

Uso Eficiente del Agua en Ingenios Azucareros

Alejandra Ingaramo, Humberto Heluane, Mauricio Colombo, Tomás Argüello, Mario Cesca

El impacto que produce el alto consumo de agua en regiones donde este recurso es limitado, alienta al desarrollo de nuevas técnicas que permitan analizar la administración eficiente del agua en las industrias y que comúnmente se concreta realizando balances detallados para diferentes configuraciones propuestas de uso de agua. En este trabajo se presenta una metodología alternativa, mediante el cálculo de un índice (IUA) que permite diagnosticar la eficiencia del uso del agua en la industria azucarera y analizar las mejoras cuando se incorporan en el proceso sistemas de reuso y recirculación de agua.

Para el cálculo del índice se proponen seis circuitos posibles de uso del agua y se asumen, para determinar las corrientes de purgas y pérdidas, valores que resultan de considerar que los equipos que intervienen en cada circuito trabajan en su máxima eficiencia.

A modo de ejemplo, se calculó el índice IUA para la situación operativa y estructural del Ingenio Concepción (Tucumán, Argentina) y se analizan las mejoras relativas para las distintas estrategias de uso del agua.

Palabras Clave: Reuso de agua, Reciclo de agua, Industria azucarera

Efficient use of water in sugar mills

High consumption of water has a great impact in regions where water is a limited resource. This fact encourages the development of new techniques for efficient industrial water management. Frequently, water management techniques are based on detailed conservation balances for different alternatives of water reuse or recirculation. In this work, an alternative methodology is presented. A new index IUA is defined and calculated for a case study. The IUA index allows the diagnosis of water use efficiency in sugar industry and also allows the analysis of improvements obtained by adding cycles of water reuse or recirculation to the process.

In order to calculate the IUA index, six circuits of water reuse or recirculation are proposed. For each circuit, purges and losses are determined for working equipment at maximum efficiency.

The index was calculated for an operative and structural scenario of the Concepción Sugar Mill (Tucumán, Argentina) and the potential improvements are analyzed for different strategies of water use.

Key words: Water reuse, Water recycle, Sugar mills

Introducción

Si bien las industrias de alimentos no se encuentran entre las más agresivas para el medio ambiente, éstas pueden causar una severa contaminación orgánica si son diseñadas u operadas sin una política adecuada de protección del medio ambiente. Entre los problemas ambientales comúnmente asociados a la industria alimentaria se pueden mencionar alto consumo de agua, generación de efluentes líquidos con alta carga orgánica, grandes cantidades de residuos sólidos, etc. El presente trabajo enfoca el problema del alto consumo de agua en regiones donde este recurso es escaso y propone esquemas de uso que tienden a reducir el consumo de agua de fuentes naturales. Desde el punto de vista ambiental, la gestión racional del uso de agua en la industria debe ser considerada como una parte esencial de todo proceso productivo por lo que convendría definir la mayor cantidad de ciclos de reuso o recirculación de agua siempre que las propiedades físico químicas (temperatura, contenido de contaminantes, etc) lo permitan. En el caso de la industria azucarera el agua necesaria en el proceso de fabricación puede provenir de dos fuentes:

- el agua contenida en la caña de azúcar y que se recupera en los procesos de evaporación, cocimiento de crudo y refinera, y
- el agua de cursos y pozos naturales que se consume principalmente en los condensadores barométricos, en el lavado de humos, como agua de refrigeración para las turbinas y máquinas, etc.

La filosofía de efluente cero plantea el reuso o reciclaje de agua de manera de reducir lo más posible la cantidad de agua fresca alimentada al proceso de fabricación (Hsieh, et al, 1995). Esto contribuye a un ahorro económico importante y a la conservación de los recursos naturales, en particular, en los lugares donde la zafra se realiza en épocas de sequía. En la bibliografía se pueden encontrar diferentes propuestas tendientes a mejorar el uso del agua en las industrias (Ramjeawon T., 2000; Bagajewicz et al, 2002; Kim et al., 2004).

Este trabajo tiene como objetivo establecer una metodología que permita determinar la eficiencia en el uso del agua de ingenios azucareros de forma tal que puedan evaluarse configuraciones alternativas de reuso y/o recirculación de agua. Para ello se propusieron seis posibles ciclos de uso de agua que se plantearon teniendo en cuenta el contenido de contaminantes en cada corriente. Se asumieron para cada ciclo pérdidas y/o purgas. Se definió un índice que permite medir cuán cerca se está de usar la mínima cantidad de agua fresca y se lo calculó para un caso de estudio. Debido a que el agua es un recurso imprescindible para la vida, el uso racional de este recurso implicaría en la práctica una optimización por objetivos con trasfondo económico.

Ciclos de uso de agua

Este trabajo propone seis circuitos posibles de uso de agua que se esquematizan en la figura 1:

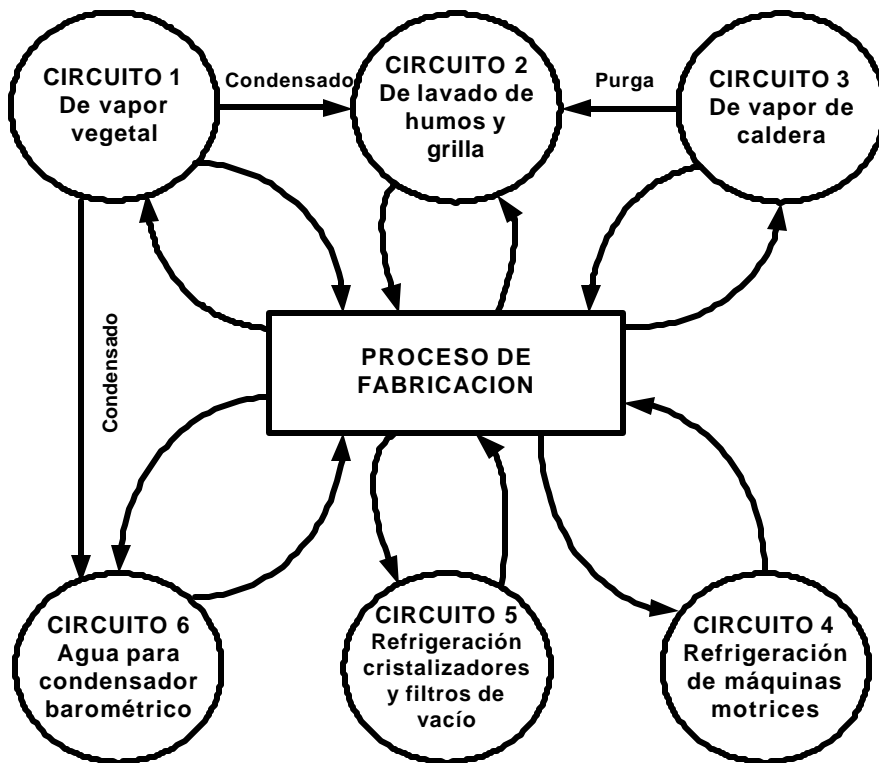


Fig. 1 Seis posibles circuitos de uso racional de agua en un ingenio azucarero y su interrelación

- CIRCUITO 1: de recuperación de los condensados de vapor vegetal
- CIRCUITO 2: de lavado de humos y grilla
- CIRCUITO 3: de generación de vapor de caldera
- CIRCUITO 4: de refrigeración de máquinas motrices
- CIRCUITO 5: de agua de refrigeración de cristalizadores y filtros de vacío
- CIRCUITO 6: de agua para condensadores barométricos

Características de los ciclos de uso de agua

El circuito 1 recupera los condensados de vapor vegetal provenientes de los evaporadores y tachos de cocimiento para utilizarlos como agua de imbibición, agua de lavado en centrifugas de crudo y refinado, agua de disolución en refinería, lavado de tachos, trapiche y filtros. Esta es una estrategia de reuso que se emplea en todos los ingenios azucareros con diverso grado de integración. Para eliminar gases incondensables de los vapores vegetales es necesario realizar una purga en este circuito mediante venteo de vapores. El exceso de condensado vegetal que arrastra azúcares podría derivarse a dos consumidores:

- a) Al circuito de limpieza de grillas de calderas y lavado de humos que es una practica usada en algunos ingenios
- b) Como agua de reposición al circuito de agua de condensadores barométricos.

Lo que resta del exceso de agua vegetal es un efluente (agua dulce) que se descarga usualmente al ambiente.

El circuito 2 corresponde al lavado de humos y grilla. Los efluentes del limpiador de gases y parrilla pueden ser filtrados y usados nuevamente como alimentación en el sistema. En este circuito existen pérdidas por evaporación y arrastre. Para compensarlas, se alimenta al sistema agua vegetal y la purga de la caldera ya que la carga de contaminantes en dichas corrientes es compatible con la que circula en esta operación. El efluente resultante del sistema de filtrado es un lodo que podría ser secado y usado para acondicionar el suelo.

El circuito 3 es el de generación de vapor de la caldera. La mayor parte del vapor vivo generado se condensa y retorna a la caldera después de ser usado. Este es un circuito de uso generalizado en la industria azucarera. Existen algunas pérdidas de vapor o de condensado debido al goteo en las juntas, al accionamiento de válvulas de seguridad, etc. Para mantener la concentración de sólidos en el agua de la caldera es necesario purgar por medio de una corriente de agua que tiene solamente sales disueltas por lo que sería viable reusarla para el lavado de humos y grilla. El agua de reposición de la caldera puede ser agua ablandada o de condensa-

do de vapor vegetal de primer o segundo efecto.

El circuito 4 corresponde al de refrigeración de máquinas motrices. Para poder implementar este circuito es necesario disponer de un sistema de enfriamiento que permita disminuir la temperatura del agua para que sea utilizada nuevamente como refrigerante. Además, el agua que circula arrastra aceite y grasa y por lo tanto será necesario contar con un separador de grasa. En este sistema, las pérdidas por evaporación son pequeñas. El efluente en este caso es grasa y aceite y prácticamente no contiene agua.

El circuito 5 permite usar nuevamente el agua de refrigeración de cristalizadores y filtros de vacío. En este caso el incremento de temperatura del agua es poco y por lo tanto las pérdidas por evaporación pueden considerarse despreciables.

El circuito 6 es el de agua para condensadores barométricos. Esta representa el mayor volumen de agua usada en el proceso de fabricación de azúcar, debido fundamentalmente a la baja eficiencia de los condensadores barométricos en la transferencia de energía, y puede ser reciclada empleando algún sistema de enfriamiento para mantener una diferencia de temperatura entre la entrada y salida del condensador (Wright, 1992). En este circuito hay pérdidas asociadas a la evaporación y al arrastre producido en el proceso de enfriamiento. Para evitar la concentración de azúcares en este circuito es necesario realizar una purga continua. Usualmente, el agua de reposición proviene de cursos de agua próximos a la fábrica pero lo que se propone en este trabajo es mejorar la calidad de agua de reposición reusando parte del agua del circuito 1 que es la que proviene del condensado de vapor vegetal del segundo efecto.

En los circuitos de refrigeración de máquinas motrices y de agua de enfriamiento para cristalizadores y filtros de vacío el agua de reposición podría ser externa.

El agua de limpieza, de uso de laboratorio y de sanitarios se toma de los cursos naturales. El reuso de los efluentes implica tratamientos primarios y secundarios.

Índice de uso de agua

Para medir la eficiencia con la que se utiliza el agua en un ingenio azucarero se define un Índice de Uso de Agua (IUA) como en la (1):

$$IUA = \frac{\text{Agua Real Consumida} - \text{Agua Mínima}}{\text{Agua Máxima} - \text{Agua Mínima}} = \frac{A_R - A_m}{A_M - A_m}$$

donde,

- **Agua real consumida (A_R):** es la cantidad de agua externa (fresca) cada 100 toneladas de caña molida

que se debe suministrar al proceso.

- **Agua Mínima (A_m):** se define como la mínima cantidad de agua externa por cada 100 toneladas de caña que se debe proporcionar al proceso suponiendo que se reusa y recircula el agua usando los 6 circuitos planteados en la figura 1 con niveles de máxima eficiencia en los distintos ciclos.
- **Agua Máxima (A_M):** es la cantidad de agua externa que se debe introducir en el proceso por cada 100 toneladas de caña si no se hace ningún reuso o reciclo de agua.

El índice *IUA* puede tomar dos valores extremos:

- Cero cuando el agua real consumida es la mínima necesaria para el proceso de fabricación y,
- Uno cuando el agua real que consume es la máxima.

Si se considera el proceso de fabricación como una caja

negra, a través de las fronteras del sistema se indicarán los siguientes flujos como puede verse en la figura 2:

FLUJOS DE SALIDA

- Flujo de agua en azúcar (producto), Flujo de bagazo, cachaza y melaza
- Flujo de agua que sale de condensadores barométricos
- Flujo de condensados de vapor vegetal
- Flujo de agua de caldera
- Flujo de agua utilizada para refrigeración de cristalizadores y filtros de vacío
- Flujo de agua para refrigeración de máquinas motrices
- Flujo de agua para lavado de humos y grilla

FLUJOS DE ENTRADA

- Flujo de agua que entra en la caña
- Flujo de agua externa que puede ser la máxima, la mínima o la real según la estructura del proceso de fabricación. Este es el flujo que se determinará haciendo balance de materia.

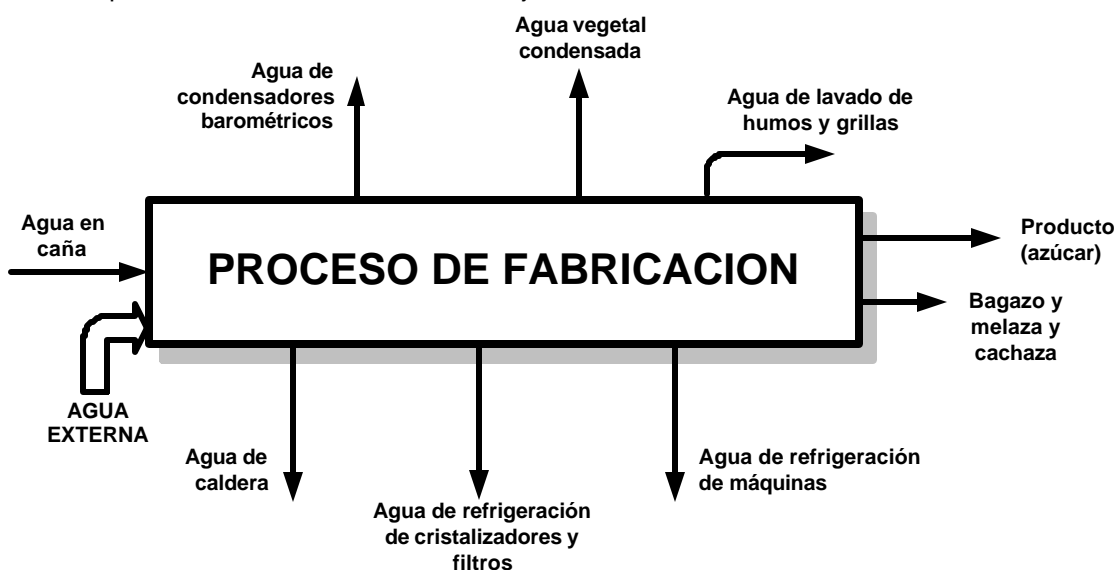


Fig. 2 Flujos de agua en el proceso de fabricación de azúcar que intervienen en el cálculo del agua externa

Del balance de materia de agua, en estado estacionario, queda:

$$\text{Flujo de agua externa} = \sum \text{Agua en productos y no productos} - \text{Agua en caña} + \sum \text{Pérdidas} \quad (2)$$

El flujo de agua externa puede ser máxima (A_M), mínima (A_m) o el agua real usada (A_R).

Agua en no productos es el agua contenida en todas las corrientes de salida a excepción del flujo de agua en azúcar. La metodología para poder calcular el índice de uso de agua (IUA) es la siguiente:

- Se esquematiza el proceso de fabricación detallando los flujos de agua que ingresan y salen a través de las fronteras de todo el proceso de obtención de azúcar de manera de poder calcular el agua real consumida.
- Se calcula el Agua Máxima mediante la siguiente ecuación:

$$A_M = \sum \text{Agua en productos y no productos} - \text{Agua en caña} + \sum \text{Pérdidas máximas} \quad (3)$$

- Se calcula el Agua Mínima considerando la existencia de los 6 circuitos en el proceso (figura 1), cada uno de ellos trabajando con máxima eficiencia y adoptando las mínimas pérdidas y purgas posibles, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$A_m = \sum \text{Agua en productos y no prod.} - \text{Agua en caña} + \sum \text{Pérdidas mínimas} + \sum \text{Purgas mínimas} \quad (4)$$

Los criterios que definen los niveles de máximo rendimiento para cada circuito se detallan en la tabla 1.

- Con los valores de agua real consumida, agua mínima y agua máxima se calcula el índice IUA.

Tabla 1 Valores de pérdidas y purgas postulados para el cálculo de Agua Mínima

Circuito 1	Purga	2% del vapor vegetal generado
	Pérdidas	Se calculan a partir del balance de masa
Circuito 2	Lodos	2.6 t/100t caña (Hsieh, 1995)
	Pérdidas	Evaporación y arrastre 3 t/100 t de caña (Hsieh, 1995)
Circuito 3	Purga	Para mantener los valores límites de sólidos solubles suspendidos de acuerdo con la presión de generación de vapor (Kemmer, 1988a)
	Pérdidas	4% del vapor generado en la caldera (Baloh y Wittwer, 1995)
Circuito 4	Pérdidas	0.9 % del agua de refrigeración que circula
Circuito 5	Purga	Cero
	Pérdidas	Despreciables
Circuito 6	Purga	Valor que asegure concentración de azúcares en el agua que ingresa a las torres sea 10 veces la del vapor que condensa (González Morel, 1998)
	Pérdidas	Evaporación en las torres: 1% del caudal circulante por cada 10 °F de disminución de temperatura. (Kemmer, 1988b). Arrastre en las torres: 0.2% del caudal circulante. (Ludwig, 1964)

El cálculo del índice IUA, permite evaluar de manera sencilla la eficiencia en el uso del agua en un ingenio azucarero. Además, permite identificar los sitios críticos de consumo de agua que son aquellos que hacen disminuir sensiblemente el índice de uso de agua cuando se implementa en el mismo un circuito de reuso o de recirculación.

Caso de estudio

Se aplicó la metodología propuesta para calcular el índice (IUA) del ingenio Concepción, CACSA, ubicado en Tucumán (Argentina). Esta fábrica que produce el 20% del total del azúcar de Argentina, es un complejo agroindustrial alcoholero-azucarero con una capacidad de molienda de 24.000 toneladas de caña por día. Los productos que genera son: 272.000 t/año de azúcar refinado para mercado interno y para exportación, 48.000 t/

año de azúcar crudo y 30.000.000 L/año de alcohol. La zafra en Tucumán corresponde a un período de bajas precipitaciones por lo que sería deseable reducir el consumo de agua externa.

El agua máxima se calculó considerando que no existe ningún circuito de reuso o recirculación de agua y los caudales de agua de las corrientes que resultan en este caso se muestran en la tabla 2.

Para calcular el valor del agua mínima, en base a información relevada en la planta, se determinaron los flujos de agua de las corrientes correspondientes a la figura 2 para lo que se calcularon las pérdidas y purgas (mínimas), como se indicó en la tabla 1, de los seis circuitos esquematizados en la figura 1.

Cálculo del agua real consumida: actualmente el Ingenio Concepción tiene implementado solamente tres circuitos (uno de reuso de agua y dos de recirculación) como se muestra en las figuras 3a) y 3b).

Tabla 2 Flujos de agua para el proceso del Ingenio Concepción sin ningún ciclo de agua

Corriente	Caudal de agua(t / 100 t caña)
Caña	68
Cachaza	3
Azúcar	0
Bagazo	18
Melaza	0.4
Agua condensada vegetal	77.4
Agua de caldera	63.1
Agua de condensadores barométricos	818.3
Agua de lavado de humos y grilla	60
Agua de refrigeración para máquinas (molinos y turbogenerador)	61.2
Agua de refrigeración de cristalizadores y filtro de vacío	21.9

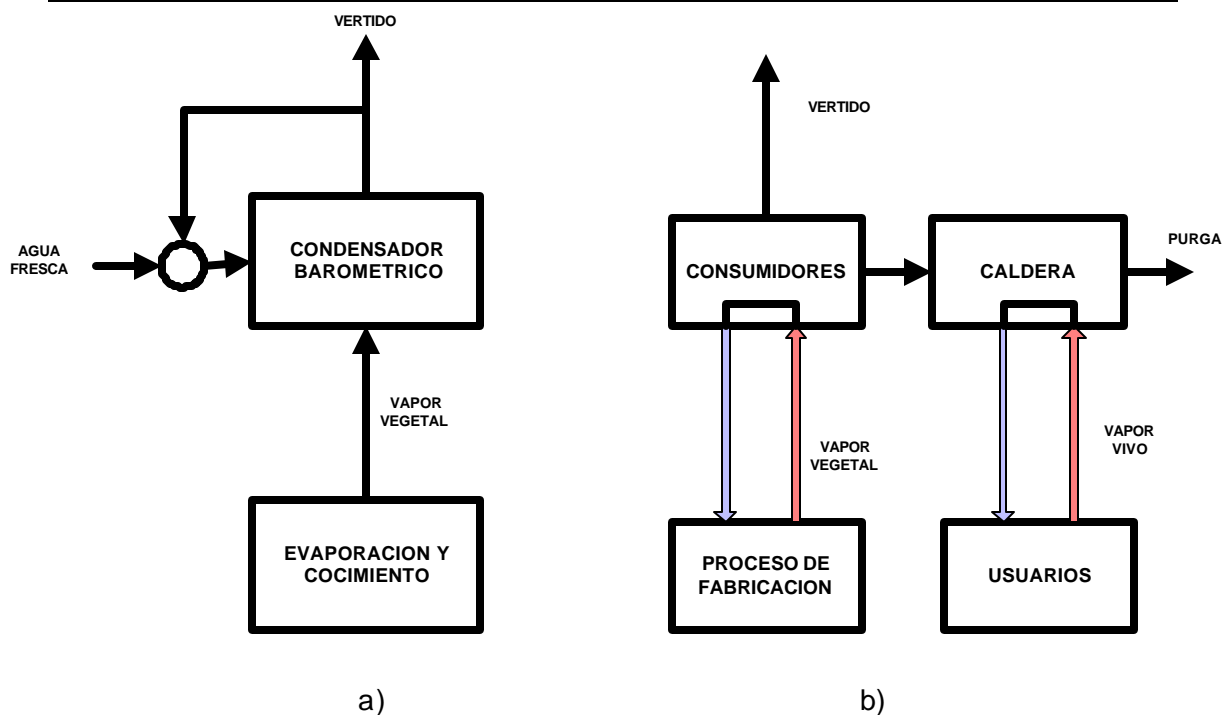


Fig. 3 Ciclos de agua actualmente en funcionamiento en el ingenio Concepción. a) recirculación parcial de agua de condensadores barométricos y b) reuso de agua vegetal y recirculación de agua de alimentación a la caldera.

Recientemente se puso en práctica una recirculación directa de agua de salida en los condensadores barométricos (ver figura 3 a). De esta forma se logra un trabajo más eficiente de condensación merced a mayores caudales internos (Snoad, 1998), lo que permite emplear menores saltos térmicos en el condensador. También posee una versión modificada del circuito de

calderas propuesto en este trabajo ya que en el caso de CACSA la reposición de agua se hace con parte de los condensados de vapor vegetal del segundo efecto. Con la configuración de trabajo actual de la planta se calcula la cantidad de agua real que utiliza ese ingenio que resulta ser igual a 610 t/100 t caña.

La tabla 3 muestra los valores obtenidos para el agua

mínima, agua máxima, agua real consumida por CACSA y del índice de uso de agua (*IUA*).

Tabla 3 Valores calculados para el Ingenio Concepción, expresados en t/100t de caña

Agua Mínima	3.1
Agua Máxima	1055.3
Agua Real consumida por Ing. Concepción	610
<i>IUA</i>	0.58

El índice (*IUA*) calculado de 0.58 indica que hay grandes mejoras potenciales en el uso del agua. Si se calculara el valor del índice implementando el circuito de agua en el condensador barométrico de la figura 1 el índice *IUA* se podría disminuir de 0.58 hasta un valor mínimo de 0.14. El ahorro potencial de agua que se lograría de esta forma sería de 44%. Si a la estructura actual que posee el ingenio se le agrega el ciclo de lavado de humos y grilla, operado, con la máxima eficiencia, el índice disminuiría de 0.58 a 0.52 lográndose un ahorro potencial de agua del 6%. Esto muestra la importancia relativa que tiene la implementación del circuito de recirculación de agua de condensadores en el ahorro de agua externa por lo que el condensador barométrico es un sitio crítico de consumo de agua.

Valores de *IUA* bajos implican volúmenes de agua contaminada menores que se descargan al ambiente con mayores concentraciones de contaminante. Por lo tanto, el empleo del *IUA* como indicador se debería complementar con otros índices que midan el impacto ambiental de los efluentes, de modo que la implementación de los circuitos se realice en forma sustentable.

Conclusiones

- Se definió un índice que permite analizar la eficiencia de utilización de agua en los ingenios azucareros. Dicho índice se basa en el consumo actual de agua de la fábrica respecto a dos valores de referencia.
- Se definió una metodología sistemática para calcular el índice.
- Se hizo el cálculo del índice (*IUA*) para un ingenio de la región y se mostró como emplearlo para el diagnóstico de la situación presente.
- Se constató que los mayores incentivos para recircular el agua se encuentran en el circuito de agua de condensadores que podría llevar el *IUA* de 0.58 a un valor límite de 0.14 si se operara este

sistema con el máximo rendimiento y reciclando el agua a través de un sistema de enfriamiento.

Agradecimientos

Este trabajo fue desarrollado en el marco del Proyecto WESAP (INT/01/K07) financiado por The Perez Guerrero Trust Fund of the Group of 77 a través del Programa de la Naciones Unidas Para el Desarrollo (PNUD) y del Programa Ingeniería de Sistemas de Procesos (auspiciado por el Consejo de Investigaciones de la Universidad Nacional de Tucumán).

Referencias

- Baloh, T y E. Wittwer (1995) *Energy Manual for Sugar Factories*, Baterns, Berlin, Alemania.
- González Morel, P., *Report of de Office of the Environmental and Natural Resources, U. S. Agency for International Development*.
- Hsie, W., Sheen, H. y Chen, C. (1995) *Proc. XXII Congr. ISSCT*, vol. 1, pp 226-231.
- Kemmer, F.N. (1988a) *The NALCO Water Handbook*, Section 38, 2nd ed., McGraw Hill, New York.
- Kemmer, F.N. (1988b) *The NALCO Water Handbook*, Section 39, 2nd ed., McGraw Hill, New York.
- Ludwig, E.E. (1964) *Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants*, Vol. 2. Gulf Publishing Co., Houston, USA, pp 194-199.
- Snoad, J. (1998) *Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol.* **20**, pp. 421-426.
- Wright, P. G. (1992) *Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol.* **14**, pp. 223-230.
- Ramjeawon T. (2000) *J.Cleaner Production*, **8**, pp.503-510.
- Kim, J. y Smith, R. (2004) *Ind. Eng. Chem. Res.*, **43**, pp. 608-613
- Bagajewicz M., Roderer, H. y Savelski, M. (2002) *Comp.Chem. Engng.*, **26** pp. 59-79

Alejandra Patricia Ingaramo

Ingeniero Químico egresada de la Universidad Nacional de Tucumán. Actualmente se desempeña como Jefe de Trabajos Prácticos en el área Control de Procesos, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología de la UNT. Especializada en Francia en el área Procesos Industriales. Investigadora categoría III, participa en el Programa del CIUNT "Ingeniería de Sistemas de Procesos". Miembro de la Comisión Académica de la Carrera de Ingeniería Química.

Humberto Heluane

Ingeniero Químico egresado de la Universidad Nacional de Tucumán. Actualmente se desempeña como Jefe de Trabajos Prácticos en el Departamento de Química, Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología, UNT. Participa como investigador en el Programa del CIUNT "Ingeniería de Sistemas de Procesos". Su área de interés es formulación y evaluación de proyectos, optimización de procesos, y medio ambiente.

Mauricio Colombo

Estudiante de Doctorado en la Universidad Nacional de Tucumán en el área energía. Ingeniero Químico egresado de la UNT donde se desempeña como Jefe de Trabajos Prácticos en la Cátedra de Diseño y Optimización de Procesos y Termodinámica de Procesos del Departamento de Química de la Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología.

Su área de interés incluye nuevas aplicaciones de software educacionales en el área de diseño de procesos donde acredita numerosas publicaciones y en el área de síntesis y optimización de procesos, energía y medioambiente.

Tomás Argüello

Ingeniero Químico egresado de la Universidad Nacional de Tucumán. Actualmente se desempeña en la Compañía Azucarera Concepción S.A. en la sección de calderas.

Area de interés: tratamiento de agua.

Mario Rodolfo Cesca

Ingeniero Químico UNT (1981). Profesor Asociado (DE) en el Departamento de Ingeniería Química de la FACET, UNT. Director del Proyecto WESAP. Defendió su tesis de doctor en Ingeniería Química en abril de 2004. Áreas de Interés: Control de procesos de equipos industriales de la industria agroalimentaria, síntesis de sistemas de control basados en modelos.