

## Titulo

# Uso y manejo del agua en el proceso de producción de azúcar

Lisbet Dignora Velásquez Salgado<sup>1</sup>, Meilyn González Cortés<sup>2</sup>, Víctor González Morales<sup>2</sup>, Erenio González Suárez<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Empresa Azucarera Antonio Sánchez. Covadonga. Aguada de Pasajeros. Cienfuegos.

<sup>2</sup>Centro de Análisis de Procesos. Facultad de Química Farmacia. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas. [mgonzalez@uclv.edu.cu](mailto:mgonzalez@uclv.edu.cu)

### Resumen

Las fábricas de azúcar consumen cantidades considerables de agua durante el procesamiento de la caña, de igual forma se desechan grandes volúmenes de agua que llevan consigo además de contaminantes, energía térmica que podría ser utilizada en el propio proceso. Se aplica una estrategia de solución matemática donde se optimizan las soluciones iniciales que nos ofrece la estrategia gráfica para el aprovechamiento de corrientes acuosas dentro del proceso y la consecuente reducción del vertido de residuales líquidos al medio. La optimización se realizó con el programa LINGO™, se obtuvo que el consumo de agua después de realizadas las modificaciones se reduce al mínimo y se realiza una valoración preliminar del impacto económico que esto trae.

**Palabras clave:** Producción de azúcar, consumo de agua, minimización consumo de agua, integración de masa, optimización.

### Abstract.

### Key Words:

## Introducción

La industria depende en alto grado de un adecuado abastecimiento de agua, la que se utiliza como componente de productos o de manera indirecta en el control del proceso de producción. En los últimos años el consumo de agua ha aumentado a razón de 1 a 1,5 % ciento por año.<sup>1</sup>

En 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, 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.

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.

Los estudios relacionados con el consumo de agua en las fábricas de azúcar comenzaron a desarrollarse hace muchos años. La característica más común en todos estos estudios es el enfoque parcial hacia alguno de los aspectos del proceso, por ejemplo: el porcentaje del agua de imbibición, o la visión de algunos de los aspectos del subsistema, como es el caso del sistema de condensado. El objetivo principal de este trabajo es analizar las posibilidades de reducción del consumo de agua en una fábrica de azúcar con el aprovechamiento de los recursos acuosos del

## Desarrollo

El uso del agua en los ingenios azucareros depende de varios factores, y los más importantes son los vinculados con su disponibilidad, calidad y temperatura. De esta forma es posible establecer las categorías siguientes:

- Uso del agua vinculada directamente al proceso productivo.
- Uso del agua vinculada indirectamente con el proceso productivo.
- Uso del agua no vinculada al proceso productivo.

El desarrollo de una agroindustria azucarera diversificada y con esquemas flexibles de producción, induce a un incremento en el nivel de contaminación que puede ser eliminado o atenuado con un adecuado uso y reuso del agua de proceso y la aplicación de los diferentes tratamientos que protejan al medio ambiente.<sup>1</sup>

La caña de azúcar contiene aproximadamente de un 73-76 % de agua, la misma se aprovecha como vapor vegetal para las etapas de cocción, en el cuádruple efecto y en los calentadores de jugo. En los evaporadores al jugo se le evapora la mayor cantidad de agua posible para concentrarlo; la mayor cantidad de agua evaporada proviene de la misma caña teniendo en cuenta también que durante el proceso se le incorpora agua como la de imbibición y la que contiene la lechada de cal.

Realizar un estudio del consumo de agua en el proceso de producción de azúcar con la finalidad de identificar las corrientes que se pueden incorporar de nuevo al proceso para disminuir el consumo de agua fresca y los posibles residuales que son contaminantes al medio ambiente resulta de gran beneficio e importancia para el proceso.

2.1 Reducción del consumo de agua y el vertimiento de residuales acuosos en una empresa azucarera

Para llevar a cabo la integración material, en la fábrica de azúcar se analizan las posibilidades de reducir el consumo de agua

fresca y el vertido de residuos acuosos a través de la implementación del reciclo del agua, por ser esta industria .<sup>2</sup>

El objetivo de esta etapa es disminuir los consumos de agua fresca a través del reciclo de los condensados generados durante el proceso, utilizando para ello la herramienta de integración de masa conocida como diagrama

fuente-sumidero para identificar las posibles soluciones de segregación, mezcla, reciclo o reuso e intersección.<sup>3, 4, 6</sup> Del diagrama se pueden identificar más de una variante de solución, por lo que esta herramienta siempre debe acompañarse de una estrategia de optimización a través de la que se obtenga la variante óptima en cuanto a la redistribución de flujos. De modo que se plantea la estrategia matemática para lograr dicho objetivo. Si se tiene en cuenta que el proceso tiene  $N_{sumideros}$  y  $N_{fuentes}$  y los  $N_{sumideros}$  se corresponden con el número de unidades que requieren agua fresca como entrada y en las fuentes (corrientes que llevan la especie de interés) se considerará sólo una fuente de agua fresca, siendo  $(N_{fuente} - 1)$  flujos de efluentes acuosos que pueden ser potencialmente reciclados.

La función objetivo y las restricciones. La solución debe converger a lograr el objetivo principal, minimizar el consumo de agua a través del reciclo de los efluentes.<sup>5</sup>

Función objetivo:  $\min L = \sum_{j=1}^{N_{sumidero}} L_{fuente, j}$   $j = 1, 2, \dots, N_{sumidero}$   
 donde:  $L_{fuente} = \sum_{j=1}^{N_{sumidero}} L_{fuente, j}$   $j = 1, 2, \dots, N_{sumidero}$   
 (1)

Sujeta a las restricciones de segregación, reciclo e intersección que se muestran a continuación:

· Balance de materiales en la fuente:  
 $L_m = \sum_{j=1}^{N_{sumidero}} l_{m, j}$   $m = 1, 2, \dots, N_{sumidero}$   
 (2)

· Balance de materiales en un sumidero:  
 $L_j^{sumidero} = \sum_{m=1}^{N_{fuente}} l_{m, j}$   $j = 1, 2, \dots, N_{sumidero}$   
 (3)

donde:  $l_{m, j}$  = flujo individual que pasa de una fuente (m) a un sumidero (j)

· Balance de composición de entrada a un sumidero:  
 $L_j^{sumidero} \times Z_j^{sumidero} = \sum_{m=1}^{N_{fuente}} l_{m, j}$   $j = 1, 2, \dots, N_{sumidero}$   
 (3.4)

donde:  $L_j^{sumidero}$  = flujo total que entra al sumidero(j),  
 $Z_j^{sumidero}$  = composición de entrada al sumidero(j)

Para la intersección de una fuente (m) puede plantearse que:

$$L_m (Z_m - Z_m^{int}) = \text{masa removida} \quad m = \text{fuente} \quad (3.5)$$

donde:

$Z_m^{int}$  = es la composición de la especie de interés en la fuente (m) después de la intersección

$Z_m$  = composición de la fuente (m).

En el modelo, pueden plantearse otras restricciones como son las de no-negatividad, la cual garantiza que no se obtengan valores negativos de flujo y composición, y en este caso además se plantearon restricciones para que no se reciclaran residuales a los sumideros que previamente se decidió utilizarían agua fresca.

En el caso de estudio se determina que la concentración de azúcar es el elemento decisivo para llevar a cabo el estudio. En las fábricas de azúcar se vierte un gran volumen de agua de calidad, la cual se puede incorporar a los equipos consumidores de la misma.

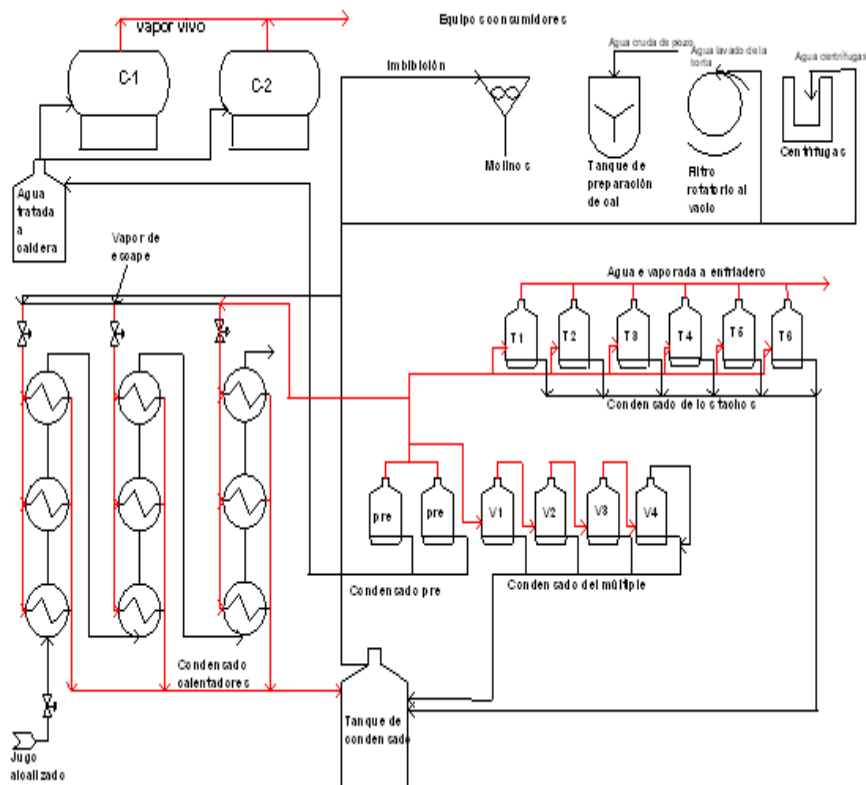
Como primer paso del estudio se realiza el balance de agua en el proceso. En la figura 1, se muestra un diagrama de flujo del consumo de agua y la generación de residuales acuosos en este proceso. Como puede verse en la figura los equipos generadores de residuales acuosos son:

- § calentadores del jugo mezclado,
- § pre-evaporadores,
- § múltiple efecto y
- § tachos

A los condensados de estos equipos se les realiza un análisis para ver si están contaminados o no, estos condensados van al tanque de condensados, de aquí se envían para ser utilizados en el proceso como: agua de imbibición para los molinos, lavado de la torta en los filtros y en las centrífugas. Los condensados de los pre van directo a la caldera para mezclarse con el agua que utiliza la misma que es agua tratada, la lechada de cal se prepara con agua cruda es decir de la fuente de abasto, el agua evaporada de los tachos va al enfriadero, el agua evaporada de los pre se utiliza para alimentar el primer vaso del múltiple, para los tachos y para el calentador rectificador, el agua evaporada del cuádruple se utiliza en la alimentación del vaso siguiente, es decir el agua evaporada en el vaso uno se alimenta al vaso dos y así sucesivamente.

El proceso demanda 1990,47 m<sup>3</sup>/d de agua, de ellos 1036,96 m<sup>3</sup>/d de agua fresca y se generan 2726,29 m<sup>3</sup>/d de residuales acuosos con posibilidades de ser reciclados. Como se puede ver la cantidad de residuales acuosos que se genera es mayor que la que el proceso demanda. Si estas corrientes se incorporan a los procesos totalmente, se disminuirá el consumo de agua fresca por lo que es suficientemente tentador para llevar a cabo el análisis de las posibilidades de reciclo.

En el figura 2, se muestra el diagrama fuente-sumidero general para las fuentes y sumideros identificados en el proceso.



**Figura 1. Diagrama de flujo del consumo y generación de agua**

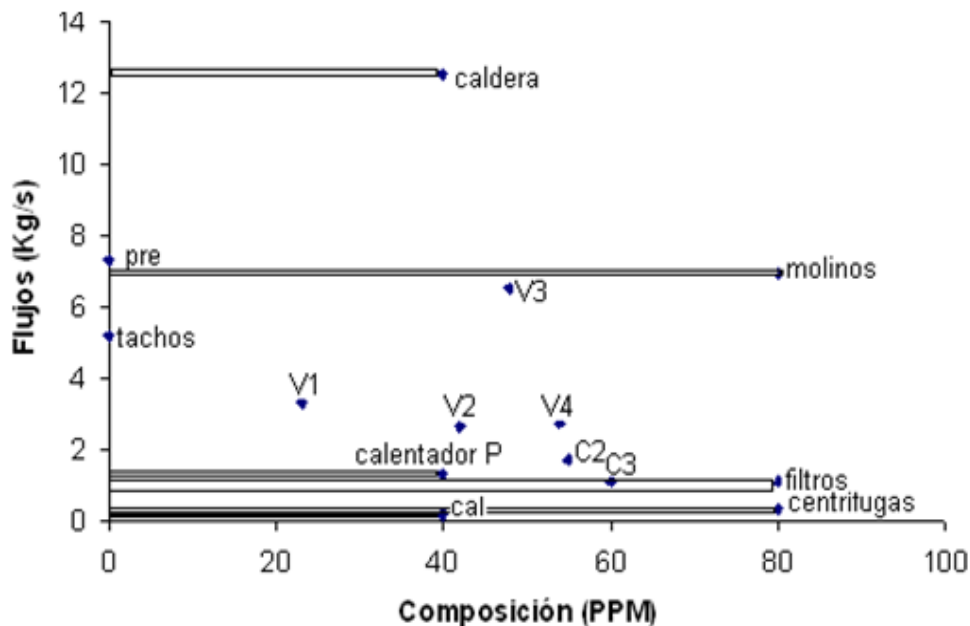
De este análisis se pueden considerar en la fábrica 13 flujos fuentes para las oportunidades de reciclaje y 6 equipos sumideros. En la tabla 1, se muestran los resultados del balance de agua en la industria, los flujos de las fuentes y de los sumideros. Los condensados de los vasos se determinaron a través de balances de masa aplicados al proceso.

**Tabla 1. Resultados del balance de agua**

Fuente	Flujo (kg/s)	Composición(ppm)	T(°C)
Condensado del calentador 2	1,37	55	120
Condensado del calentador 3	1,10	60	110
Condensado pre-evaporadores	7,30	0	120
Condensado del vaso 1 del múltiple	3,30	23	112
Condensado del vaso 2 del múltiple	2,64	42	105
Condensado del vaso 3 del múltiple	6,50	48	94
Condensado del vaso 4 del múltiple	2,74	54	78
Condensado del tacho 1	0,91	0	105

Condensado del tacho 2	0,90	0	105
Condensado del tacho 3	1,21	0	105
Condensado del tacho 4	0,62	0	105
Condensado del tacho 5	0,92	0	105
Condensado del tacho 6	0,62	0	105
Flujo total de las fuentes	30,13		
Sumideros	Flujo (Kg/s)	Composición (ppm)	T(°C)
Molinos (Imbibición)	6,91	0-80	45
Caldera	12,53	0-40	105
Preparación de la lechada de cal	0,14	0-40	30
Filtros (lavado torta)	1,06	0-80	70
Centrífugas	0,29	0-80	80
Calentador primario de jugo alcalizado	1,29	0-40	102
Demanda total de agua	22,22		

□



**Figura 2. Diagrama fuente-sumidero para el análisis de reciclo en la fábrica**

Donde:

V1: condensado vaso 1, V2: condensado vaso 2, V3: condensado vaso 3, V4: condensado vaso 4, C2: condensado del calentador secundario, C3: condensado del calentador rectificador de jugo.

De la estrategia gráfica se obtuvo que las fuentes generadas por el pre-evaporador, tachos y el condensado del vaso 1 pueden ser mezcladas y enviadas a la caldera, para el calentador primario y para la preparación de la lechada de cal. Los condensados de los vasos 1, 2, 3, y 4 del múltiple y los de los calentadores pueden ser utilizados en las centrífugas, filtros y los molinos. Con esto se procede a la optimización matemática para obtener la redistribución óptima de los flujos. Para la solución del problema se utilizó el software LINGO™.

En este caso el consumo de agua fresca se reduce a cero aprovechándose las corrientes con baja concentración de azúcar para incorporarlas a la caldera, siendo este equipo el mayor consumidor de agua fresca en esta fábrica. Es importante tener presente que el hecho de que se obtenga reducción de agua fresca a cero no significa que el proceso no consuma agua externa, esto quiere decir que los propios recursos acuosos del proceso pueden en el sistema.

satisfacer la demanda del mismo pero en un inicio y cada cierto tiempo hay que alimentar al proceso con agua fresca, ya que no pueden perderse de vista dificultades que trae el reciclo de agua como es la acumulación de sustancias contaminantes y suciedades sistema. Es por lo anterior que en los procesos que se implementen estrategias de reuso de agua cada cierto tiempo es necesario abrir los circuitos y alimentar al proceso cierta cantidad de agua fresca. En la tabla 2 se muestra la distribución desde los flujos fuentes hacia los sumideros encontrados en el procedimiento de optimización.

**Tabla 2. Resultados de la redistribución del consumo de agua en la industria**

Flujos(Kg/s)	Molinos	Caldera	Lechada de cal	Filtros	Centrífuga	Calentador primario
Agua fresca	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cond caltdor 2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cond caltdor 3	0,00	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00
Cond pre	0,00	7,29	0,00	0,00	0,00	0,00
Cond vaso 1	1,87	0,68	0,07	0,00	0,28	0,41
Cond vaso 2	1,87	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cond vaso 3	1,87	0,00	0,00	1,06	0,00	0,88
Cond vaso 4	0,38	1,87	0,00	0,00	0,00	0,00
Cond tacho 1	0,91	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cond tacho 2	0,00	0,90	0,00	0,00	0,00	0,00
Cond tacho 3	0,00	1,21	0,00	0,00	0,00	0,00
Cond tacho 4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cond tacho 5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cond tacho 6	0,01	0,59	0,01	0,00	0,00	0,00
Total de consumo	6,91	12,53	0,14	1,06	0,29	1,29

Un análisis económico del ahorro que se tiene por la nueva redistribución de flujos de agua se muestra en la tabla 3.

**Tabla 3. Ahorro económico resultado de la redistribución de flujos de agua.**

	Antes	Después
Consumo de agua fresca	51,84	0
Agua vertida	56,58	22,07
Total	108,44	22,07



## Conclusiones.

1. Es posible dar solución a la problemática planteada implementando herramientas como el diagrama fuente sumidero que involucra cambios de bajo costo, y que permiten identificar las mejores oportunidades de reciclaje en cuanto a nivel de contaminación en las corrientes.
2. Como resultado de la aplicación de la Integración de Procesos en la empresa azucarera en estudio se obtuvo una reducción del consumo de agua fresca, minimizándose el vertimiento de residuales acuosos al medio.
3. El planteamiento matemático del problema y su implementación para llevar a cabo la optimización de la estrategia ofrece una gran ventaja y facilidad de valoración de diversas variantes, obteniéndose a través de esta estrategia la solución óptima de reducción del consumo de agua fresca a un nivel mínimo.
4. Se identificaron 13 flujos fuentes con potencialidades de ser reciclados a 6 sumideros, tomándose como contaminante de interés la concentración de azúcares en las diferentes corrientes.
5. Se estimó el impacto económico de la reducción del consumo de agua fresca, ahorrándose \$ 86,36/día, lo que representa en el período de zafra \$10363,2.

1. Castellanos: "El consumo de agua en la industria azucarera como un problema energético y medio ambiental." *Centro Azúcar* 3: 43-47, 2005.
2. Catá, Y.; M. González y E. González: Estrategia para la minimización de consumo de agua fresca en la Industria de procesos químicos, Conferencia Internacional de Energía Renovable, mayo de 2005.
3. Berbard, S. y M. Sorin: "Water minimization in the washing area". *Tappi journal*. 83(9): 1-12, September, 2000.
4. Bernateau, J. P and H Peschard, "Cierre de circuitos y economía de agua". *El papel*, No. 61, Febrero/Marzo, 1997.
5. Crumpler, P.: "Pollution prevention by design". *Chemical engineer*. 96(12):102, December.
6. Dunn, R. And G.E. Bush: "Using process integration technology for cleaner production". *Journal of cleaner production*. 8: 1-23, 2000.