciones de procesos industriales, se realizaron con el objetivo de obtener resultados investigativos, y resolver problemas específicos en instalaciones existentes que permitieron la obtención de un grado científico. Fueron utilizados por:

Garcés en su estudio sobre la intensificación de los procesos tecnológicos de producción de cerámica técnica reportó un estudio para la determinación de la mejor composición de la mezcla de materiales en la producción de cerámica para aisladores (Garcés *et al.*, (1995); en tanto, Borges (1995) al profundizar sobre las alternativas de utilización de las materias primas para la producción de vidrio en la empresa de las tunas reportó el estudio para la determinación del porcentaje permisible de vidrio roto en la minimización de los consumos de combustible en un horno (Borges *et al.*, 1995).

Alemán (2023) propuso una estrategia inversionista, considerado incertidumbre, para garantizar la producción de líquido asfáltico en la refinería de Cabaigüan, donde aplicó un diseño de Plackett-Bürman acorde con el modo propuesto por Isaccson (1970), con el procedimiento para minimizar los costos y el plazo de inversión en una refinería de petróleo (Alemán *et al.*, 2022).

Los diagramas heurísticos fueron un rasgo común en la metodología para enfrentar las tareas que demanda el desarrollo empresarial de la industria de procesos químicos. Un rasgo distintivo aportado por la escuela de formación de doctores del Departamento de Ingeniería Química para los especialistas de la industria fue la combinación de los diagramas heurísticos con los métodos matemáticos.

El Programa de doctorado de Ingeniería Química de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas respaldó los procesos doctorales esencialmente, con los métodos de investigación con énfasis en los heurísticos y las herramientas matemáticas, así como la exigencia en el cumplimiento de los plazos y la calidad de la investigación.

La formación de doctores desde la industria puede ser un arma poderosa para la introducción de los resultados de la ciencia y la tecnología.

Es adecuado y útil trabajar con directivos de las empresas, dando respuesta a las necesidades de formar no solo doctores en la industria, sino también favoreciendo su formación como una vía de transmitir el método científico a la producción.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alemán Hurtado, L. (2023). *Estrategia inversionista, considerando incertidumbre, para garantizar la producción de líquido asfáltico en la Refinería de Cabaiguán*. (Tesis doctoral). Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

Alemán Hurtado, L., Muto Lubota, D., González Suárez, E., & Hernández Rodríguez, C. B. (2022). Procedimiento para minimizar costos e prazo de investimento em uma refinaria de petróleo. *Universidade y Sociedad*, 14(3), 373-381.  
[http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2218-36202022000300373&lng=es&lng=pt](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202022000300373&lng=es&lng=pt)

Bonachea Crespo, M., Hernández Touset, J. P., & Pérez Navarro, O. (2021). Análisis y diseño de la red de intercambiadores de calor en una refinería de petróleo. *Universidade y Sociedad*, 13(S3), 584-591. <https://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus/article/view/2524>

Borges Núñez, A. (1995). *Alternativas de utilización de las materias primas para la producción de vidrio en la Empresa de Vidrio de Las Tunas*. (Tesis doctoral). Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

Borges, A., González, N. & Regalado, J. (1995). Determinación del porcentaje permisible de vidrio roto en la minimización de los consumos de combustible en un horno de vidrio. *Centro Azúcar*. 22(3).

Box, G. E. & Wilson, K. B., (1951). On the Experimental Design Attainment of optimum Condition. *Journal Rev. Stat. Soc.* 13(1). [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4612-4380-9\\_23](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4612-4380-9_23)

Garcés Cruz, E., González, N., & Regalado, J. (1995). Determinación de la mejor composición de la mezcla para la producción de materiales en la producción de cerámica para aisladores. *Centro Azúcar*. 22(3), 65-73.

- González Suárez, E. (1982). *Modelación y optimización de un proceso tecnológico para la producción de cartón para ondular*. (Tesis doctoral). Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- González Suárez, E. (1991). *Utilización del análisis de procesos en la intensificación de la producción en distintas industrias de Cuba*. (Tesis de doctor en Ciencias). Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- González Suárez, E., & Otero Rojas, J. (1983). Determinación de un modelo preliminar en la ecuación de la velocidad de reacción de vulcanización durante el recape. *Tecnología Química*. 4(1-4), 191-208.
- González Suárez, E., Concepción Toledo, D. N., Pérez Navarro, O., de Armas Martínez, A. C., & Ramos Miranda, F. E. (2022). Investigación y postgrado en agroindustrias en el vínculo universidad empresa para apoyar al desarrollo local. *Universidad y Sociedad*, 14(6), 608-616. [https://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2218-36202022000600608&lng=es&tlng=es](https://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2218-36202022000600608&lng=es&tlng=es)
- González Suárez, E., & González Rodríguez, V. (1985). Uso combinado del Simplex y la técnica de Fibonacci en la optimización económica de un proceso tecnológico de producción de cartoncillo. *Tecnología Química*. 4(4). 53-64.
- González, N. (2008). *Estrategia de reconversión de una instalación de la industria química*. (Tesis doctoral). Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- Guzmán, M., González, E., & Morales, M. (2019). *Metodología para gestionar la innovación tecnológica con integración de análisis complejo de procesos en la industria ronera cubana*. (Tesis doctoral). Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.
- Isaccson, W. B. (1970). Statistical Analyses for Multivariable Systems. *Chem Eng.*, (6), 69-75.
- Kafarov, V. (1976). *Cybernetic methods in Chemistry and Chemical Engineering*. Moscow: MIR. [https://books.google.com.cu/books/about/Cybernetic\\_Methods\\_in\\_Chemistry\\_Chemical.htm?id=nEtHAQAAIAAJ&redir\\_esc=y](https://books.google.com.cu/books/about/Cybernetic_Methods_in_Chemistry_Chemical.htm?id=nEtHAQAAIAAJ&redir_esc=y)

Martí Marcelo, C. A. (2020). *Modelación Cinética y Optimización del Añejamiento en la Industria Ronera Cubana aplicados al Ron Cubay*. (Tesis doctoral). Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas.

Martí Marcelo, C. A., Fabelo Falcón, J. A, González Suárez, E., & Rodríguez Padrón, Y. (2019). Metodología para la obtención de los modelos cinéticos de reacciones complejas en añejamientos de bebidas espirituosas. *Afinidad*, 77(589), 587-590.  
<https://www.raco.cat/index.php/afinidad/article/view/367902>

Ruiz Ruiz, M., Águila Castro, L., González Suárez, E. & González, N. (1992). Condiciones para la ganancia óptima en una Planta de Cloro y Sosa. *Tecnología Química*, 13(2), 37-40.

### Conflicto de intereses

Los autores declaran no tener conflictos de intereses.

### Contribución de los autores

Todos los autores revisaron la redacción del manuscrito y aprueban la versión finalmente remitida.



Esta obra está bajo una licencia Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional