

# EMPLEO DE FUENTES RENOVABLES DE ENERGÍA Y MÉTODOS DE INTEGRACIÓN DE PROCESOS EN LA INDUSTRIA LÁCTEA

Ing. Eliany de la Caridad Valera Sterling\* y Dr. C. Eduardo García Noa\*\*

\*Centro de Gestión de la Información y Desarrollo de la Energía, Cubaenergía, La Habana, Cuba.

<https://orcid.org/0000-0002-6655-5637>

E-mail: [sterling@cubaenergia.cu](mailto:sterling@cubaenergia.cu)

\*\*Universidad Tecnológica de La Habana José Antonio Echeverría, Cujae, La Habana. Cuba

<https://orcid.org/0000-0002-6634-9219>

E-mail: [egarcianoa@quimica.cujae.edu.cu](mailto:egarcianoa@quimica.cujae.edu.cu)

## Resumen

La Integración de Procesos ha sido reconocida como un campo de investigación activo en la industria de procesos lácteos, químicos y de alimentos, y los Métodos de Integración de Procesos una herramienta altamente poderosa para identificar y estimar los ahorros potenciales de energía en los procesos industriales. Sin embargo, sobre la aplicación de estos métodos en la industria láctea y en particular en la tecnología de yogur natural hasta ahora, solo breves resúmenes de este importante campo han sido proporcionados en la literatura. Este artículo presenta una revisión sobre el estado del arte en relación a la aplicación de la Programación Dinámica para la optimización de procesos industriales, los métodos de integración de procesos como herramienta para los sistemas de calidad y la mejora continua y la evaluación de oportunidades de uso de fuentes renovables de energía como alternativa, para contribuir a la mejora y disminución de la demanda de energía y reducir el consumo de combustibles fósiles en la industria láctea. Esta revisión puede ser útil para establecer las posibles direcciones que pueden asumir futuras investigaciones que integren los métodos analizados en la industria láctea y particularmente en la producción de yogur natural.

*Palabras clave: fuentes renovables de energía, métodos de integración de procesos, procesos lácteos, programación dinámica, revisión.*

---

## USE OF RENEWABLE ENERGY SOURCES AND PROCESS INTEGRATION METHODS IN THE DAIRY INDUSTRY

### Abstract

Process Integration has been recognized as an active research field in food, chemical and dairy process industry, and Process Integration Methods a highly powerful tool for identifying and estimating potential energy savings in industrial processes. However, deal with the application of these methods in the dairy industry and in particular in yogurt technology so far, only brief summaries of this important field have been provided in the literature. This article presents a review of the state of the art in relation to the application of Dynamic Programming for the optimization of industrial processes, process integration methods as a tool for quality systems and continuous improvement and evaluation of opportunities of use of renewable energy sources as an alternative to contribute to the improvement and reduction of energy demand and reduce the consumption of fossil fuels in the dairy industry. This review could be useful to establish the possible directions that future research could take that integrates the methods analyzed in the dairy industry and particularly in the production of natural yogurt.

*Keywords: dairy processes, dynamic programming, process integration methods, renewable energy sources, review.*

---

## I. Introducción

La industria alimentaria se encarga del procesamiento industrial de alimentos inocuos, de calidad y responsabilidad con el medio ambiente, (Suárez, 2015) utilizando para el desarrollo de sus actividades productivas, combustibles fósiles. La industria láctea es una de las principales consumidoras de energía de dicha industria; puesto que el uso de la energía es fundamental para asegurar el mantenimiento de la calidad de los productos lácteos (Padilla y Vásquez, 2017) especialmente en los tratamientos de calentamiento y enfriamiento, y en el almacenamiento del producto.

La Integración de Procesos, como plantea (Lorezo *et al.*, 2016) resulta una herramienta muy útil a dicha industria puesto que, le permite disminuir en las operaciones productivas los consumos de energía, agua, materias primas y la generación de residuos contaminantes al medioambiente; garantizando la solución óptima del sistema productivo de forma integrada.

En este artículo se presenta una amplia revisión de la literatura técnica asociada al análisis y descripción de los métodos para la Integración de Procesos, de los Sistemas de Calidad, Mejora Continua y Sistemas Integrados de Gestión.

La Integración de Procesos es un enfoque poderoso utilizado en diversos procesos industriales para mejorar la eficiencia de los mismos, y optimizar el uso de energía, agua y otros recursos. La literatura actual reporta varias técnicas altamente efectivas para el diseño integrado de procesos; siendo los métodos (Leng Chewa *et al.*, 2013) de mayor aplicación aquellos que tienen como base el tratamiento termodinámico y el tratamiento de la programación matemática.

Un Sistema de Gestión de la Calidad establece la política y los objetivos acerca de las actividades coordinadas para dirigir y controlar una organización con respecto a la calidad (NC ISO 9000, 2015) que es definida; como el conjunto de propiedades y características de un producto o servicio que le confieren la aptitud para satisfacer las necesidades expresadas o implícitas. El Sistema de Gestión de la Calidad (Velásquez, 2012) se relaciona con la satisfacción de las expectativas de los clientes. Permite definir y mantener el control de los procesos que contribuyen a obtener productos aceptables para el cliente. Proporciona confianza tanto a la organización como a sus clientes, de su capacidad para suministrar productos que satisfagan los requisitos de forma coherente.

En las últimas décadas las organizaciones han demostrado un marcado interés por la reinversión continua de sus procesos y actividades; buscando las mismas la mejora continua de dichos procesos y, por ende, poder mantenerse exitosamente a lo largo del tiempo. La Mejora Continua (NC ISO 14004, 2016) es una característica fundamental de un sistema de gestión; no es más que la acción recurrente por parte de las organizaciones para aumentar la capacidad de cumplimiento, de buscar continuamente mejorar la eficacia y la eficiencia de los procesos de la empresa. Las mejoras pueden variar desde actividades escalonadas continuas hasta proyectos de mejora estratégica a largo plazo.

Como plantea, (Yáñez y Rea, 2022) una de las herramientas operativas administrativas que ayuda a lograr el éxito sostenido de una organización y alcanzar a su vez la

eficiencia y mejora continua en sus actividades; son los Sistemas Integrados de Gestión (SIG), en los que se integran componentes de calidad, buen desempeño ambiental y capital humano. Estos componentes seleccionados por las empresas para responder a una necesidad particular, pueden aplicarse como sistemas de manera independiente, pero tienen elementos comunes que inducen a su integración.

La integración de los sistemas (Yáñez y Rea, 2022) establece la obligatoriedad de cumplir al mismo tiempo con los requisitos legales y regulatorios, los ambientales, de calidad, y de seguridad y salud en el trabajo; lo que requiere de un mayor esfuerzo en la planificación, el control de los procesos y en la toma de decisiones. Generalmente los sistemas integrados de gestión pueden estar relacionados con una o más normas de referencia, como: Sistemas de Gestión de Calidad, (NC ISO 9001, 2015) Sistema de Gestión de seguridad y salud en el trabajo, (NC ISO 18001, 2015) y Sistemas de Gestión Ambiental (NC ISO 14001, 2015).

Por ende, la integración de los sistemas puede resultar de gran ventaja (Cabalé y Rodríguez, 2020):

- Permite solucionar los conflictos de responsabilidades, optimizar y simplificar el proceso de toma de decisiones basadas en datos integrales.
- Se alcanza con este una mayor coherencia, facilidad de manejo y reducción de los costos de mantenimiento de la documentación, al integrarse en un solo documento aspectos relacionados con la calidad, desempeño ambiental seguridad y salud en el trabajo.
- Se incrementa el rendimiento, las competencias y el entrenamiento de los miembros de la organización, ya que se determinan y suplen al unísono las necesidades de formación de los individuos en varias materias.
- Mejora la eficacia y la eficiencia de los procesos, aumentando la consistencia, la trazabilidad, evitando las redundancias y las incoherencias.
- Se logra un significativo ahorro de recursos en el desarrollo e implementación del SIG y una menor inversión que la necesaria para los procesos de certificación de estos sistemas de manera independiente.

Debido a la dificultad que representa la implementación de todos los sistemas a la vez, la tendencia actual de las empresas, es hacia la puesta en práctica de un Sistema de Gestión de la Calidad y posteriormente integrar los demás; (León *et al.*, 2018) siendo el de la gestión de la calidad el sistema de mayor acogida por las empresas, por estar directamente relacionado con su razón de ser y con los clientes.

También, se hace referencia en este artículo al empleo de estos métodos aplicados en la industria química y de alimentos en general, pero haciendo hincapié en la tecnología para la obtención de yogur natural de leche; ya que el yogur como plantea (Parra, 2012), es un alimento probiótico que aporta grandes beneficios a la salud, siendo la más conocida de todas las leches fermentadas y la de mayor consumo a nivel mundial.

### Tecnología del yogur natural. Fermentación láctica

El yogur natural es el producto coagulado que se obtiene a partir de leche tratada, por fermentación con bacterias

como *Lactobacillus bulgaricus* y *Streptococcus thermophilus*, productoras de ácido láctico. La acción de estas bacterias desencadena un proceso denominado *Fermentación Láctica*; (Moreno *et al.*, 2013) en el cual la lactosa (el azúcar de la leche) se transforma en ácido láctico. A medida que el ácido se acumula la estructura de las proteínas de la leche va modificándose y lo mismo ocurre con la textura del producto, pues al alcanzarse el pH (potencial de Hidrógeno) del punto isoeléctrico, la caseína coagula formándose el gel.

Este tipo de yogur no contiene edulcorantes, esencias ni colorantes; puede ser descremado, semidescremado o normal.

En función de su consistencia puede ser firme o compacto; batido con consistencia cremosa (el producto escurre fácilmente) y líquido (yogur batido de menor consistencia) (Legarreta, 2018).

Los métodos de elaboración del yogur natural pueden variar considerablemente, según la materia prima utilizada, la formulación del producto y el tipo de yogur que se desea obtener. La fabricación general (Rodríguez *et al.*, 2017) del mismo, consiste en una vez normalizada la leche en su contenido graso; sea posteriormente homogenizada, para reducir el tamaño de los glóbulos grasos y conseguir una emulsión estable para mejorar la digestibilidad del producto. Luego se procede a la pasteurización, por medio de un tratamiento térmico apropiado, que permita destruir la totalidad de su flora patógena. Una vez pasteurizada, se almacena durante unos minutos y se enfría a la temperatura de fermentación, alrededor de los 45 °C. Dependiendo del tipo de yogur, la fermentación puede efectuarse dosificando el cultivo directamente en el envase de consumo individual (yogur de coágulo) o añadiéndolo en el tanque de incubación (yogur batido) para su envasado posterior. Una vez culminado el proceso de fermentación se enfría y se almacena para su ulterior distribución.

Una solución tecnológicamente factible para asegurar energéticamente este producto lácteo es la integración de energía renovable a dicho proceso tecnológico, como fuente alternativa, para satisfacer la demanda de energía y reducir el consumo de combustibles fósiles; y así lograr con ello satisfacer los requerimientos de agua, vapor y energía, insumos esenciales en dicha actividad productiva.

En esta revisión bibliográfica muchos de los trabajos de investigación se basan en el empleo del Análisis de Procesos, la Modelación Matemática de Procesos, la Simulación de procesos y la Programación Dinámica para la optimización de procesos industriales.

Para lograr la intensificación de los procesos tecnológicos de la industria se ha utilizado el Análisis de Procesos; (Cortés *et al.*, 2020) puesto que, sirve para descubrir las partes débiles del proceso y para la creación de medidas que permitan un mejor aprovechamiento de las materias primas, la energía y los medios de trabajo. El análisis de procesos comprende un examen global de un proceso existente o concebido, el cual se puede realizar bajo un aspecto limitado, unilateral del proceso, o con un enfoque multilateral más complejo, constituye un elemento importante para tomar decisiones más científicas y responsables.

La obtención de modelos matemáticos elaborados a partir de los valores reales del comportamiento de los propios

procesos, es una forma conveniente de analizar dichos procesos; resultando la validación de los mismos imprescindible, para así evitar la posible propagación de errores del análisis efectuado (Fritzson, 2015).

Los modelos matemáticos pueden ser modelos dinámicos, los que son utilizados para los estudios de control automático y afines; y modelos estáticos, los cuales se emplean para estudios de diseño técnico y optimización técnico-económica. Estos modelos pueden considerarse como un soporte o ayuda para la toma de decisiones.

La función clave de la intensificación de procesos es su optimización, la cual se hace con apoyo de modelos fiables. Debido a la complejidad de estos modelos, la optimización de los mismos se realiza en la mayoría de los casos mediante la simulación; (Bolaños, 2014) técnica definida para evaluar un proceso mediante modelos matemáticos.

En la industria de procesos, hay que tomar decisiones que se basan en la evaluación de alternativas sobre el diseño o control operacional del proceso transformativo. Para ayudar a una decisión, tal como plantea, (Fleites *et al.*, 2020) generalmente se deben realizar una serie de cálculos para estimar indicadores de carácter económico, tecnológico, energético o ambiental.

Se han empleado principalmente métodos matemáticos de optimización, tal es el caso de la programación dinámica; (Flores, 2017) técnica desarrollada para resolver problemas en los que es imprescindible la toma de decisiones en periodos sucesivos, sirviendo para la resolución de problemas de optimización complejos, descomponiéndolos en subproblemas más sencillos.

Teniendo en cuenta todas las consideraciones anteriores, el objetivo general del presente trabajo es establecer el estado del arte en relación a la aplicación de la Programación Dinámica para la optimización de procesos industriales, los métodos de integración de procesos como herramienta para los sistemas de calidad y la mejora continua y cómo pudieran complementarse con el uso de fuentes renovables de energía.

Finalmente, el análisis realizado permite fundamentar en las conclusiones del trabajo, una hipótesis que establece la dirección que pueden asumir futuras investigaciones que integren los métodos analizados en la industria láctea y particularmente en la producción de yogur natural.

## II. Desarrollo

### Métodos de integración de procesos aplicados en la industria

Numerosos métodos de integración de procesos han demostrado que son muy efectivos para identificar y estimar los ahorros potenciales de energía en la industria. Estos métodos se dividen en tres grupos: Métodos Termodinámicos, Programación Matemática y Métodos Híbridos.

Los Métodos de Integración de Procesos Termodinámicos (Lorenzo, 2016) son apropiados para estimar en forma aproximada en un proceso, los requerimientos mínimos de servicios auxiliares de calefacción y de enfriamiento.

Suelen ser agrupados en métodos basados en el análisis de la primera ley (Tecnología *Pinch*) y métodos basados en el análisis de la segunda ley (análisis exergético y análisis exergoeconómico), siendo la tecnología *Pinch* (Sadeghian

y Beheshti, 2017) conocida como «análisis del pellizco», la herramienta del análisis termodinámico que mayor aplicación industrial ha tenido.

Actualmente ha pasado de ser una herramienta dirigida a mejorar la eficiencia energética en el diseño de redes de recuperación de calor a ser una metodología de optimización tanto para diseñar procesos nuevos como para modificar procesos existentes.

La Programación Matemática como Método de Integración de Proceso considera métodos de optimización matemática; (Pérez, 2017) utilizando modelos detallados y algoritmos convencionales, los que permiten optimizar las condiciones de operación y dimensiones de los equipos en forma simultánea. Estos métodos son herramientas potentes y eficaces para analizar y optimizar cualquier sistema en general; emplean principalmente la programación lineal, no lineal y dinámica, resultando la programación dinámica (Muriedas, 2021) una metodología perfecta, amigable y de mucha ayuda puesto que muestra los posibles escenarios óptimos que va a satisfacer las expectativas de la problemática. En este caso se obtiene la resolución mediante la recursividad y no contando con una fórmula estándar, enfoque usado para la solución de problemas de tipo general. Las ecuaciones específicas usadas son desarrolladas para que representen cada situación individual.

El Método Híbrido como plantea, (Bergamin *et al.*, 2021) es un Método de Integración de Proceso que combina las ventajas de los conocimientos del proceso del análisis Pinch con las ventajas de los métodos de programación matemática para abordar con éxito el problema general.

Los métodos de Integración de Procesos pueden ser de naturaleza secuencial o simultánea. El análisis Pinch representa un método de solución secuencial, mientras que el problema de programación matemática se puede resolver utilizando un enfoque secuencial o simultáneo tal como plantea (Čuček *et al.*, 2019). Por ende, la programación matemática resulta el método más completo puesto que los termodinámicos presentan ciertas dificultades cuando se los pretende utilizar para optimizar la síntesis y diseño de cualquier proceso en los que los equipos-componentes se encuentran fuertemente acoplados (Manassaldi, 2017).

No han sido pocas las investigaciones desarrolladas en relación a la aplicación de los Métodos de Integración de Procesos en la industria láctea, química y de alimentos. En este artículo se hace mención sobre algunos estudios de casos informados, con respecto a la aplicación de estos métodos en sectores industriales; (Nemati *et al.*, 2019) aplica en la industria alimentaria el método Pinch para el uso eficiente del agua.

En la industria láctea (Bergamini *et al.*, 2021) emplea el bridge framework en una planta de producción de leche en polvo como herramienta sistemática de apoyo a la toma de decisiones, para la integración de procesos en plantas industriales modernizadas; también (Jablonsky y Skocdoplova, 2017) ha aplicado la programación por metas para optimizar linealmente el proceso de producción en una procesadora de leche. Actualmente las industrias suelen aplicar para optimizar el uso del agua y la energía, la programación matemática con un enfoque simultáneo.

Se evidencia en (Kermani *et al.*, 2016) donde se presentan varios ejemplos de aplicación; tal es el caso de (Ahmetović *et al.*, 2013) y (Ahmetović *et al.*, 2015) este último presenta una revisión sistemática y completa de los artículos publicados en las últimas dos décadas acerca de la integración del agua y la energía; con el uso de métodos sistemáticos basados en el análisis Pinch (Luo *et al.*, 2014) y (Hou *et al.*, 2014); la programación matemática (Ahmetović *et al.*, 2014), (Ibric *et al.*, 2014), (Ibric *et al.*, 2014) (Chen *et al.*, 2014), (Jiménez *et al.*, 2014), (Seid y Majozi, 2014) y su combinación (Sahu y Bandyopadhyay, 2012) siendo las referencias más sobresalientes las recién aludidas.

En cambio, no sucede de igual forma con las investigaciones relacionadas particularmente con la aplicación de estos métodos en la tecnología del yogur natural, que suelen ser menos; de lo reportado en la literatura se encuentra el estudio realizado por (Ramírez *et al.*, 2019) en el cual, se evidencia cómo se puede mejorar la productividad de la elaboración de yogur por medio de un simulador.

### Programación dinámica aplicada en la industria

La programación dinámica es una técnica matemática basada en el llamado «Principio de optimalidad de Bellman» desarrollado por el matemático Richard Bellman en la década de 1950; (Flores, 2017) que permite a resolver decisiones secuenciales interrelacionadas, combinándolas para obtener la solución óptima. El modelo de programación dinámica no sigue un patrón estándar; para cada situación especial, será indispensable establecer cada uno de los parámetros que caracterizan las variables únicas y usar aquellas que generan las soluciones óptimas (Muriedas, 2021).

El método de solución para los problemas de programación dinámica está desarrollado para encontrar las soluciones óptimas para cada periodo o etapa en los escenarios que se presenten; comenzando de atrás hacia adelante y desplazándose etapa por etapa para encontrar cada uno de los parámetros óptimos de solución, hasta encontrar los parámetros óptimos de la etapa inicial (Vasquez, 2016).

Esta característica de la Programación Dinámica, hace que sea ideal para aplicarlo en la optimización de las tecnologías lácteas, que pueden considerarse procesos, que van desarrollándose en etapas, tal y como se expone al describir la tecnología para la obtención del yogur natural. En este caso las etapas serían: recibimiento y preparación de la leche, pasteurización-homogenización, preparación del inóculo, inoculación y fermentación, envasado y almacenamiento.

Se aplica entonces, el método que corresponda para hallar las condiciones óptimas de cada una de esas etapas. No son muchos los estudios que han abordado el tema referente a la aplicación de la programación dinámica en la resolución de problemas que se presentan en la industria láctea, química y de alimentos y en particular en la tecnología del yogur natural.

Una de las investigaciones que ha profundizado en el tema (González *et al.*, 2018) resalta, que la razón por la que se evita el uso de la programación dinámica es debido a la dimensión de los espacios involucrados, puesto que la dimensión del espacio de estados crece de forma exponencial lo que se conoce como maldición dimensional. Se debe tener en cuenta en este caso que el espacio de estados, el

espacio de acciones y el espacio de realizaciones son fuentes de maldición dimensional, las cuales han de determinar el tipo de problema y método de aproximación a usar.

El problema clásico con el que se pueden introducir las ideas esenciales de la programación dinámica, es el problema de la ruta óptima (ruta corta pensando en distancias o ruta más barata pensando en costos). Ofrece el algoritmo de programación dinámica una forma elegante y transparente para resolver el problema anteriormente planteado. El algoritmo de programación dinámica funciona para resolver una familia de problemas de minimización, deterministas y con un número finito de etapas (González *et al.*, 2018).

Para reconocer que se está frente a un problema que se puede plantear como una programación dinámica (Vasquez, 2016), es necesario identificar su estructura: etapa, estado y política. El problema a desarrollar es divisible en etapas, las mismas que tendrán sus propias políticas de decisión.

Los estados deben estar asociados a cada etapa del problema y pueden ser finitos o infinitos, dependerá de las condiciones posibles que presente el problema y la política de decisión del estado actual, que se transforma en un estado inicial para la siguiente etapa.

A medida que el problema aumenta en número de tareas u operaciones tornándose este, complejo y poco práctico. Es importante señalar que, a pesar del tiempo de cálculo que se extiende y crece de forma exponencial, la solución obtenida por el algoritmo de programación dinámica tiende a mostrar resultados mejores y exactos. Resultados estos que se esperan obtener al aplicar la programación dinámica como Método de Integración de Procesos en la tecnología del yogur y lácteos en general.

### Oportunidades de uso de la energía renovable en la industria láctea

Dado el continuo desarrollo industrial y el encarecimiento de las fuentes de energía convencionales se ha hecho necesaria la introducción de Fuentes Renovables de Energía (FRE) en el sector industrial.

El empleo de este tipo de energía puede resultar de gran ventaja en la industria ya que la misma es inagotable, es una energía limpia, su costo es relativamente bajo y ayuda a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero contribuyendo con ello a frenar el cambio climático (Robles y Rodríguez, 2018).

Las siguientes soluciones tecnológicas pueden ser evaluadas por el sector industrial, tal plantea (Bravo, 2015) como oportunidades de uso de energía renovable en la industria.

- Una opción madura tecnológicamente son los sistemas solares térmicos industriales, los que contribuyen a disminuir el consumo de combustible y electricidad en la producción de vapor y/o calentamiento de agua. Son los sistemas fotovoltaicos la principal opción disponible para disminuir el consumo de electricidad de la red eléctrica, permitiendo con ello el autoabastecimiento eléctrico. Las complejidades de los sistemas fotovoltaicos pueden ir desde sistemas conectados directamente al sistema eléctrico hasta microrredes eléctricas que pueden integrar otras FRE, grupos electrógenos y/o bancos de batería.

- Puede emplearse biogás como combustible en calderas, obtenido a partir del tratamiento anaerobio de aguas residuales, lo que permite la sustitución del diésel y *fuel oil* siempre que esto sea posible. Esta acción debe ser acompañada con la modificación o sustitución de los quemadores de las calderas para permitir en ellas el uso del biogás como combustible. La energía proveída por el biogás también puede ser utilizada en un generador para producir electricidad.
- La biomasa forestal en calderas puede usarse para cubrir la demanda de combustible en las actividades que no generan residuos líquidos orgánicos o en las que el uso del biogás producido no cubre completamente el consumo de combustible. Tecnológicamente esto es posible mediante la incorporación de calderas de biomasa para cubrir la demanda a base de vapor; también puede lograrse mediante la adaptación de las existentes al uso de la biomasa como combustible, al incorporar quemadores de sólidos o gasificadores de biomasa. Esta biomasa puede ser utilizada, además, para la producción de electricidad.

Actualmente se han realizado significativos estudios prácticos referentes a la implementación de soluciones tecnológicas con FRE en procesos industriales:

- Estudio realizado en una planta de helado en Cuba (Morales y Cisneros, 2020)
- Evaluación de plantas termosolares en Cuba para la producción de electricidad (Cisneros *et al.*, 2021)
- Evaluación del potencial de producción de biogás en la industria agroalimentaria y pecuaria (Suárez Hernández *et al.*, 2018), así como también el estudio asociado a la adopción de energía renovable en el proceso de fermentación del yogur (Felipe, 2014)

En el proceso de producción de yogur natural las necesidades de calor que se requieren en función de los requerimientos de la operación, se cubren en su mayor parte con el uso de agua caliente o vapor de agua obtenida de la combustión de combustibles fósiles.

Las necesidades de refrigeración, iluminación, ventilación y equipos de proceso se cubren con uso eléctrico.

En estas operaciones también se generan residuos líquidos orgánicos los cuales pueden tratarse por biodigestión anaerobia como vía de descontaminación y eliminación de residuos. Es por ello que en este proceso el empleo de FRE desde los sistemas solares (tanto térmicos como fotovoltaicos hasta fuentes bioenergéticas dígase biomasa húmeda y sólida) son de gran ayuda para contribuir a la mejora y disminución de la demanda eléctrica y reducir el consumo de combustibles fósiles.

### III. Conclusiones

Dado el continuo desarrollo industrial hace unos años y el encarecimiento de las fuentes de energía convencionales, se ha apostado por asegurar a la industria condiciones más adecuadas de productividad y competitividad, lo que es un posible camino para tornarla energéticamente más eficiente.

Para ello se han implementado técnicas de integración de procesos que garantizan la mejora continua de los procesos industriales y la calidad de sus productos. Se ha aplicado la programación matemática como método de integración para la obtención de soluciones óptimas que permitan servir de ayuda en la toma de decisiones. Se confirma la programación dinámica como una metodología muy amigable que muestra los posibles escenarios óptimos y que satisface las expectativas de la problemática. También se ha apostado por la adopción de energías limpias para tratar de minimizar en mayor medida el uso de combustibles fósiles y así permitir satisfacer los requerimientos de agua vapor y energía en la industria.

A partir de la experiencia acumulada en la aplicación de los métodos para la integración de procesos y la programación dinámica para su optimización, es posible establecer un procedimiento general para la mejora de los indicadores técnico-económicos en la tecnología para la obtención de yogur y otras producciones lácteas, que se complementen con el uso de fuentes renovables de energía.

#### IV. Referencias

- Ahmetović, E., Ibrić, N., Kravanja, Z., & Grossmann, I. E. (2015). Water and energy integration: A comprehensive literature review of non-isothermal water network synthesis. *Computers and Chemical Engineering*, 82, págs. 144-171.
- Ahmetović, Elvis; Kravanja, Zdravko. (2013). Simultaneous synthesis of process water and heat exchanger networks. *Energy*, 57(1), págs. 236-250.
- Ahmetović, E., Ibrić, N., & Kravanja, Z. (2014). Optimal design for heat-integrated water-using and wastewater treatment networks. *Applied Energy*, 135, págs. 791-808.
- Bergamin, R., VanNguyen, T., Bühler, F., Bellemo, L., & Elmegaard, B. (2021). A method for faster application of process integration techniques in retrofit situations. *Journal of Cleaner Production*, 284.
- Bergamini, R., Moussavi, A., Shahhosseini, H. R., Nguyen, T.-V., & Bellemo. (2021). Analysis of energy integration opportunities in the retrofit of a milk powder production plant using the Bridge framework. *Journal of cleaner production*, 328.
- Bolaños Plata, O. (2014). *Importancia de la Simulación en la Mejora de Procesos*. Universidad Nacional Autónoma de México, Director: Silvina Hernández García. Tesis para obtener el título de Ingeniero Industrial.
- Bravo Hidalgo, D. (2015). Energía y desarrollo sostenible en Cuba. *Centro Azúcar*, 42(4).
- Cabalé Miranda, E., & Rodríguez Pérez de Agreda, G. (2020). Sistemas de gestión. Importancia de su integración y vínculo con el desarrollo. *Estudios del Desarrollo Social: Cuba y América Latina*, 8(1).
- Chen, Z., Hou, Y., Li, X., & Wang, J. (2014). Simultaneous optimization of water and heat exchange networks. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 31, págs. 558-67.
- Cisneros Ramírez, C., Menéndez Pupo, A., Moralobo Padrón, M., Trinchet Soler, F., & Fernandez-Aballí Altamiran, C. (2021). Evaluación técnico-económica preliminar de la producción de electricidad. *Ingeniería Energética*, 42(1).
- Cortés Martínez, R., Ramos Miranda, F., Miño Valdés, J., & Pérez Navarro, O. (2020). Modelación y simulación de procesos en la intensificación de instalaciones de. *Ingenio*, 2(2).
- Čuček, L. y. (2019). Approaches for retrofitting heat exchanger networks within processes and Total Sites. *Journal of Cleaner Production*, 211, págs. 884-894.
- Felipe Lorenzo, D. (2014). *Estudio de eficiencia energética con energía renovable para la fermentación del yogur*. Universidad de La Laguna. Escuela Politécnica Superior de Ingeniería, Director: Valerio. L. Gutiérrez Afonso. Trabajo Fin de Grado, La Laguna.
- Fleites Avila, Y., Martí Marcelo, C., Albornos Carvajal, Y., Miño Valdés, J., & González Suárez, E. (2020). Experiencias de las Aplicaciones de la Programación Lineal en la industria de Procesos Químicos en Cuba. *Centro Azúcar*, 47.
- Flores Verdugo, I. (2017). *Modelo de programación de la producción con metodología de investigación de operaciones para la empresa Energy Cool*. Universidad del Azuay. Escuela de Ingeniería de la Producción y Operaciones, Director: Iván Coronel. Trabajo de titulación previo a Obtención del título de Ingeniero en Producción y Operaciones, Cuenca.
- Fritzson, P. (2015). *Introducción al Modelado y Simulación de Sistemas Técnicos y Físicos con Modelica*.
- González Sánchez, D., Díaz Infante, S., & Peñuñuri, F. (2018). Del algoritmo de programación dinámica a los procesos Markovianos de decisión. *Miscelánea Matemática*, 66, págs. 57-80.
- Hou, Y., Wang, J., Chen, Z., Li, X., & Zhang, J. (2014). Simultaneous integration of water and energy on conceptual methodology for both single- and multi-contaminant problems. *Chemical Engineering Science*, 117, págs. 436-44.
- Ibrić, N., Kravanja, Z., & Ahmetović, E. (2014). Two-step mathematical programming synthesis of pinched and threshold heat-integrated water networks. *Journal of Cleaner Production*, 77, págs. 116-39.
- Ibrić, N., Ahmetović, E., & Kravanja, Z. (2014). Simultaneous optimization of water and energy within integrated water networks. *Applied Thermal Engineering*, 70, págs. 1097-122.
- Jablonsky, J., & Skocdopolova, V. (2017). Análisis y Optimización del Proceso de Producción en una Empresa Procesadora de Leche. *Información Tecnológica*, 28(4), págs. 39-46.
- Jiménez Gutiérrez, A., Lona Ramírez, J., Ponce Ortega, J. M., & Halwagi, M. (2014). An MINLP model for the simultaneous integration of energy, mass and properties in water networks. *Computers & Chemical Engineering*, 71, págs. 52-66.
- Kermani, M., Périn-Levasseur, Z., Benali, M., Savulescu, L., & Maréchal, F. (2016). A novel MILP approach for simultaneous optimization of water and energy: Application to a Canadian softwood Kraft pulping mill. *Computers and Chemical Engineering*, 102, págs. 238-257.
- Legarreta Cruz, D. (2018). Integración energética en la UEB de *Productos Lácteos de Santa Clara*. Universidad Central Marta Abreu de la Villas, Tutor: Juan Pedro Hernandez Touse, Santa Clara.
- Leng Chewa, I. M., Yee Foo, D. C., Bonhivers, J. C., Stuart, P., Alva Argaez, A., & Savulescu, L. E. (2013). A model-based approach for simultaneous water and energy reduction in a pulp and paper mill. *Applied Thermal Engineering*, 51, págs. 393-400.
- León Ramentol, C. C., Menéndez Cabezas, A., Rodríguez Socarrás, I. P., García González, M. C., & Fernández Torres, S. (2018). Importancia de un sistema de gestión de la calidad en la Universidad de Ciencias Médicas. *Archivo Médico de Camagüey*, 22(6).

- Lorenzo Llanes, J. (2016). *Propuesta de Alternativas para la Integración de Agua y Energía en la producción de Azúcar Crudo*. Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Tutor: Alain Perez González. Memoria escrita para optar por el título de Máster en. La Habana.
- Lorezo Llanes, J., Zumalacárregui de Cárdenas, L., & Mayo Abad, O. (2016). Integración Simultánea de Agua y Energía: Logros y Desafíos. *Centro Azúcar*, 43(1), págs. 37-50.
- Luo, Y., Liu, Z., Luo, S., & Yuan, X. (2014). Thermodynamic analysis of non-isothermal mixing's influence on the energy target of water-using networks. *Computers & Chemical Engineering*, 61, págs. 1-8.
- Manassaldi, J. (2017). *Aplicación de Técnicas de Programación Matemática y Métodos de Integración de Procesos para determinar la Síntesis y el Diseño óptimo de una Planta de Cogeneración de Ciclo Combinado*. Universidad Tecnológica Nacional, Director: Sergio F. Mussati. Tesis presentada como parte de los requisitos de la Universidad Tecnológica Nacional para la obtención del Grado Académico de Doctor en Ingeniería, Rosario.
- Morales Pons, Á., & Cisneros Ramírez, C. (2020). Estudio de Factibilidad de la Aplicación de la Energía Solar en una Planta de Helados. *Eco Solar*, 74, ISSN: 1028-6004. La Habana: Ed. Cubasolar.
- Moreno Aznar, L., Cervera Ral, P., Ortega Anta, R., Díaz Martín, J., Baladia, E., & Basulto, J. (2013). Evidencia científica sobre el papel del yogur y otras leches fermentadas en la alimentación saludable de la población española. *Nutrición Hospitalaria*, 28(6).
- Muriedas García, S. (2021). *Programación Dinámica con Aplicaciones en la Economía*. Universidad de Cantabria, Director: Luis Alberto Fernández Fernández. Trabajo de Fin de Grado para acceder al Grado en Matemáticas, Cantabria.
- NC ISO 14001. (2015). *Oficina Nacional de Normalización (NC). Sistema de gestión ambiental. Requisitos con orientación para su uso*. La Habana, Cuba.
- NC ISO 14004. (2016). *Oficina Nacional de Normalización (NC). Sistemas de Gestión Ambiental-Directrices Generales sobre la Implementación*. IDT. 2da ed. La Habana: Cuban National Bureau of Standards; 2016.
- NC ISO 18001. (2015). *Oficina Nacional de Normalización (NC). Seguridad y salud en el trabajo. Sistemas de gestión de seguridad y salud en el trabajo*. Requisitos. La Habana, Cuba.
- NC ISO 9000. (2015). *Oficina Nacional de Normalización (NC), Norma Cubana Sistemas de Gestión de la Calidad - Fundamentos y Vocabulario*. IDT. 3ra ed. La Habana: Cuban National Bureau of Standards; 2015.
- NC ISO 9001. (2015). *Oficina Nacional de Normalización (NC). Sistemas de gestión de la calidad. Requisitos*. La Habana, Cuba.
- Nemati Amirkolaii, K., Romdhana, H., & Lameloise, M. L. (2019). Pinch Methods for Efficient Use of Water in Food Industry: A Survey Review. *Sustainability*, 11(16), págs. 1-26.
- Padilla Díaz, D. S., & Vásquez Giraldo, D. J. (2017). Innovación y energía en las unidades productivas del sector lácteo. La eficiencia energética en la producción láctea.
- Parra Huertas, R. A. (2012). Yogur en la salud humana. *Lasallista de Investigación*, 9(2).
- Pérez León, A. (2017). *Propuesta de Integración Energética en la Planta de Queso Crema de la UEB Productos Lácteos de Cárdenas*. Universidad de Matanzas, Tutor: Agustín Benítez Hernández. Tesis Presentada como Requisito Parcial para la Obtención del Título de Máster en Ingeniería Asistida por Computadora, Matanzas.
- Ramírez Martín, C., Cavieles Rojas, N., Méndez Salamanca, N., Cifuentes Osorio, R., & Ochoa Echeverría, M. (2019). Simulator to Improve the Productivity of Yogurt Processing Based on a Model of Finite Automaton. *International Journal of Engineering and Technology*, 11(2), págs. 344-351.
- Robles Algarin, C., & Rodríguez Álvarez, O. (2018). Un panorama de las energías renovables en el Mundo, Latinoamérica y Colombia. *Espacios*, 39(34), pág. 10.
- Rodríguez Gregorich, A., Benítez Cortés, I., Yero Pérez de Corcho, Y., & Barrios Rodríguez, M. (2017). Estimación de la inversión de una planta para producir yogurt natural. *Centro Azúcar*, 44(4).
- Sadeghian Jahromi, F., & Beheshti, M. (2017). An extended energy saving method for modification of MTP process heat exchanger network. *Energy*, 140, págs. 1059-1073.
- Sahu, G. C., & Bandyopadhyay, S. (2012). Energy optimization in heat integrated water allocation networks. *Chemical Engineering Science*, 69, págs. 352-64.
- Seid, E. R., & Majoz, T. (2014). Optimization of energy and water use in multipurpose batch plants using an improved mathematical formulation. *Chemical Engineering Science*, 111, págs. 335-49.
- Suárez Hernández, J., Sosa Cáceres, R., Martínez Labrada, Y., Curbelo Alonso, A., Figueredo Rodríguez, T., & Cepero Casas, L. (2018). Evaluación del potencial de producción del biogás en Cuba. 41(2).
- Suárez, J. (2015). Producción integrada de alimentos y energía a escala local. *Pastos y forrajes*, 38(1), 2-7.
- Vasquez, G. F. (2016). *Aplicación de modelo de programación dinámica para la asignación de recursos del área de fuerza de ventas de la empresa Total Potentials*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Asesor: Bouillón Sardon, Adolfo. Trabajo de Suficiencia Profesional para optar al Título de Licenciado en Administración, Lima.
- Velásquez Rueda, M. (2012). Planificación de un sistema. *Sig-nos*, 4(2).
- Yáñez Moretta, P., & Rea Vaca, F. (2022). Sistemas Integrados de Gestión en un contexto de responsabilidad social. *Polo del Conocimiento*, 7(1).

**Conflicto de intereses:** Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

**Contribución de los autores:**

Ing. Eliany de la Caridad Valera Sterling: Investigación, Redacción-borrador original y Redacción-revisión y edición.  
Dr. C. Eduardo García Noa: Conceptualización, Metodología y Supervisión.

Recibido: 30 de septiembre de 2023

Aceptado: 9 de octubre de 2023