

EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE EVAPORACIÓN DEL CAI AMÉRICA LIBRE DE SANTIAGO DE CUBA, CON Y SIN LA APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DEL TRATAMIENTO MAGNÉTICO

Guillermo Ribeaux Kindelán, Juan M. Mesa Pérez
Centro Nacional de Electromagnetismo Aplicado

Se realiza la evaluación del sistema de evaporación del CAI América Libre, con y sin la aplicación del tratamiento magnético al jugo de caña, obteniendo que el coeficiente total de transferencia de calor equivalente en el período con tratamiento magnético se incrementa, haciendo que el tiempo de operación del equipo aumente de 12 a 18 d.

Luego, y a partir de un análisis físico de los resultados, se propone variantes tecnológicas para la instalación de equipos magnetizadores, concluyendo que en dependencia de las características de diseño de éstos y la composición de las incrustaciones presentes en el jugo, así será la variante tecnológica por emplear.

Palabras clave: *tratamiento magnético de soluciones de azúcar, evaporación de soluciones de azúcar, prevención de incrustaciones.*

It is carried out the evaluation of the evaporation system of the CAI America Libre with and without the application of the magnetic treatment to the cane juice, obtaining that the total coefficient of transference of equivalent heat in the period with magnetic treatment is increased, making that the time of operation of the equipment increases from 12 to 18 days.

Then, and starting from a physical analysis of the results, are proposed technological variants for the installation of magnetizer devices, concluding that in dependence of the characteristics of design of these and the composition of the incrustations present in the juice, so will be the technological variant to be used.

Key words: *magnetical treatment of sugar solutions, evaporation of sugar solutions, incrustation prevention.*

Introducción

En la actualidad, son conocidas las dificultades que causan la deposición de las incrustaciones en las superficies de los equipos industriales, fundamentalmente, en aquéllos donde se transfiere calor, siendo los sistemas de evaporación de la industria azucarera un ejemplo donde se manifiestan estas dificultades.

La caída de los coeficientes de transferencia de calor (TC), las paradas periódicas y el uso de agentes químicos para la limpieza de estos sistemas son algunos de los problemas que se presentan con mayor frecuencia.

Una alternativa a la solución del problema es el tratamiento magnético del agua o jugos; sin embargo, el posible efecto del campo magnético depende, en gran medida, de las condiciones de

operación de los sistemas donde se aplique esta tecnología.

La composición de la solución que se magnetiza, el régimen de flujo, la inducción de campo magnético, el tiempo de exposición de la solución en dicho campo y la temperatura, son factores que definen la efectividad del tratamiento magnético.

Cuando se realiza la evaluación de un sistema bajo la acción de un campo magnético, se hace necesario definir el verdadero efecto del tratamiento sobre las variables de calidad que se identifiquen, para ello es indispensable conocer los fenómenos que gobiernan el sistema y definir los parámetros de transferencia de calor que pudieran afectarse.

El uso del magnetismo hace que la caída del coeficiente total de transferencia de calor debido

a las incrustaciones sea menor, aumentando así el tiempo de operación de dicho equipo.

El incremento del tiempo de operación de los sistemas de intercambio de calor cuando se usan magnetizadores se puede asociar a tres causas fundamentales:

- Debido al aumento de la solubilidad de los carbonatos de calcio y magnesio, que son los componentes mayoritarios de las incrustaciones presentes en estos sistemas.
- Debido al cambio de las propiedades físico-químicas de la solución.
- Debido a la composición del jugo.

Materiales y métodos

Características de la instalación

El sistema de evaporación del complejo agroindustrial América Libre está formado por dos pre- evaporadores y un cuádruple, con una superficie calórica total de 4 394,17 m², y una capacidad potencial de molida de 240 000 @ diarias.

En la figura 1 se muestra una representación esquemática del sistema de evaporación del complejo agroindustrial:

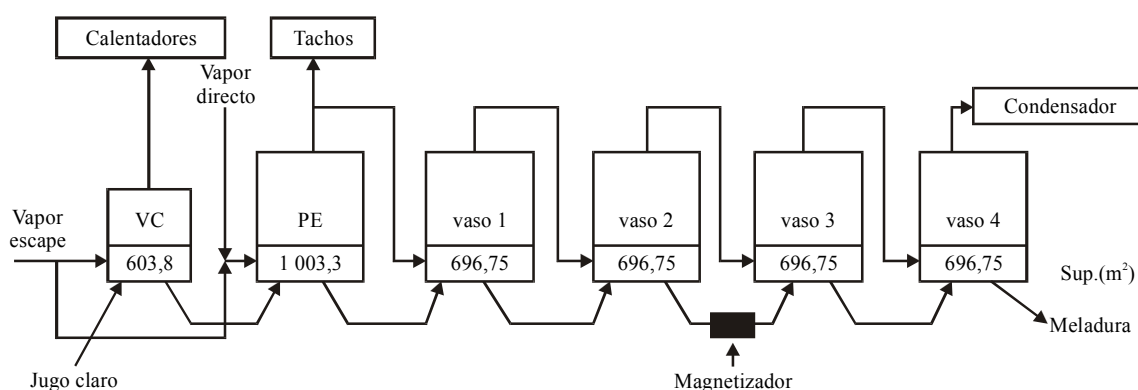


Fig. 1 Esquema representativo del sistema de evaporación analizado.

Los datos se recopilaron de la zafra 1998 en dos periodos de trabajo, uno operando sin el magnetizador y otro con el magnetizador ubicado a la entrada del tercer vaso del cuádruple.

Las mediciones se hicieron a las entradas y salidas de los vasos que componen el sistema, incluyendo los dos pre- evaporadores; para ello fue necesario instalar tomamuestras de jugo y meladura, así como termopares en siete puntos del sistema.

Datos recopilados:

- Cantidad de caña procesada (@/d).
- Tiempo perdido (h).
- Días entre limpiezas del cuádruple.
- Brix del jugo a la entrada y salida de cada vaso.
- Temperatura del jugo a la entrada y salida de cada vaso (°C).
- Presión de vapor en cuerpo y calandria de cada vaso (kg/cm²).

- Por ciento de materia extraña en la caña cuyo valor promedio diario fue de un 4 %.
- Se tomó y se caracterizó una muestra de incrustación típica de los vasos del sistema de evaporación.

Con estos datos se calculan por período y se promedian en cada vaso los siguientes índices:

- Flujo de jugo.
- % de evaporación.
- Toneladas por hora de agua que se evapora.
- Razón de evaporación.
- Flujo de vapor.
- Coeficiente de transferencia de calor.

Instrumentación empleada

- Manómetros japoneses del tipo JAKO y WIKA.
- Termopares alemanes del tipo WEC.
- Refractómetro de mesa chino del tipo 2WA-J.
- Balanzas técnicas y analíticas alemanas del tipo NAGEMA.

- Cristalería de laboratorio dentro de la que se incluye areómetros.
- Para la realización de los cálculos y el análisis de los resultados nos auxiliamos de un programa de cálculo en soporte Window que forma parte de la familia Microsoft, este utilitario es el Excel.

Análisis y discusión de los resultados por cada período

Al realizar el análisis comparativo entre los períodos puede observarse en primer lugar, cómo

el período donde se aplica la tecnología del tratamiento magnético (TM) tiene una duración de 18 d de trabajo, a diferencia del período donde no se aplica el TM al jugo, que solo duró 12 d.

El parámetro de calidad que determina la presencia o no de incrustaciones en el sistema de evaporación es el Brix de salida del jugo (meladura) en el último vaso del múltiple efecto. En las figuras 2 y 3 se puede observar dicho comportamiento, véase cómo en ambos períodos el brix cae a un valor aproximado de 60 grados Brix, sólo que en el período donde no se aplica el TM lo hace a los 12 d y en el que se aplica el TM a los 18 d.

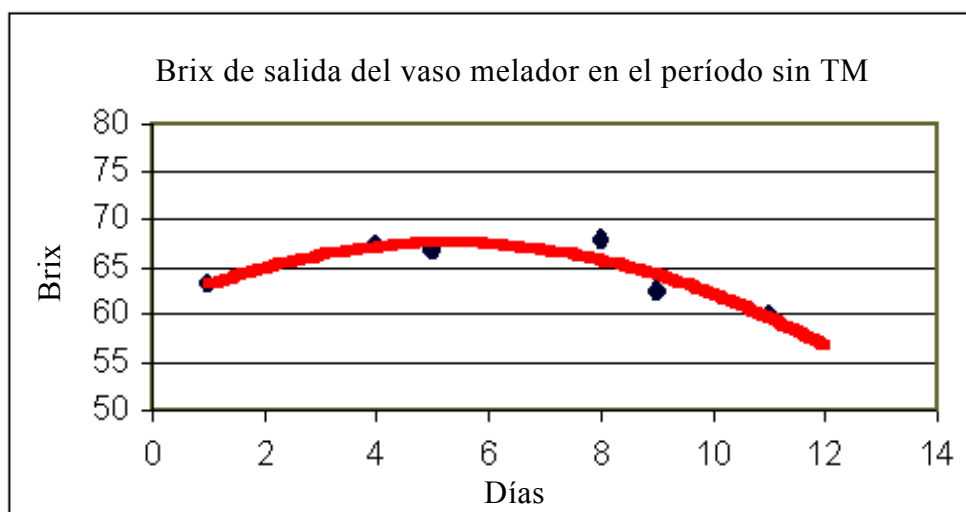


Fig. 2 Comportamiento del brix de la meladura en el período donde no se aplica el TM.

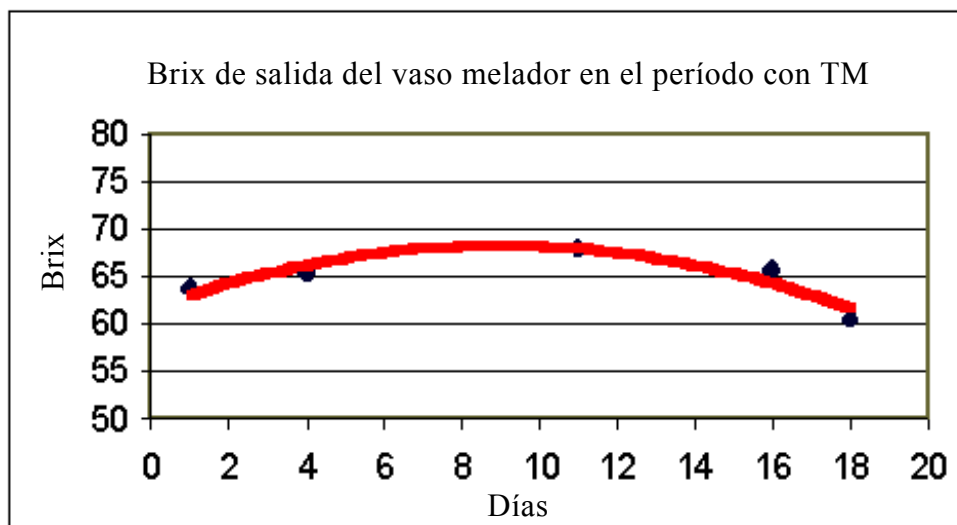


Fig. 3 Comportamiento del brix de la meladura en el período donde se aplica el TM.

Lo observado en la figura 2 se debe a que el tratamiento magnético disminuye la velocidad de deposición de las incrustaciones en la superficie de intercambio de calor, lo cual provoca el incremento de los días de operación del sistema de evaporación.

Para mantener constante el Δt_{util} , en la práctica se incrementa la presión del vapor, o sea, el vapor intercambiará calor a una mayor temperatura, compensando la caída de temperatura entre la pared del tubo y la capa de incrustación.

Para mantener constante el flujo de calor cuando aumenta la presión, es necesario aumentar también el flujo de vapor, debido a que con el incremento de la presión el calor latente de vaporización disminuye.

Luego, para mantener constante el Δt_{util} será necesario compensar la caída de temperatura

incrementando el flujo de vapor de mayor presión.

Período sin tratamiento magnético al jugo (STM)

Para el período sin TM, la cantidad de vapor suministrado a la calandria del pre-evaporador con respecto a la cantidad de jugo alimentado aumenta en el tiempo de forma lineal según la ecuación:

$$\frac{W_v}{F} = 0,0087t + 0,1879 \quad (1)$$

Este comportamiento se representa gráficamente en la figura 4

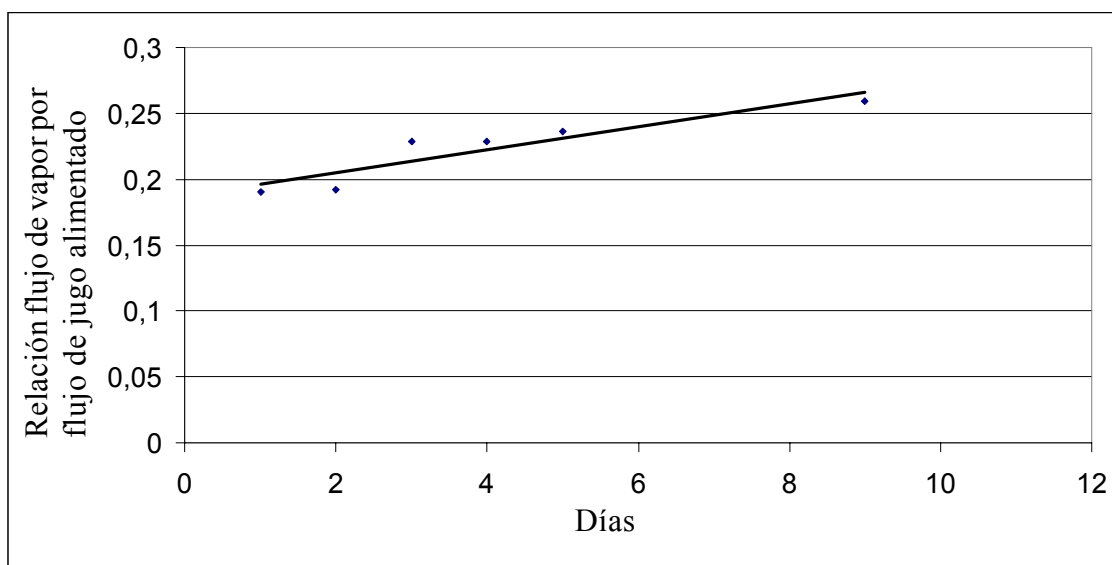


Fig. 4 Vapor suministrado en relación con la cantidad de jugo alimentado en el período sin TM.

El incremento del flujo de vapor provoca una mayor concentración de la solución azucarada a la salida del pre-evaporador. Este comportamiento se representa en la figura 5.

En las figuras 6 y 7 se muestra el comportamiento de la economía del pre-evaporador y del múltiple efecto en el tiempo respectivamente,

nótese cómo en el pre-evaporador el comportamiento es ascendente, lo que corrobora el hecho del aumento del flujo de vapor por flujo de jugo alimentado en este período; en el caso de la economía del sistema se observa una disminución en el tiempo, situación que explica la caída del brix de la meladura (fig. 2).

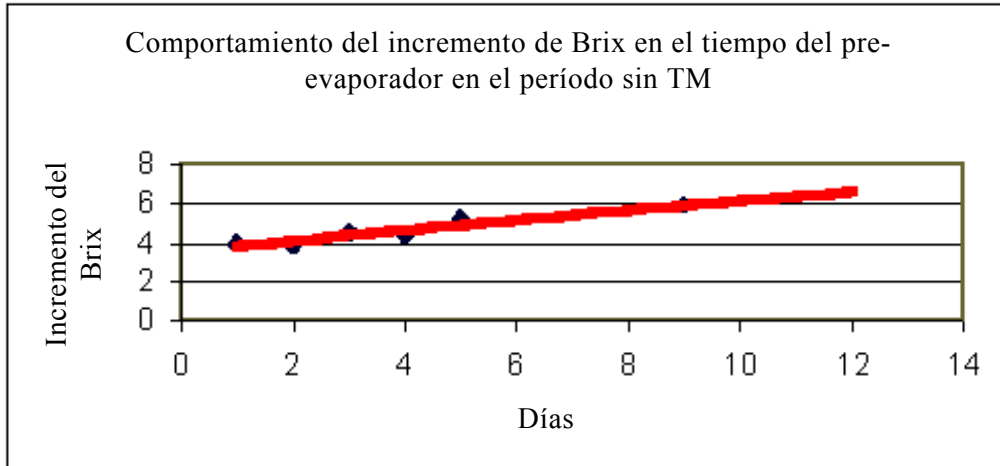


Fig. 5 Comportamiento en el tiempo del incremento del brix del pre evaporador en el período donde no se aplica el TM al jugo.

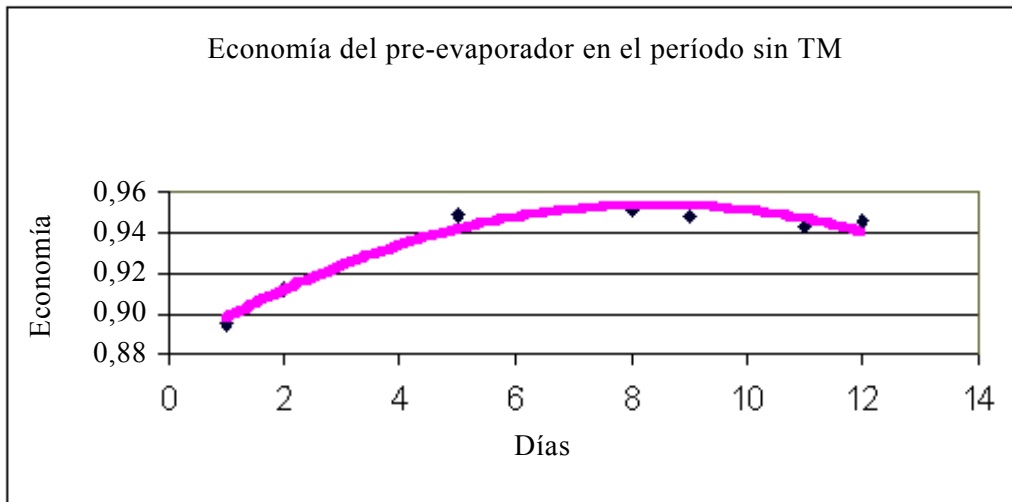


Fig. 6 Economía del pre-evaporador en el período donde no se aplica el TM al jugo.

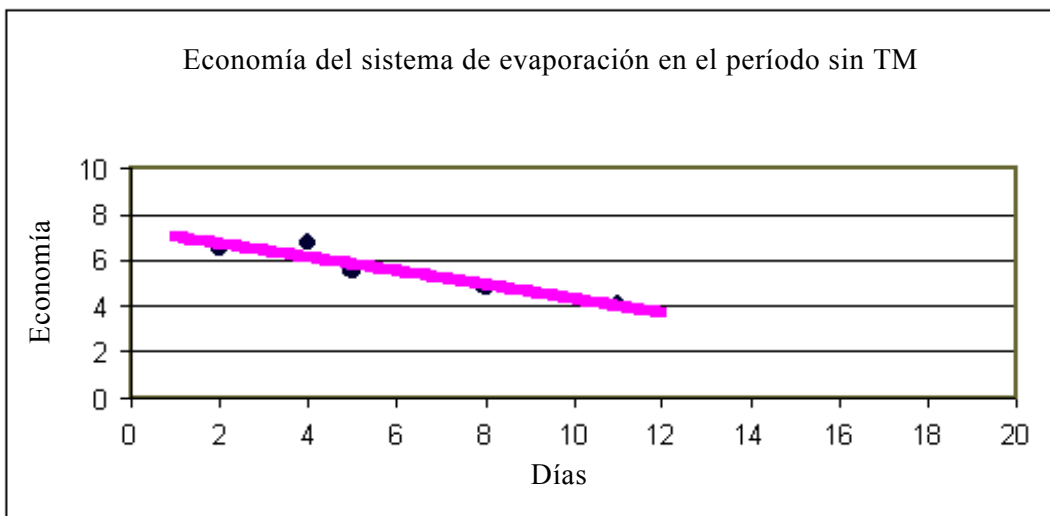


Fig. 7 Economía del múltiple efecto en el período donde no se aplica el TM al jugo.

Comportamiento del coeficiente de transferencia de calor equivalente (sin TM)

Suponiendo que el primer día no hay incrustaciones, el coeficiente total de transferencia de calor se llamará K_L limpio y se denotará por K_L , donde:

$$K_L = \frac{Q}{F \cdot \Delta t_{\text{útil}}} \quad (2)$$

Como el sistema opera de forma estable, $\Delta t_{\text{útil}}$ es constante al igual que F (área de transferencia de calor en m^2) y se puede plantear que:

$$K_L = \frac{W_{v0} \cdot \gamma_v}{F \cdot \Delta t_{\text{útil}}} \quad (3)$$

Luego que comience a funcionar el sistema, el coeficiente total de transferencia de calor se llamará sucio y se denotará como K_S , luego:

$$K_S = \frac{W_{vf} \cdot \gamma_v}{F \cdot \Delta t_{\text{útil}}} \quad (4)$$

donde:

W_{v0} - flujo de vapor para un tiempo $t_0=0$, para cada intervalo de tiempo $t = t_0 + \Delta t$;

$W_{vf} = W_{vL}$ para $i = 1$ hasta f , siendo W_f - el flujo de vapor el último día del período.

La diferencia entre el flujo de vapor de cada día con respecto al inicial será el flujo de vapor

adicional para vencer las resistencias que se oponen a la transferencia de calor.

Se expresará también en forma de incrementos la caída del coeficiente total de transferencia de calor, siendo esta caída $K_L - K_S$ donde:

K_S - coeficiente total de transferencia de calor sucio ($kcal/m^2 \text{ } ^\circ C$)

$$K_L - K_S = \frac{W_{v0} \cdot \gamma_v}{F \cdot \Delta t_{\text{útil}}} - \frac{W_{vf} \cdot \gamma_v}{F \cdot \Delta t_{\text{útil}}}$$

$$K_L - K_S = \frac{\gamma_v}{F \cdot \Delta t_{\text{útil}}} (W_{v0} - W_{vf}) \quad (5)$$

Luego:

$$K_S = K_L - \frac{\gamma_v (\Delta W_v)}{F \cdot \Delta t_{\text{útil}}} \quad (6)$$

El término $\frac{\gamma_v (\Delta W_v)}{F \cdot \Delta t_{\text{útil}}}$ no es más que la cantidad que hay que restarle al K_L para obtener el K_S debido al efecto de las incrustaciones, dicha caída está en función de la cantidad de energía suministrada al sistema con respecto al primer día (ΔW_v).

En la figura 8 se representa el comportamiento de K_S en el tiempo para el período sin TM.

El coeficiente de transferencia de calor sucio se calcula tomando como referencia un flujo de jugo de 1 000 kg/h y suponiendo que la caída es debida solamente a la deposición de una incrustación de espesor δ y conductividad térmica λ . La

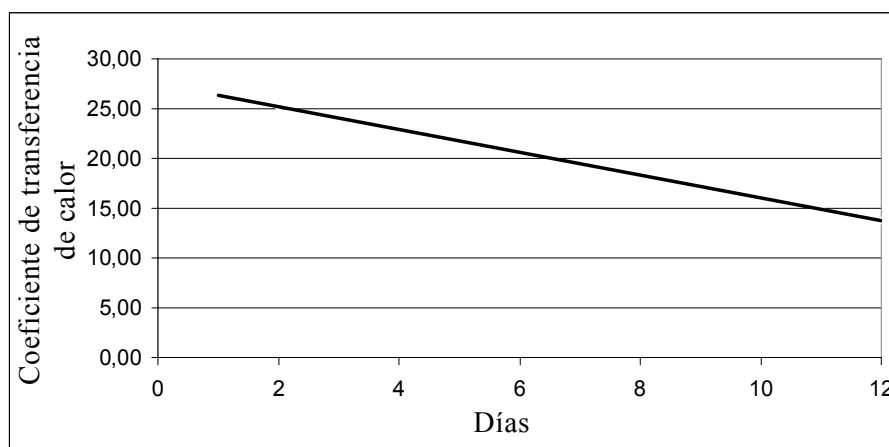


Fig. 8 Curva de tendencia del comportamiento del coeficiente de transferencia de calor en el período sin TM.

caída de este coeficiente se asocia al incremento del flujo de vapor, el cual se calcula tomando como referencia el primer día de operación del pre-evaporador. Para obtener los valores reales del coeficiente es necesario tener en cuenta el verdadero valor del flujo de jugo y estimarlo para cada vaso.

Período con tratamiento magnético al jugo (TM)

Un análisis similar se realiza para el período en el cual se magnetiza el jugo mezclado, obteniéndose los siguientes resultados:

Para el período con TM, la cantidad de vapor suministrado a la calandria del pre-evaporador

con respecto a la cantidad de jugo alimentado disminuye en el tiempo de forma lineal según la ecuación:

$$\frac{W_v}{F} = -0,0033X + 0,1959 \quad (7)$$

El valor negativo de la pendiente indica que la cantidad de vapor disminuye por día. Este comportamiento se representa gráficamente en la figura 9.

El decremento del flujo de vapor provoca una menor concentración de la solución azucarada a la salida del pre-evaporador. Este comportamiento se representa en la figura 10.

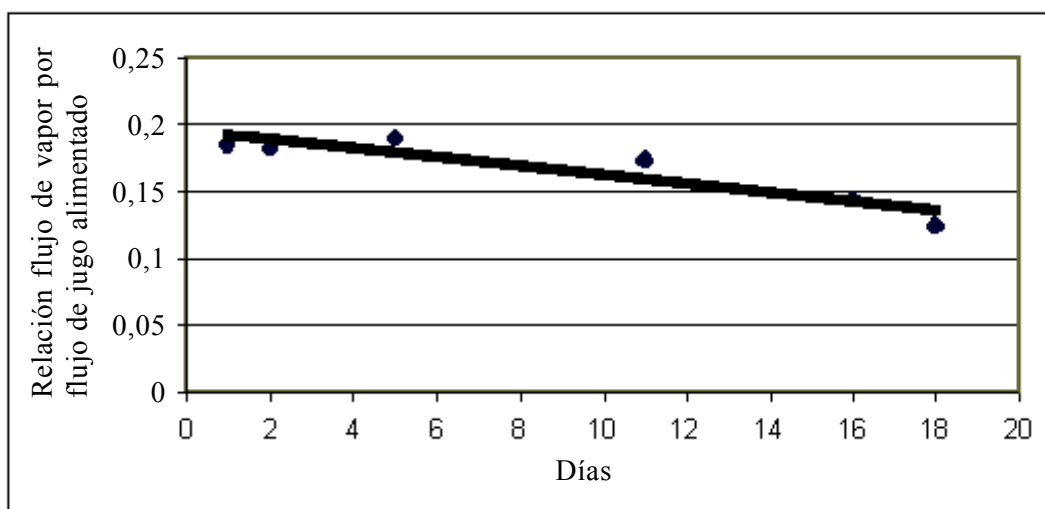


Fig. 9 Vapor suministrado en relación con la cantidad de jugo alimentado en el período con TM.

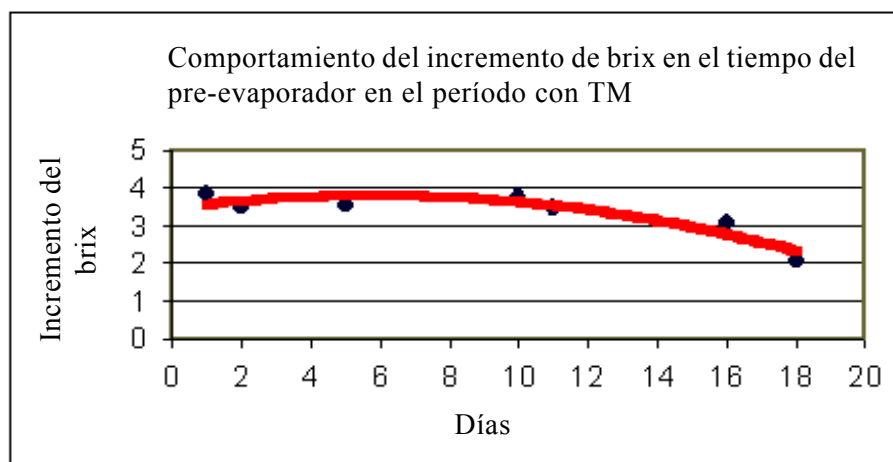


Fig. 10 Comportamiento en el tiempo del decremento del brix del pre-evaporador en el período donde se aplica el TM al jugo.

Comportamiento del coeficiente de transferencia de calor equivalente (con TM)

Un análisis similar al realizado para el período sin TM se efectúa para el período con TM, obteniendo el resultado que se muestra en la figura 11,

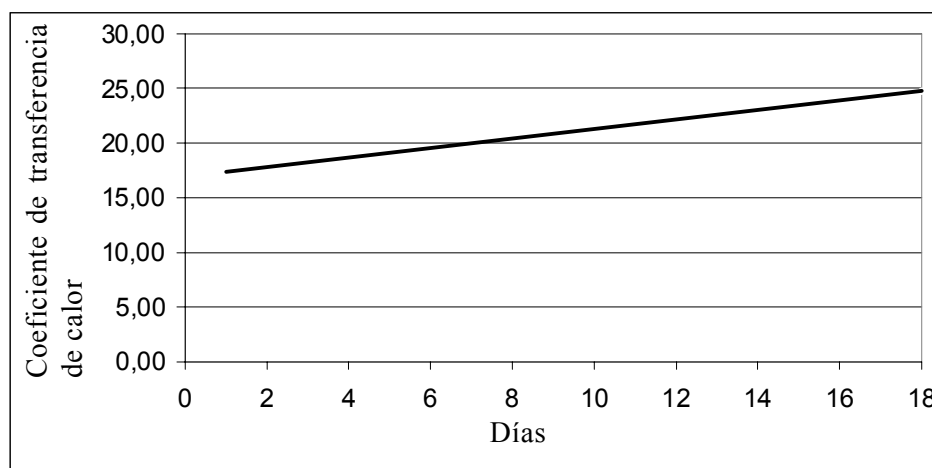


Fig. 11 Curva de tendencia del comportamiento del coeficiente de transferencia de calor en el período con TM.

Hasta el momento, sólo se ha representado el comportamiento del C.T.T.C sucio equivalente en ambos períodos debido al aumento o disminución del flujo de vapor. Para saber la influencia del tratamiento magnético es necesario evaluar el funcionamiento de los vasos 3 y 4, los cuales son los que se someten a la acción del campo magnético.

Debido a las características de las aguas en el lugar donde se encuentra ubicado el CAI América Libre, las incrustaciones en el pre-evaporador y los vasos 1 y 2 pueden despreciarse con respecto a los vasos 3 y 4.

Determinación de la variación del espesor de incrustación en el tiempo para ambos períodos.

El incremento del flujo de vapor en el pre-evaporador es utilizado para vencer la resistencia de las incrustaciones en los vasos 3 y 4, luego, suponiendo que todas las incrustaciones se depositan en el vaso 3 se puede plantear que:

La cantidad de calor adicional $Q = \Delta W_v \cdot \gamma_v$ será igual a la cantidad de calor necesario para atrave-

niendo el resultado que se muestra en la figura 11, en la que se representa el incremento del coeficiente de transferencia de calor en el tiempo, comportamiento contrario a los reflejados en el primer período.

sar una capa de incrustaciones de espesor δ y conductividad térmica λ_{inc} , que presenta una diferencia de temperatura constante e igual a $(T_v - T_{obs})$, siendo T_v - temperatura del vapor en la calandria y T_{obs} - temperatura de ebullición de la solución dentro del tubo.

Para el período sin TM se tiene los siguientes resultados.

En la figura 12 se puede apreciar que al incrementar el flujo de vapor el espesor de las incrustaciones crece también, o sea, el incremento del vapor es utilizado para vencer la resistencia de una incrustación de espesor δ y conductividad térmica λ_{inc} considerando que el flujo de jugo es de 1 000 kg/h.

Para el período con TM se tiene los siguientes resultados:

Lo que se observa en la figura 13 sólo tiene sentido si se supone que al terminar el primer período (sin tratamiento magnético) la limpieza no fuera totalmente eficaz, dejando en la superficie del tubo ciertas cantidades de incrustaciones, las cuales se disuelven bajo la acción del campo magnético.

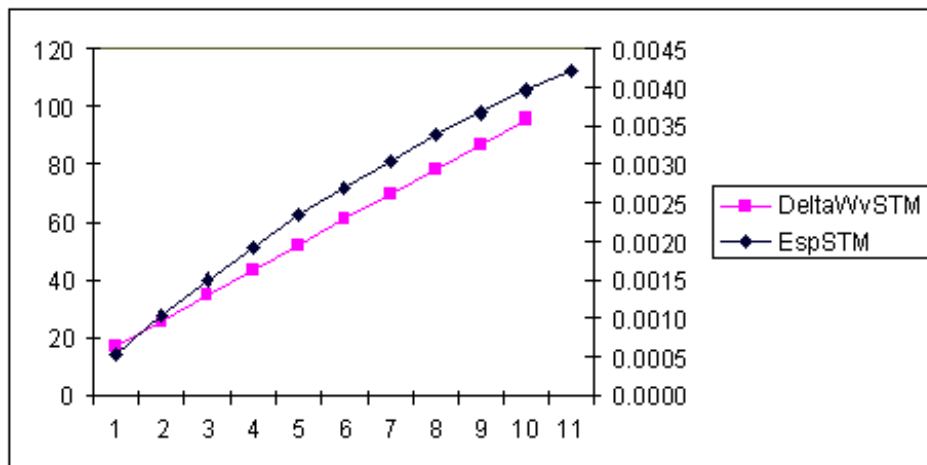


Fig: 12 Comportamiento del incremento del flujo de vapor y variación del espesor de la incrustación en el tiempo sin la aplicación del TM.

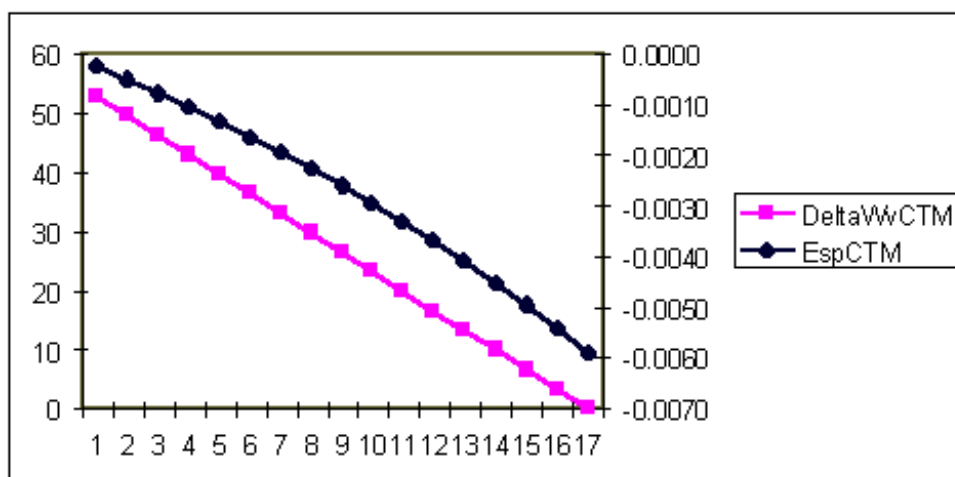


Fig: 13 Comportamiento del incremento del flujo de vapor y variación del espesor de la incrustación en el tiempo con la aplicación del TM.

Propuesta de alternativas tecnológicas cuando se usa magnetizadores para el incremento de la eficiencia energética de sistemas de evaporación del jugo de caña

El análisis hecho hasta el momento ha permitido llegar a las siguientes conclusiones:

- Según /3/ en una muestra de incrustación compuesta por carbonato de calcio y magnesio el calcio se solubiliza en mayor cuantía cuando:
 - B = 530 G
 - Altos tiempos de exposición
 - T = 56 °C

mientras que el carbonato de magnesio se solubiliza en mayor cuantía cuando:

- B = 118 G
- Altos tiempos de exposición
- T = 70 °C

- Según Honig /3/ el magnesio, en comparación con el calcio, tiene una concentración relativamente alta en las incrustaciones de los primeros efectos; las incrustaciones de los últimos efectos contienen siempre menores cantidades de magnesio que calcio.

Las conclusiones anteriores permiten proponer variantes para la instalación de magnetizadores

en busca de mayor eficiencia energética, lo cual depende de:

- Composición de las incrustaciones presentes en el jugo.
- Características del magnetizador (campo y tiempo).

Variante # 1

Si el jugo contiene altos contenidos de calcio, es de esperar que los vasos 3 y 4 presenten las mayores incrustaciones según la conclusión (2), y por tanto, el magnetizador debe ubicarse a la entrada del tercer vaso con una inducción de campo magnético $B = 530$ G, altos tiempos de exposición y temperaturas aproximadas a los 56 °C.

Variante # 2

Si las incrustaciones del jugo contienen fundamentalmente magnesio, debe esperarse que los vasos 1 y 2 tengan las mayores incrustaciones y el magnetizador debe instalarse a la entrada del primer vaso con una inducción de 118 G.

Como la temperatura y la presión disminuyen desde el vaso 1 hasta el vaso 4, ha de esperarse que parte del magnesio que no se depositó en los vasos 1 y 2, por efecto del magnetismo, precipite en los vasos 3 y 4. Lo anterior sugiere utilizar el magnetizador en los últimos vasos para eliminar estas incrustaciones si son significativas.

Variante # 3

Las experiencias realizadas en distintos estudios demuestran que el campo magnético tiene mayores efectos cuando los regímenes de flujo son laminares; sin embargo, en la industria el régimen flujo es turbulento. Lo anterior sugiere aumentar el diámetro de la tubería donde se instale el magnetizador.

Conclusiones

El análisis realizado para la evaluación energética del sistema de evaporación del CAI América Libre, a través de la metodología propuesta, permitió arribar a las siguientes conclusiones:

1. De la variación encontrada debido al efecto del tratamiento magnético, sólo el 27 % se

justifica por el incremento de la solubilidad de los carbonatos de calcio y magnesio. El 73 % de los cambios encontrados pueden ser explicados debido a los cambios de propiedades físicas y errores experimentales.

2. En el período con tratamiento magnético se incrementa el coeficiente total de transferencia de calor, necesitándose menor consumo de vapor.
3. En el período sin tratamiento magnético el coeficiente total de transferencia de calor disminuye por incremento del espesor de las incrustaciones, consumiendo más vapor y disminuyendo el tiempo de operación, y por tanto, aumentando el número de limpieza química.
4. Cuando en la composición de las incrustaciones predomina el carbonato de calcio, se recomienda utilizar inducción de campo de 530 G, altos tiempos de exposición y $T = 82$ °C; cuando es de magnesio $B = 118$ G, altos tiempos y temperatura mayor de 70 °C.
5. Cuando los vasos 3 y 4 se incrustan, predominan las incrustaciones de calcio y los magnetizadores se instalan a la entrada del 3^{er} vaso.
6. Cuando las incrustaciones son de magnesio, se incrustan los vasos 1 y 2 y el magnetizador debe instalarse a la entrada del vaso 1.

Bibliografía

1. Hugot, E., *Manual para ingenieros químicos azucareros*, La Habana, Edición Revolucionaria, 1974.
2. Jenkins, G. H., *Introducción a la tecnología del azúcar de caña*, La Habana, Ed. Ciencia y Técnica, 1971.
3. Honig, P., *Principios de tecnología azucarera*, La Habana, Editorial Pueblo y Educación, 1979.
4. Spencer, G.; G. P. Meade, *Manual del azúcar de caña*, La Habana, Ed. Pueblo y Educación, 1974.
5. Rodríguez Morales, Ramón, Paquete Informativo, Tratamiento magnético de sistemas acuosos, 1991.
6. Betancourt Pérez, Melvis, "Influencia del magnetismo en la velocidad de sedimentación", en Revista Electrónica Ciencia en su PC, ISSN 1027-2887, 1997.
7. Salazar, Rodolfo; Del Toro, Rigoberto, "Influencia de los campos magnéticos constantes sobre la capacidad calórica del agua", en Revista Electrónica Ciencia en su PC, ISSN 1027-2887, 1997.

-
8. Cole, Frank; A. Clarke, Margaret, "Benefits of Magnets in Factory Evaporation", en *Int. Sugar Jnl.*, 1996, vol. 98.
 9. McCabe & Smith, *Unit Operations of Chemical Engineering*, 1979.
 10. Bisheng, Zheng; Siyuan, Guo; Lin, Li; Miaoyan, Cai, "Magnetic Fields and the Evaporation Rate of Sugar Solutions", en *Int. Sugar Jnl.*, 1996, vol. 98.
 11. Herrera, O., *Equipos de transferencia de calor*, 1985.
 12. Ribeaux, G.; Tamayo, O., "Influencia del campo magnético en la evaporación del jugo de caña", en *Revista Electrónica Ciencia en su PC*, ISSN 1027-2887, 1997.
 13. Viltre, R. *et al.*, "Evidencias experimentales del tratamiento magnético como agente antiincrustante", en *Revista Tecnología Química*, vol. XIX, núm. 1, 1999, págs. 72-78.

UNIVERSIDAD DE ORIENTE

EVENTOS 2001



Título: IV Taller Internacional de Psicología Latinoamericana y Caribeña

Fecha: Del 13 al 16 de noviembre

Sede: Centro de Convenciones Teatro Heredia

Temáticas: Subjetividad y globalización. Psicología, globalización y cultura. Efectos de la globalización en los grupos humanos. Impacto de la globalización en las organizaciones laborales. Educación y globalización. Incidencias del proceso de globalización en la salud humana, el modo de vida y la calidad de vida.

Cuota de inscripción: 130,00 USD. Se pagará en el momento de la acreditación en el evento.

Comité organizador: Dr. Marcos Cortina Vega

Teléfono: (53) (226) 632004

Fax: (53) (226) 632689/643186/641701

e-mail: psico@csh.uo.edu.cu