

INTEGRACIÓN SIMULTÁNEA DE AGUA Y ENERGÍA: LOGROS Y DESAFÍOS

SIMULTANEOUS INTEGRATION OF WATER AND ENERGY: ACHIEVEMENTS AND CHALLENGES

Junior Lorenzo Llanes^{1}, Lourdes Zumalacárregui de Cárdenas¹
y Orestes Mayo Abad¹*

¹Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (CUJAE). Ave 114 #11901 e/Cidlovía y Rotonda,
La Habana, Cuba.

Recibido: Noviembre 2, 2015; Revisado: Noviembre 20, 2015; Aceptado: Noviembre 30, 2015

RESUMEN

La Integración de Procesos (IP) es una herramienta que por más de cuarenta años ha demostrado su fortaleza para brindar soluciones óptimas a problemas complejos. La interacción de los sistemas de intercambio de energía y de las redes de agua constituye un caso típico de este tipo de problemas. El incremento gradual en los consumos de agua y energía ha determinado la necesidad de desarrollar metodologías que tomen en cuenta la integración simultánea de estos recursos. El presente trabajo tiene como objetivo presentar una revisión bibliográfica relacionada con la integración simultánea de agua y energía. Primeramente se presentan elementos generales relacionados con este campo de investigación, enfatizando en los enfoques empleados para llevar a cabo la integración simultánea (análisis pinch y la programación matemática). Se presentan además algunos casos de estudios recientes que demuestran la fortaleza de estas herramientas, prestando especial interés a la industria azucarera. Finalmente se presentan algunos de los retos que deberá enfrentar la integración simultánea de agua y energía durante la diversificación de la industria azucarera cubana.

Palabras clave: Integración simultánea de agua y energía, análisis pinch, programación matemática, industria azucarera

Copyright © 2016. Este es un artículo de acceso abierto, lo que permite su uso ilimitado, distribución y reproducción en cualquier medio, siempre que la obra original sea debidamente citada.

* Autor para la correspondencia: Junior Lorenzo, Email: junior@quimica.cujae.edu.cu

ABSTRACT

Process Integration (PI) is a tool that for over forty years has demonstrated its strength to provide optimal solutions to complex problems. The interaction of exchange systems of energy and water networks is a typical case of such problems. The gradual increase in the consumption of water and energy has determined the development of methodologies that take into account the simultaneous integration of these resources. This paper aims to present a literature review related to the simultaneous integration of water and energy. First, general items related to this research field are presented, emphasizing the approaches to simultaneous integration (Pinch Analysis and Mathematical Programming). Some recent cases of studies, demonstrating the strength of these tools mainly focus to sugar industry, are also presented. Finally some of the challenges to be faced by the simultaneous integration of water and energy for the diversification of the Cuban sugar industry are presented.

Keywords: Simultaneous integration of water and energy, pinch analysis, mathematical programming, sugar industry.

1. INTRODUCCIÓN

El mundo atraviesa por un momento clave vinculado a la supervivencia de la humanidad, tanto para los países desarrollados como para los que están en vías de desarrollo. El elemento determinante para mantener o alcanzar altos niveles de desarrollo e industrialización es el acceso y disponibilidad a la energía, la que a su vez tiene un indisoluble enlace con la naturaleza y el medio ambiente. La actualidad energética mundial se caracteriza por el alto precio de los combustibles fósiles así como por considerables daños medioambientales provocados por su uso.

Cuba no escapa de este panorama. Sin grandes fuentes de combustibles fósiles, lo que lleva a una elevada dependencia del exterior, una industria altamente consumidora de energía y una proyección hacia mayores niveles de desarrollo integral, el país tiene la necesidad de encontrar alternativas que permitan hacer un mejor uso de los portadores energéticos y los recursos naturales en general. Uno de los sectores que más puede ayudar a ello es el de la industria de la caña de azúcar.

La industria azucarera cubana debe mejorar ostensiblemente sus indicadores de eficiencia energética y alcanzar los mayores niveles de eficacia posible considerando las potencialidades de la caña de azúcar como cultivo. Es determinante que aumente la generación de electricidad más allá de sus propias necesidades para que aporte al Sistema Electroenergético Nacional (SEN), que disminuyan los requerimientos energéticos de sus procesos así como los consumos de agua en ellos.

Una herramienta bien establecida en el campo de la ingeniería química es la integración de procesos (IP). En ella, la integración simultánea de agua y energía constituye un punto clave para elevar la calidad de los procesos industriales. El presente trabajo tiene como objetivo principal presentar una revisión bibliográfica relacionada con la integración simultánea de agua y energía. Pretende además propiciar al investigador un acercamiento general a esta temática, así como una visión para futuras investigaciones. Por otra parte se presentan resultados que demuestran las potencialidades de esta

herramienta como una vía para incrementar la eficiencia de la industria azucarera cubana, así como las limitaciones existentes en las metodologías aplicadas.

2. DESARROLLO

2.1. Relación agua - energía

En la actualidad existe un incremento sostenido en los consumos de agua y energía en las diferentes industrias de procesos (International Energy Outlook. U.S. 2013). El agua es a menudo calentada o enfriada de acuerdo con las temperaturas de operación requeridas en las diferentes operaciones. Esto hace que se requieran utilidades externas de calentamiento o enfriamiento para las corrientes de agua en las industrias de procesos.

De lo anterior se infiere que la disminución en el consumo de agua fresca no solo disminuye la cantidad de agua residual sino también la cantidad de energía requerida para el enfriamiento y calentamiento de los diferentes procesos (Ahmetovi et al., 2010; Bagajewicz et al., 2002; Karuppiah et al., 2008). Por otra parte los costos por concepto de tratamiento de residuales también se ven disminuidos. Por tanto, el manejo del agua y la energía son temas que se deben abordar de manera simultánea más que independientemente.

2.2. Integración de procesos

La Agencia Internacional de Energía reporta que a nivel mundial las plantas industriales consumen aproximadamente más de un 50% de la energía necesaria para su operación (Alfa Laval, 2011). Por otra parte, es posible disminuir el consumo de agua subterránea entre 25% - 30% a partir de su reuso (Klemeš et al., 2013). La Integración de Procesos (IP) es una herramienta que ha demostrado su fortaleza para combinar varias partes de un proceso, o varios procesos, para reducir el consumo de recursos y de emisiones dañinas al medio ambiente, permitiendo a las industrias incrementar su rentabilidad a través de las reducciones en los requerimientos de energía y agua (Klemeš et al., 2013). La IP clásica ha sido desarrollada como una consecuencia de la continua evolución de la tecnología para mejorar el diseño de las plantas de procesos (Morar & Agachi, 2010).

Un proceso químico típico está integrado por varios subsistemas tales como los de reacción química, separación, redes de intercambio de calor, sistema de utilidades, redes de agua y sistemas de manejo de residuales. Todos estos subsistemas están interconectados a través de diferentes corrientes, tanto en un mismo proceso como entre diferentes procesos industriales, así como con el medio ambiente, tal como se muestra en la Figura 1. Precisamente el resultado de la IP es la explotación de las sinergias que ocurren entre los componentes del sistema. El comportamiento del sistema estará orientado hacia mejoras más allá de la demanda de energía, lo cual significa incluir criterios como el consumo de materias primas, la economía del proceso y las interacciones con los ecosistemas.

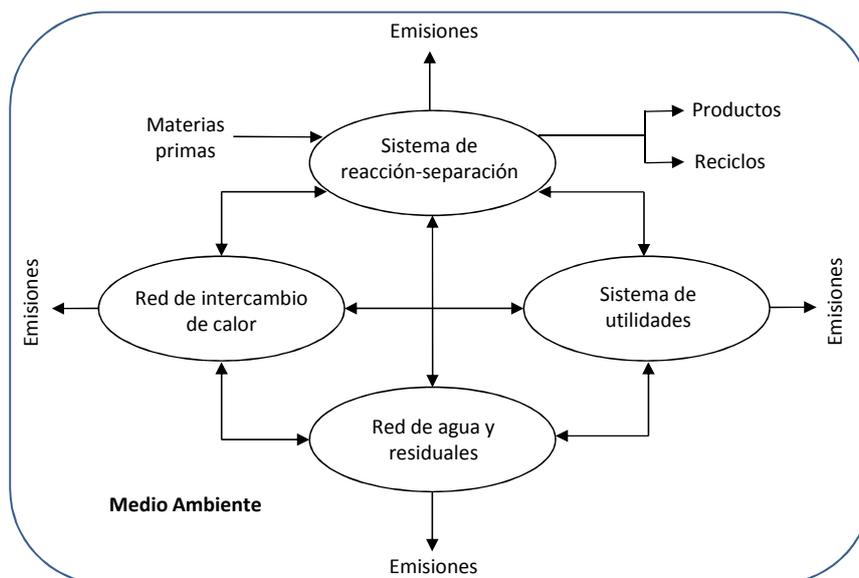


Figura 1. Relaciones entre los subsistemas del proceso y el medio ambiente (Ahmetovi et al., 2015)

2.3. Integración simultánea de agua y energía. Análisis Pinch y Programación matemática

El diseño de redes de agua que potencien su reuso en un mayor número de operaciones constituye una vía para la reducción en los consumos de agua fresca. En ocasiones esto no constituye una tarea fácil de llevar a cabo debido a restricciones de temperatura. Por ejemplo, en la fabricación de azúcar el agua para imbibición se debe calentar para favorecer el proceso de extracción. En casos como estos tanto la concentración como la temperatura del agua son factores importantes, debiendo ser considerados de manera simultánea.

En dependencia de los objetivos y prioridades de las compañías, disponibilidad de tiempo y recursos así como la complejidad y disponibilidad de datos, se pudieran justificar enfoques no integrados. Sin embargo, intentar encontrar soluciones para los proyectos de ahorro de agua sin considerar las implicaciones energéticas inevitablemente conduce hacia soluciones no óptimas. Esto es debido a que las interacciones entre los sistemas de agua y energía no están completamente investigadas (Savulescu & Kim, 2008).

Un enfoque secuencial o un procedimiento iterativo se puede aplicar para evaluar las implicaciones energéticas en el diseño de los sistemas de aguas. A pesar de que con estos procedimientos se puede alcanzar un determinado grado de mejora, es difícil lograr un máximo real de ahorro, o garantizar un mínimo de gastos. Por tanto, para alcanzar una solución óptima (o cercana a la óptima) donde el agua y la energía se minimicen simultáneamente se requiere de una metodología sistemática e integrada (Savulescu & Kim, 2008). Dos enfoques han sido desarrollados con este fin, el análisis pinch (AP) y la programación matemática (PM).

El primero de ellos representa un enfoque conceptual y gráfico basado en la comprensión física, así como criterios de carácter heurístico y la experiencia de los ingenieros de procesos. El AP consta de dos etapas fundamentales. En primer lugar se determinan los requerimientos mínimos de agua y energía del proceso. Seguidamente se

pasa al diseño de las redes de agua y energía cumpliendo con los requerimientos fijados en la etapa anterior. Dentro de cada una de estas etapas existen pasos que no se mencionan teniendo en cuenta los objetivos de este trabajo.

Una de las ventajas que presenta el AP sobre la PM es que permite una mejor visualización de la situación a tratar a partir de diferentes métodos gráficos. Varios trabajos se han desarrollado con el objetivo de brindar un mejor entendimiento de los problemas del diseño simultáneo de agua y energía (Leewongtanawit & Kim, 2008; Savulescu et al., 2005a; Savulescu et al., 2005b). Algunas de las metodologías que en ellos se plantean han sido aplicadas a procesos como la producción de azúcar (González et al., 2011).

Estos métodos permiten minimizar los requerimientos de agua y utilidades, tanto de calentamiento como de enfriamiento, a partir de los arreglos para la recuperación de calor. Por otro lado se logra reducir el número de unidades de intercambio de calor a partir del desarrollo de sistemas separados (Savulescu et al., 2005b). Los sistemas separados son subsistemas que están incluidos en los balances de calor y permiten que la recuperación de calor se realice en menos unidades (Linnhoff et al., 1982).

Una de las limitaciones que presentan los métodos anteriores es la suposición de que la cantidad de agua que entra al sistema es igual a la que sale como efluente. Esto en los casos reales, donde la cantidad de agua residual de una operación es a menudo menor que la alimentada, es muy poco probable que se cumpla. (Polley et al., 2010) brindaron un procedimiento para el diseño de sistemas en los que los consumos de agua y energía tienen un peso importante en los costos de operación, sin hacer la suposición anterior. Por otra parte, debido a las pérdidas de calor en la operación las temperaturas de entrada y salida suelen ser diferentes. Savulescu y Alva-Argáez (2008) investigaron el punto de mezclado no isotérmico y el calor directo a alcanzar por el agua y la eficiencia energética que puede lograrse.

Una herramienta gráfica denominada “Curvas superpuestas de masa y energía” que permite la reducción simultánea de agua y energía fue desarrollada por (Wan Alwi et al., 2011). Esta puede emplearse para la determinación de manera eficiente de los efectos simultáneos durante la reducción de agua y de energía.

A pesar de las ventajas del AP, dada su naturaleza secuencial, no es capaz de resolver problemas en los que intervienen múltiples contaminantes, restricciones de carácter práctico, así como las relaciones de compromiso entre los costos operacionales y de capital. Por tanto, las soluciones dadas son sub-óptimas.

Por otro lado la PM está basada en una superestructura de optimización y consta de tres etapas, fundamentalmente, la síntesis de una superestructura, la obtención de un modelo y su solución (Biegler, 2014; Biegler et al., 1997). Precisamente las limitaciones mencionadas sobre el AP pueden ser manejadas por la PM. Dentro de este enfoque, (Bogataj y Bagajewicz, 2008) propusieron un método basado en la programación no lineal mezclada con enteros (MINLP) combinando la red de agua con el modelo de optimización presentado por (Yee et al., 1990) modificado para el caso de mezclado y separación de las corrientes dentro de la superestructura de la red de intercambio de calor (RIC).

Posteriormente (Kim et al., 2009) propusieron un método para el diseño redes de aguas residuales y de intercambio de calor. En el mismo es empleada la MINLP para la

optimización simultánea de las redes de agua y calor, tomando como función objetivo los costos totales.

Recientemente (Ahmetovi & Kravanja, 2013) presentaron una nueva superestructura así como un modelo de optimización (MINLP no convexa) para las redes de agua y calor, donde la red de agua se extiende al intercambio directo e indirecto de calor, representando una oportunidad para la integración energética entre las corrientes calientes y frías con las corrientes de separación y mezclado de agua fresca y residual. Esta superestructura se extendió posteriormente para la integración entre corrientes de diferentes procesos (Ahmetovi & Kravanja, 2014).

La tríada agua- energía- alimentos fue considerada por Bazilian y colaboradores para desarrollar un modelo que considerara estos elementos de manera holística (Bazilian et al., 2011).

En 2014, (Thongpreecha & Siemanond, 2014) presentaron una metodología basada en la MINLP a partir de una secuencia en cascada de cinco etapas en las cuales primeramente se diseña la red de agua y posteriormente las corrientes residuales se emplean en la integración energética de la RIC.

Estableciendo una comparación entre los dos enfoques tratados anteriormente se puede decir que la PM ofrece la ventaja de la exactitud en los resultados y garantiza la optimización global, al tiempo que permite el manejo de complejos sistemas de distribución de agua con múltiples contaminantes teniendo en cuenta la efectividad de los sistemas de cómputo. Sin embargo, es menos popular entre los ingenieros de procesos. En ocasiones, las soluciones brindadas suelen tener un grado de complejidad tal que es poco probable asegurar la operabilidad y controlabilidad del sistema.

La reducción en los grados de libertad después de la integración vuelve más inestables y difíciles de controlar cada uno de los procesos, acentuándose en la medida que aumenta el nivel de integración de las soluciones. Por otro lado, el comportamiento dinámico (variaciones de flujos, temperaturas, concentración así como envejecimiento de equipos) de los sistemas bajo estudio hace necesario considerar la incertidumbre en las condiciones de operación.

Debido a la existencia de cierto grado de incertidumbre durante la operación puede que desde el punto de vista práctico no se pueda asegurar el diseño de la red, incluso que esta no sea capaz por sí misma de asumir las posibles fluctuaciones en las condiciones de operación (Klemeš et al., 2013).

Pocos son los autores que han tratado la temática de la controlabilidad y el comportamiento dinámico de las RIC. Para resolver este problema se necesita encontrar una solución para el esquema de control (algoritmos de control avanzados o controles PID tradicionales) en correspondencia con el diseño propuesto después de la integración de energía y el reajuste del proceso (Morar & Agachi, 2010).

En general, los dos enfoques son complementarios y se pueden usar ampliamente para brindar una mejor comprensión a través de la visualización (AP) y el manejo de problemas complejos (PM). Una combinación de ambos enfoques se presentó por (Manan et al., 2009) para la minimización simultánea de agua y energía en las plantas de procesos. En la Figura 2 se resumen las ideas planteadas anteriormente.

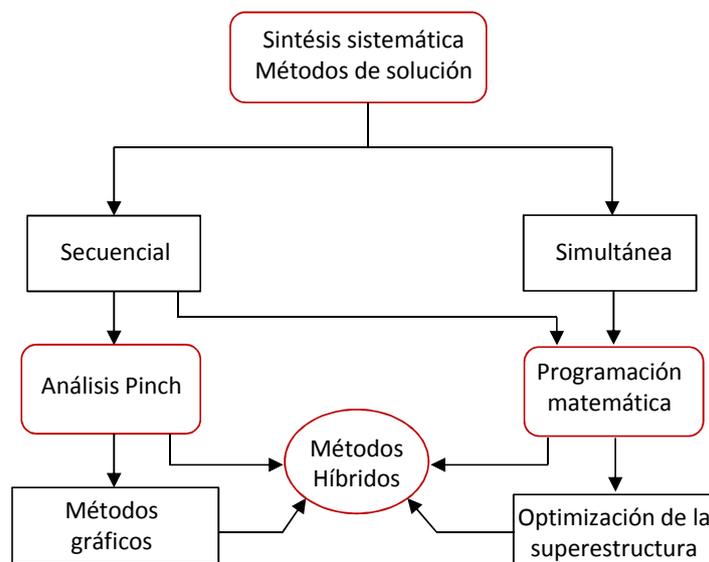


Figura 2. Clasificación de los métodos para la integración de agua y energía (Ahmetovi et al., 2015)

2.4. Aplicaciones en la industria de la caña de azúcar

En el caso de la industria cañera la IP se ha empleado particularmente con el objetivo de hacer un uso más eficiente de la energía. Las temáticas más abordadas han sido la reducción de la demanda de vapor en el proceso así como la evaluación de diferentes configuraciones para los sistemas de cogeneración. En esta dirección se tienen los trabajos realizados por varios investigadores (Catá y col., 2005; Corso y col., 2011; Dias et al., 2011a; Dias et al., 2013; Dias et al., 2011b; Espinosa y Espinosa, 2014; Pérez y col., 2014) los cuales constituyen solo ejemplos teniendo en cuenta los objetivos de este trabajo.

Por otra parte, la temática IP-agua en el sector azucarero también se ha tratado por varios autores, aunque no en la misma magnitud que el tema energético. Para reducir los consumos de agua (Chávez-Rodríguez y col., 2013) desarrollaron un método heurístico que permite suplir las demandas de agua según las calidades de las fuentes disponibles en un complejo azucarero. Empleando la PM, (González et al., 2010) obtuvieron un modelo de optimización que permitió una reducción del 85% en el consumo de agua del proceso de producción de azúcar.

Las posibilidades que ofrecen los procesos de fabricación de azúcar y etanol para su integración ha motivado la aplicación de la IP. En este sentido (Fabelo y col., 2013) analizaron las posibilidades de reducir los consumos de vapor en la operación de una destilería a partir de la aplicación del AP. En dicho trabajo se analizaron varias estrategias de integración másica para el proceso de fermentación, identificándose aquellas que reducen el consumo de agua. Así mismo, (González y col., 2013) llevaron a cabo un estudio similar al anterior pero en este caso consideraron dos escenarios, los cuales están dados por la existencia o no de desvío de jugos para el proceso de destilación.

La combinación del AP y la PM se empleó para el análisis de un complejo fabril compuesto por una fábrica de azúcar, una papelera, una destilería y una planta de Levadura Torula. La utilización de estas herramientas permitió la reducción en los consumos de agua y energía, así como la cantidad de residuales acuosos, Catá (2004).

Por otro lado (Albarelli et al., 2014) aplicaron el AP en un complejo azucarero integrado a la producción de etanol de segunda generación. En este trabajo demostraron la posibilidad de reducir los consumos de agua a partir de la integración energética. (Pina et al., 2015) estudiaron diferentes escenarios de operación de un complejo azucarero integrado a la producción de etanol aplicando el AP. Lograron reducir el consumo de vapor en un 35%, lo que repercutió en disminuciones en los requerimientos de agua del 24% y 13% para cada uno de los escenarios analizados en el estudio.

En los trabajos anteriores (Albarelli et al., 2014; Fabelo y col., 2013; González y col., 2013; Pina et al., 2015), a pesar de que se logran reducir los requerimientos de agua, esta disminución es una consecuencia de la integración energética. En ninguno de ellos queda planteada una estrategia con base en las técnicas de AP para el manejo del agua y por tanto no existen propuestas que permitan optimizar la red de agua del complejo azucarero integrado. En lugar de llevar a cabo la integración simultánea de agua y energía, se resuelve primero el problema energético y luego se utilizan los resultados como datos de entrada para la minimización del agua (enfoque secuencial) (Urbaniec & Klemeš, 2008).

Una solución a la integración simultánea de agua y energía aplicada a la industria azucarera fue dada por (González et al., 2011). En este trabajo se propuso una metodología que sigue el algoritmo general presentado en la Figura 3.

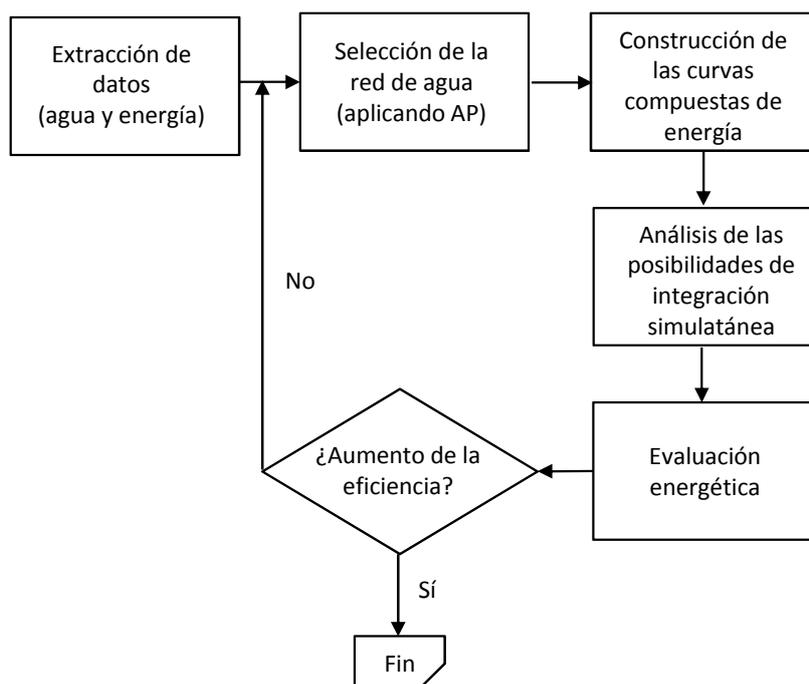


Figura 3. Algoritmo para la integración simultánea de agua y energía

En el trabajo se aplicaron los criterios dados por (Savulescu et al., 2005 a,b) para la integración simultánea de agua y energía. En este caso lo más significativo es que para cada propuesta de rediseño de la red de agua se analizó su impacto desde el punto de vista energético. Se demostró la posibilidad de alcanzar ahorros en los consumos de agua y energía de un 85% y 69% respectivamente. Este trabajo constituye el único ejemplo encontrado en la bibliografía consultada donde se aplica la integración simultánea de agua y energía en la producción de azúcar.

2.5. Nuevos horizontes

Muy ligado a la necesidad de contar con procesos más eficientes, que permitan lograr productos de mayor valor agregado al menor costo y daño ambiental posible, se encuentra el concepto de biorrefinería. Una biorrefinería es un complejo que integra los equipos y procesos de conversión de biomasa para producir combustibles, potencia y productos químicos de alto valor agregado a partir de la biomasa minimizando los residuos y las emisiones, Demirbas (2010).

En Cuba varios autores han tratado el tema de las rutas a seguir para lograr la conversión del complejo azucarero en una biorrefinería así como los riesgos a tener en cuenta durante la integración (Arteaga Pérez y col., 2014; Gordis y col., 2014; Martínez y col., 2014). Teniendo en cuenta las oportunidades que ofrece la biorrefinería como complejo industrial es vital la aplicación de la IP para lograr una mejor comprensión, análisis y síntesis de soluciones con un alto grado de integración. En este contexto un adecuado tratamiento de la interacción agua-energía es fundamental.

Mientras que la integración de agua y energía ha sido considerada fundamentalmente para los procesos continuos, poca atención se le ha prestado al desarrollo de estrategias para los procesos discontinuos. Sobre estos temas pueden ser consultadas las revisiones hechas por (Méndez et al., 2006) y (Fernández et al., 2012).

Este es un campo que, en el caso de la industria azucarera en general y en particular en Cuba, ha sido poco estudiado. Al igual que para otras industrias de proceso esto ha estado dado por dos razones fundamentales. Primeramente, hasta hace pocos años la mayoría de las industrias de procesos han sido diseñadas para operar cercanas al estado estacionario y en modo continuo. En segundo lugar, las técnicas de IP para las operaciones en estado no estacionario implican un mayor reto que aquellas operaciones en estado estacionario. Por tanto, las contribuciones en el campo de la IP en procesos discontinuos han venido de un limitado número de investigadores, Majози (2010).

Este escenario está cambiando dada la necesidad de producir productos químicos capaces de satisfacer las diversas demandas del mercado, el incremento en el nivel de flexibilidad y el surgimiento de nuevos sectores industriales, tales como las biorrefinerías, que favorecen los procesos discontinuos, Majози (2010).

En una biorrefinería basada en biomasa lignocelulósica, como es el caso de la caña de azúcar, se produce azúcar, etanol, electricidad, así como otros productos de valor agregado y son varias las operaciones que se llevan a cabo en modo discontinuo. Ejemplo de ello son la elaboración de las masas cocidas en los tachos para la producción de azúcar y la fermentación alcohólica.

El pretratamiento del material lignocelulósico, del que se separan tres corrientes fundamentales: celulosa, hemicelulosa y lignina (Dimian & Sorin, 2008; Johnson et al., 2009), es otro proceso presente en una biorrefinería. Métodos de pretratamiento como los ácidos, oxidativos así como los de autohidrólisis, se llevan a cabo por lotes (Johnson et al., 2009).

En Cuba las técnicas de IP en procesos discontinuos se han aplicado con el objetivo de estabilizar los consumos de vapor en la estación de tachos de un central azucarero (Espinosa y Espinosa, 2009). Este trabajo es el único de su tipo encontrado en la bibliografía consultada. En el mismo se demuestra la posibilidad de reducir los consumos de vapor en un 10%.

Las principales investigaciones en Cuba sobre IP en procesos discontinuos en un complejo azucarero han sido desarrolladas por investigadores del Centro de Análisis de Proceso de La Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. Entre las principales temáticas se encuentran: los procesos de prefermentación y fermentación alcohólica, la obtención de bioetanol a partir de bagazo así como la planificación de las operaciones en el complejo industrial (Albernas y col., 2012; Albernas y col., 2011a; Albernas y col., 2011b)

3. CONCLUSIONES

1. Los nexos existentes entre los consumos de agua y energía hacen que los proyectos de ahorro deban ser abordados desde ambas direcciones. Lo anterior implica que cualquier estrategia que pretenda optimizar la operación de un sistema debe considerarlos de manera simultánea y no independientemente. Esta idea ha sido tratada por varias de las metodologías de la IP para la minimización de los requerimientos térmicos y de agua.
2. En la industria azucarera la integración de agua y energía se ha tratado con un enfoque secuencial fundamentalmente. No obstante la aplicación de la integración simultánea de agua y energía en un complejo azucarero representa una herramienta eficaz en el incremento de la eficiencia de los procesos que en él tienen lugar. Por otra parte aún deben ser mayores los esfuerzos en aras del desarrollo de modelos que permitan explotar las sinergias de estos sistemas.
3. La necesidad de convertir los complejos azucareros cubanos en biorrefinerías impone la necesidad de expandir la integración energética y másica más allá de los procesos continuos, incluyendo así los procesos discontinuos.

REFERENCIAS

- Ahmetovi , E., Martín, M., Grossmann, I.E., Optimization of energy and water consumption in corn-based ethanol plants., *Ind Eng Chem Res*, Vol. 49, No.17, 2010, pp. 7972-7982.
- Ahmetovi , E., Kravanja, Z., Simultaneous synthesis of process water and heat exchanger networks., *Energy*, Vol. 57, No. 1, August, 2013, pp. 236-250.
- Ahmetovi , E., Kravanja, Z., Simultaneous optimization of heat-integrated water networks involving process-to-process streams for heat integration., *Appl Therm Eng*, Vol. 62, No.1, 2014, pp. 302-317.
- Ahmetovi , E., Ibri , N., Kravanja, Z., Grossmann, I.E., Water and energy integration: A comprehensive literature review of non-isothermal water network synthesis., *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 82, No. 2, November, 2015, pp.144-171.
- Albarelli, J.Q., Ensinas, A.V., Silva, M.A., Product diversification to enhance economic viability of second generation ethanol production in Brazil: the case of the sugar and ethanol joint production., *Chem Eng Res Des*, Vol. 92, No.8, 2014, pp. 1470-1481.
- Albernas Y., González, M., Mesa, L., Pedraza, J., González, E., El Bioetanol de Bagazo con el Enfoque de Sistemas Discontinuos y Fenómeno de Espera., VII Conferencia

- Internacional de Energía Renovable, Ahorro de Energía y Educación Energética. Palacio de las Convenciones, La Habana, Cuba, 2011a.
- Albernas Y., González, M., Pedraza, J., González, E. Visión Global Sobre la Planificación de Procesos Discontinuos., *AFINIDAD*, Vol. 68, No. 553, 2011b, pp. 203-209.
- Albernas, Y., Corsano, G., González, M., Verelst, H., González, E., Metodología para la síntesis y diseño óptimo de plantas discontinuas., *AFINIDAD*, Vol. 69, No.560, 2012, pp. 295-300.
- Alfa Laval., Don't think of it as waste-it's energy in waiting., <local.alfalaval.com/engb/aboutus/news/Pages/WasteHeatRecovery.aspx>.2011.Consulta: 25/09/2015.
- Arteaga Pérez, L.E., Cabrera Hernández, J., Rodríguez-Machín, L., Casas-Ledón, Y., Termoconversión de residuos sólidos de la industria azucarera para incrementar la sostenibilidad de los procesos., *Centro Azúcar*, Vol. 41, No.1, 2014, pp. 1-11.
- Bagajewicz, M.J., Rodera, H., Savelski, M.J., Energy efficient water utilization systems in process plants., *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 26, No.1, 2002, pp. 59-79.
- Bazilian, M., Rogner, H., Howells, M., Hermann, S., Arent, D., Gielen, D., Steduto, P., Mueller, A., Komor, P., Tol, R.S.J., Yumkella, K.K., Considering the energy, water and food nexus: towards an integrated modelling approach., *Energy Policy*, Vol. 39, No.12, 2011, pp. 7896-7906.
- Biegler, L.T., Grossmann, I.E., Westerberg, A.W., Systematic methods of chemical process design., Prentice-Hall, New Jersey, Chapter 4, 1997, pp. 495-527.
- Biegler, L.T., Recent advances in chemical process optimization., *Chemie Ingenieur Technik*, Vol. 86, No.7, 2014, pp. 943-952.
- Bogataj, M., Bagajewicz, M.J., Synthesis of non-isothermal heat integrated water networks in chemical processes., *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 32, No.12, 2008, pp. 3130-3142.
- Catá, Y., Análisis de la posibilidad de integración en un complejo de fabril considerando la incertidumbre., Tesis presentada en opción al título Máster en la Industria de los Procesos Químicos, Universidad Central Marta Abreu de Las Villas, Cuba, 2004.
- Catá, Y., González, C., González, S., Corsano, G., Análisis complejo de procesos para lograr un mejor uso de la energía térmica en una fábrica de azúcar., *Centro Azúcar*, Vol. 32, No.2, 2005.
- Corso, Y., González, C.M., González, M.V., González, S.E., Factibilidad de la integración energética entre los procesos de fabricación de azúcar y alcohol., *Centro Azúcar*, Vol. 38, No. 1, 2011, pp. 87-94.
- Chavez-Rodriguez, M.F., Mosqueira-Salazar, K.J., Ensinas, A.V., Nebra, S.A., Water reuse and recycling according to stream qualities in sugar ethanol plants., *Energy Sustain Dev*, Vol. 17, No.5, 2013, pp. 46-54.
- Demirbas, A., Biorefinery technologies for biomass upgrading., Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects., *Energy Sources*, Vol. 32, No.16, 2010, 1547-1558.

- Dias, M.O.S., Cunha, M.P., Jesus, C.D.F., Rocha, G.J.M., Pradella, J.G.C., Rossell, C.E.V., Filho, R.M., Bonomia, A., Second generation ethanol in Brazil: Can it compete with electricity production?., *Bioresource Technology*, Vol. 102, No.19, 2011a, pp. 8964-8971.
- Dias, M.O.S., Modesto M., Ensinas A.V., Nebra S.A., Filho R.M., C.E.V., R., Improving bioethanol production from sugarcane: evaluation of distillation, thermal integration and cogeneration systems., *Energy*, Vol. 36, No.6, 2011b. pp. 3691-3703.
- Dias, M.O.S., Cunha, M.P., Jesus, C.D.F., Rossell, C.E.V., Filho, R.M., Bonomia, A., Junqueira, T.L., Cavaletta, O., Mantelatto, P.E., Cogeneration in integrated first and second generation ethanol from sugarcane., *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 91, No. 8, 2013, pp. 1411-1417.
- Dimian, A.C., Sorin, B.C. *Chemical Process Design., Computer-Aided Case Studies.* WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Chapter 15, 2008, pp. 429-459.
- Espinosa, R., Espinosa, M.J.U., Integración de potencia y proceso en un ingenio productor de azúcar crudo., *Centro Azúcar* Vol. 40, No.4, 2014, pp. 25-29.
- Fabelo, J.A., González, M., González, E., Análisis del manejo eficiente del agua y la energía en una destilería de etanol., *Centro Azúcar*, Vol. 40, No.2, 2013, pp. 1-10.
- Fernández, I., Renedo, C.J., Ortiz, A., A review: Energy recovery in batch processes., *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No.4, 2012, pp. 2260- 2277.
- González, M., Verelst, H., Espinosa, R., González, E., Water and Wastewater Management in a Sugar Process Production., *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 25, June, 2011, pp. 839-844.
- González, M., Verelst, H., Espinosa, R., González, E., Simultaneous Energy and Water Minimization Applied to Sugar Process Production., *Chem Eng Trans*, Vol. 25, 2011, pp.177-182.
- González, M., González, E., Espinosa, R., Albernas, Y., Feijoo, J., Análisis de factibilidad de la integración de los procesos de producción de azúcar y alcohol., *AFINIDAD*, Vol.70, No.564, 2013, pp. 284-288.
- Gordis, C., González, C., Albernas, Y., Espinosa, P., Quintero, V., González, E., Consideraciones para el análisis de riesgo en la integración de procesos para la conversión de fábricas de azúcar en biorefinerías., *Centro Azúcar*, Vol. 41, No.1, 2014, pp. 41-49.
- International Energy Outlook. U.S. 2013., *Energy Information Administration.* Washington, DC: Office of Energy Analysis, (Ed.) U.S.D.o. Energy, pp. 127-131.
- Johnson, Elander, D.K., Richard T., Pretreatments for Enhanced Digestibility of Feedstocks., en: *Biomass Recalcitrance*, Blackwell Publishing Ltd, 2009, pp. 436-453.
- Karuppiah, R., Peschel, A., Grossmann, I.E., Martín, M., Martinson, W., Zullo, L., Energy optimization for the design of corn-based ethanol plants. *AIChE J*, Vol.54, No.6, 2008, pp. 1499-1525.

- Kim, J.Y., Kim, J.K., Kim, J.H., Yoo, C.K., Moon, I., A simultaneous optimization approach for the design of wastewater and heat exchange networks based on cost estimation., *Journal of Cleaner Production*, Vol. 17, No.2, 2009, pp. 162-171.
- Klemeš, J., Varbanov, P., Kravanja, Z., Recent developments in Process Integration. *Chemical Engineering Research and Design*, Vol.91, No.10, 2013, pp. 2037-2053.
- Leewongtanawit, B., Kim, J.K., Synthesis and optimisation of heat-integrated multiple-contaminant water systems., *Chemical Engineering Progress*, Vol. 27, No.4, 2008, pp. 670-694.
- Linnhoff, B., Townsend, D.W., Boland, D., Hewitt, G.F., Thomas, B.E.A., Guy, A.R., Marsland, R.H., *User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy*, 1st ed, IChemE, Rugby, Chapter 4, 1982, pp. 99-159.
- Majozi, T., *Batch Chemical Process Integration. Analysis, Synthesis and Optimization.*, Springer, Foreword, 2010, pp. vii-viii.
- Manan, Z.A., Tea, S.W., Wan Alwi, S.R., A new technique for simultaneous water and energy minimisation in process plant., *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 87, No.11, 2009, pp. 1509-1519.
- Martínez, Y., De Armas, A.C, González, E., Kafarov, V., Propuesta de alternativa para la transformación de una fábrica de azúcar en biorrefinería., *Centro Azúcar*, Vol. 41, No.1, 2014, pp. 92-99.
- Méndez, C.A., Cerdá, J., Grossmann, I.E., Harjunkoski, I., Fahl, M., State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes., *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 30, No.6, 2006, pp. 913-946.
- Morar, M., Agachi, P.S., Review: Important contributions in development and improvement of the heat integration techniques., *Computers and Chemical Engineering*, Vol. 34, No.8, 2010, pp. 1171-1179.
- Pérez, L.D., González, M., Espinosa, P., Integración de procesos y análisis de cogeneración en las producciones de azúcar y alcohol., *Centro Azúcar*, Vol. 41, No.4, 2014, pp. 50-58.
- Pina, E.A., Palacios-Bereche, R., Chavez-Rodriguez, M.F., Ensinas, A.V., Modesto, M., Nebra, S.A., Reduction of process steam demand and water-usage through heat integration in sugar and ethanol production from sugarcane evaluation of different plant configurations., *Energy*, 2015, Disponible en la red: 27 de julio. [DOI:10.1016/j.energy.2015.06.054](https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.06.054).
- Polley, G.T., Núñez, M.P., López-Maciél, J.J., Design of water and heat recovery networks for the simultaneous minimisation of water and energy consumption., *Applied Thermal Engineering*, Vol.30, No.16, 2010, pp. 2290-2299.
- Savulescu, L.E., Kim, J.K., Smith, R., Studies on simultaneous energy and water minimisation, Part II: systems with maximum re-use of water., *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, No.12, 2005a, pp. 3291-3308.
- Savulescu, L.E., Kim, J.K., Smith R., Studies on simultaneous energy and water minimisation, Part I: systems with no water re-use *Chemical Engineering Science*, Vol. 60, No.12, 2005b, pp. 3279-3290.

- Savulescu, L., Kim, J.K., Novel methods for combined energy and water minimisation in the food industry. en: Handbook of water and energy management in food processing, 2008, pp. 304-331.
- Savulescu, L.E., Alva-Argáez, A., Direct heat transfer consideration for improving energy efficiency in pulp and paper Kraft mills. Energy, Vol. 33, No.10, 2008, pp.1562-1567.
- Thongpreecha, S., Siemanond, K., Water and heat exchanger network design for fixed flowrate system. Chemical Engineering Transactions, Vol. 39, 2014, pp. 193-198, DOI:10.3303/CET1439033.
- Urbaniec, K., Klemeš, J. Water and energy management in the sugar industry, en: Handbook of water and energy management in food processing, 2008, pp. 863-882.
- Wan Alwi, S.R., Ismail, A., Manan, Z.A., Handani, Z.B., A new graphical approach for simultaneous mass and energy minimisation., Appl Therm Eng, Vol. 31, No.6 and No.7, 2011, pp. 1021-1030.
- Yee, T.F., Grossmann, I.E., Kravanja, Z., Simultaneous optimization models for heat integration. I. Area and energy targeting and modeling of multi-stream exchangers., Computers & Chemical Engineering, Vol. 14, No.10, 1990, pp. 1151-1164.