



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 100 (2):
35-44; 2023



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

Av. William Cross 3150
T4101XAC - Las Talitas.
Tucumán, Argentina.

Evolución de la eficiencia en evaporación en un ingenio de Tucumán, Argentina

M. Carolina Cruz*, Gisela Díaz*, Federico Franck* y Dora Paz*

*Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, EEAOC. Email: ccruz@eeaoc.org.ar

RESUMEN

La evaporación es una operación esencial en todas las fábricas de azúcar y representa el principal consumidor de vapor escape; en consecuencia, es un factor determinante de la eficiencia energética de la planta. La configuración de la estación de evaporación determina la cantidad de vapor que requiere la fábrica. Para este trabajo se evaluó el sistema de Calentamiento y Evaporación en un ingenio de Tucumán en forma periódica entre los años 2012 y 2021, y en base a estrategias de uso racional de la energía se fueron planteando y realizando modificaciones tendientes a disminuir el consumo de vapor en el sector. Las modificaciones incluyeron principalmente el incremento de las extracciones de vapores vegetales y el aumento de temperatura de jugo claro antes de su ingreso al primer efecto de evaporación. Para las evaluaciones se realizaron mediciones con instrumental apropiado, y con los datos obtenidos y el programa SIMCE 3.0 se resolvieron los balances de materia y energía. De este modo se determinó el caudal másico de agua evaporada y vapor escape en cada caso, cuya relación se tomó como indicador de la performance del sistema, la cual se definió como "eficiencia en evaporación". Se calculó, además, el porcentaje de mejora de la eficiencia en evaporación para cada periodo, que resultó en aumento en cada periodo y con un porcentaje de mejora siempre positivo. Con respecto a la situación inicial de 2012, se logró reducir el consumo de vapor escape en un 21,3%.

Palabras clave: mediciones en fábrica, uso racional de energía, eficiencia.

ABSTRACT

Evolution of evaporation efficiency in a sugar mill in Tucumán, Argentina

Evaporation is an essential operation in all sugars mills that represents the main consumer of exhaust steam and consequently is a determining factor in the energy efficiency of the plant. The evaporation station set up determines the amount of required steam by the factory. Heating and Evaporation system was evaluated periodically in a sugar mill in Tucumán between 2012 and 2021, and based on strategies of energy rational use; modifications were proposed and made to reduce steam consumption in the plant sector. The modifications mainly included the increase in the vegetable vapor extractions and the increase in the temperature of the clear juice. The measurements were made with appropriate instruments and, with the data obtained and the SIMCE 3.0 program, the material and energy balances were resolved, in each case the mass flow rate of evaporated water and exhaust steam was determined, whose ratio was taken as an indicator of system performance, which was defined as "evaporation efficiency". In addition, the percentage of improvement in evaporation efficiency was calculated for each period, which resulted in an increase in each period, and with an improvement percentage that was always positive. Respect to the initial situation in 2012, it was possible to reduce the exhaust steam consumption by 21.3%.

Key words: factory measurements, energy rational use, performance.

Fecha de
recepción:
21/06/2022

Fecha de
aceptación:
14/12/2023

INTRODUCCION

La evaporación es una operación esencial en todas las fábricas de azúcar y su configuración es un factor que determina ampliamente la eficiencia energética de la planta industrial. Esta operación incrementa la concentración de jugo clarificado hasta un contenido de sólidos disueltos de alrededor de 65-68%, lo cual la convierte en el principal consumidor de vapor. La configuración de la estación de evaporación determina la cantidad de vapor que requiere la fábrica y por lo tanto, el arreglo de evaporadores es de gran importancia (Rein, 2012). El arreglo tiene que ver con la cantidad de efectos que conformen el sistema; por lo general, los ingenios tucumanos cuentan con trenes de evaporación que tienen entre cuatro y cinco efectos. Cuando se requieren evaporadores de gran capacidad, un evaporador Kestner puede proporcionar arreglos de evaporación compactos y de menor costo a través del empleo de tubos de mayor longitud (Rein, 2012). Es oportuno mencionar que internacionalmente los nuevos ingenios emplean en un porcentaje alto evaporadores tipo Kestner y de película descendente. Indian Cane Power Limited (ICPL), una fábrica de caña de azúcar ubicada en el estado de Karnataka (India), tiene en funcionamiento un conjunto de evaporadores de cinco efectos compuestos íntegramente por evaporadores de película descendente. También están en servicio dos evaporadores de película descendente en el ingenio Ghotki (GSM) de Pakistán. Algunos ingenios de Argentina tienen en funcionamiento evaporadores Kestner; sin embargo, en Tucumán el evaporador más usado es de tipo Roberts, constituido esencialmente por una calandria tubular que tiene la función de intercambiar calor entre el vapor de calefacción que baña los tubos por el exterior y el jugo a evaporar que circula por el interior (Almirón y Paz, 2006).

La eficiencia de evaporación se define como la relación entre el caudal másico de agua evaporada y de vapor escape suministrado al sistema de calentamiento y evaporación (C-E). Para incrementar la eficiencia en evaporación, se analizan estrategias de uso racional de la energía, la cual depende, entre otros, de tres factores: número de efectos, extracciones de vapor vegetal y temperatura del jugo a la entrada al primer efecto.

Número de efectos

Según Rillieux (Rein, 2012), en una evaporación multiefecto con i efectos, sin extracciones de vapor vegetal, 1 kg de vapor evaporará aproximadamente 1 kg de agua. Por consiguiente, en un tren de evaporadores de dos efectos, 1 kg de vapor evaporará 2 kg de agua; en uno de tres efectos, 3 kg de agua, etc. Por lo tanto, el vapor requerido para la evaporación de 1 unidad de masa de agua es aproximadamente $1/i$ unidades.

El número óptimo de efectos se obtiene a partir de un balance económico, teniendo en cuenta el ahorro de vapor de agua que se obtiene con el incremento en el número de efectos y la inversión adicional que se requiere.

Extracciones de vapor vegetal

El efecto de las extracciones de vapor vegetal realizadas en los evaporadores sobre la eficiencia en una fábrica puede predecirse con relativa precisión a partir del segundo principio de Rillieux. De acuerdo con esto, 1 kg de vapor vegetal extraído de un primer efecto, utilizado en reemplazo de vapor de escape para calentamiento, permite ahorrar en cuádruple efecto $1/4=0,25$ kg de vapor escape, y en quintuple efecto $1/5=0,20$ kg de escape. Por ejemplo, si se extrae 1 tonelada de vapor vegetal del primer efecto de un quintuple efecto, para realizar un calentamiento que antes se hacía con vapor escape se logra ahorrar 0,2 toneladas de vapor escape; es decir, si antes se necesitaban en total 2 toneladas de vapor escape para el calentamiento y la evaporación, ahora se necesitarán en total 1,8 toneladas.

A medida que se incrementa el número del efecto desde el cual se extrae vapor, la temperatura de extracción es menor. En consecuencia, para mejorar la eficiencia en el sistema de calentamiento y evaporación (y a menudo, la capacidad), se prefiere efectuar las extracciones desde un efecto tan cerca del último como sea posible (naturalmente, esto estará condicionado por la tarea para la cual sea utilizado el vapor). Es decir, por ejemplo, si en un sistema en quintuple efecto para reemplazar vapor escape en calentadores se extrae 1 kg de vapor del primer efecto, se tendrá un ahorro de $1/5$ kg de escape en el sistema; pero si en su lugar se emplea 1 kg de vapor del segundo efecto, el ahorro sería de $2/5$ kg de escape; y si se empleara 1 kg de vapor del tercer efecto, el ahorro ascendería a $3/5$ kg de escape.

Temperatura de entrada del jugo claro

Si el jugo claro ingresa a una temperatura menor a la temperatura de saturación de la caja evaporadora, parte del calor que transfiere el vapor escape calienta primero el jugo, hasta alcanzar dicha temperatura, y luego recién comienza la evaporación del jugo. Bajo estas circunstancias el evaporador pierde eficiencia, ya que funciona parte como calentador y parte como evaporador. Si el jugo claro ingresa a la temperatura de saturación del cuerpo, el calor que transfiere el vapor se emplea solo para evaporar el agua presente en el jugo. Por ejemplo, si el jugo claro ingresa a 95°C al primer efecto y este trabaja a una temperatura de 115°C , el jugo dentro del cuerpo primero se calentará desde 95°C a 115°C y recién a partir de allí comenzará a evaporarse. Es decir, el evaporador trabajará como calentador para luego trabajar como evaporador, con lo cual se pierde eficiencia.

En trabajos anteriores (Ruiz *et al.*, 1991; Ruiz *et al.*, 1992; Diez *et al.*, 1998) ya se analizó el uso de esta metodología de análisis en ingenios de distinta concepción tecnológica, para evaluar este tipo de sistemas de calentamiento y evaporación con resultados satisfactorios.

Existen también publicaciones previas (Paz *et al.*, 2003; Diez *et al.*, 2011) con el uso del software de simulación SIMCE que resuelve los balances de materia y energía del sistema de C-E.

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante los períodos entre 2012 y 2021, en el transcurso de siete zafas (2012, 2014, 2015, 2016, 2017, 2020 y 2021) se realizaron estudios de eficiencia energética que comprenden ensayos de medición, evaluación energética y propuestas de mejoras en el sector de Calentamiento y Evaporación en un ingenio ubicado en la localidad de Leales, Tucumán. A partir de estos ensayos, que permiten determinar el estado operativo del sistema al momento de su realización, se propusieron cambios en el esquema con el objetivo de aumentar su eficiencia; y en un periodo posterior se evaluó su desempeño. Las modificaciones propuestas se hicieron en base a estrategias de uso racional de la energía, e incluyeron principalmente mayores extracciones de vapores vegetales y aumento de temperatura de jugo claro antes de su ingreso a la evaporación.

Descripción del sistema de Calentamiento y Evaporación

En la Figura 1 se muestra el esquema de evaporación, tal cual se encontraba en el año 2012, cuando se inició el estudio. En él se indican las superficies en m² de cada cuerpo de evaporación y las superficies de calentamiento disponibles en los calentadores de jugo encalado.

El ingenio en estudio tenía en 2012 una molienda que rondaba, en promedio, 5800 TCD. El sistema de evaporación de cuádruple efecto tenía a disposición un total de 11 cajas de evaporación denominadas: Pre 1, Pre 2, Pre 3, Cajas 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8.

Generalmente, como primer efecto funcionaban pares de Pre 1, Pre 2 y Pre 3; como segundo efecto, las Cajas 1, 2, y 3; como tercer efecto, la Caja 5 o la 6 y como cuarto efecto, un par conformado por las Cajas 7 y 8.

El primer efecto se alimentaba con vapor escape en paralelo; y en serie, con el jugo. Lo mismo ocurría con los demás efectos conformados por más de una caja que se alimentaban con vapor vegetal del efecto anterior en paralelo, y en serie con respecto al jugo.

Los calentamientos de jugo encalado se efectuaban en intercambiadores de calor de tubos-carcaza. Dicho

calentamiento se realizaba con vapor vegetal del primer efecto (VG1) y vapor vegetal del segundo efecto (VG2), utilizando para ello los calentadores en serie (calentadores de jugo encalado) denominados 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 y 8. En ese momento no se realizaba recalentamiento de jugo claro antes de su ingreso al primer efecto de evaporación.

Con respecto a los consumos adicionales de vapores vegetales, se extraía vapor del primer efecto para abastecer la refinería; y vapor del segundo efecto para calentar los tachos de cocimiento de la fábrica de crudo (Figura 2).

Modificaciones en el sistema de Calentamiento y Evaporación

Durante los años que el ingenio fue evaluado se fueron realizando cambios en el sistema con el objetivo de hacerlo más eficiente, a partir del uso racional de la energía. En tal sentido, se recomendó aumentar el uso de vapores vegetales, incorporando las extracciones de vapor vegetal de los últimos efectos para el calentamiento de jugo encalado, y VG1 para calentamiento de jugo claro. Se aconsejó, además, que el consumo de refinería se realizara con VG2, y que tres tachos (los más pequeños y sin agitación) se alimentaran con VG1. El ingenio fue adoptando estos cambios de manera progresiva en la medida de sus posibilidades.

En el año 2012, cuando se comenzó con la evaluación del sistema C-E, se había incorporado una caja de evaporación nueva al sistema, llamada Pre 1 (Figura 1) de 3541 m² de superficie, con el objetivo de aumentar la molienda en próximas zafas.

Durante las zafas 2014 y 2015 se incorporó la extracción de vapor vegetal del tercer efecto para calentar jugo encalado y se implementó el recalentamiento de jugo claro, antes de su ingreso al primer cuerpo de evaporación, con vapor vegetal del primer efecto y luego con vapor escape (Figura 3).

Durante las zafas 2016 y 2017 se añadió la extracción de vapor vegetal del cuarto efecto para calentar la primera etapa de jugo encalado y se continuó con el trabajo de recalentar jugo claro antes de su ingreso al tren de evaporación (Figura 4).

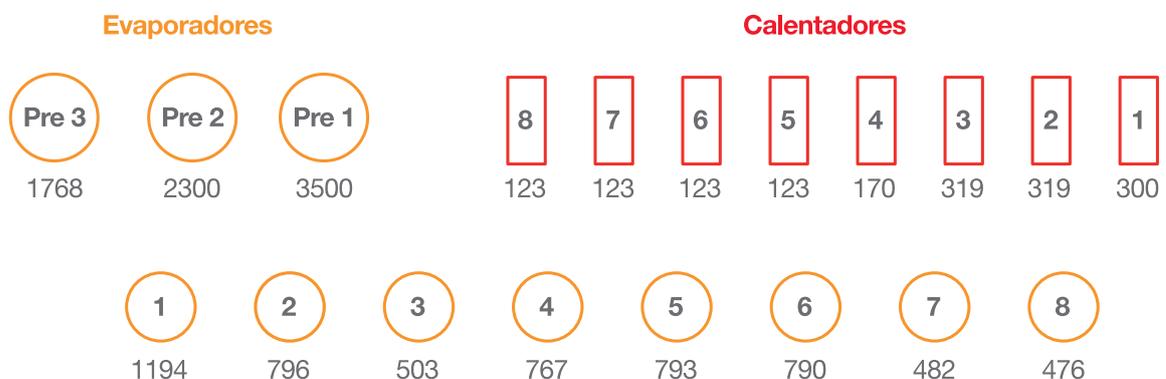


Figura 1. Esquema del sistema de calentamiento y evaporación correspondiente a la zafra 2012.

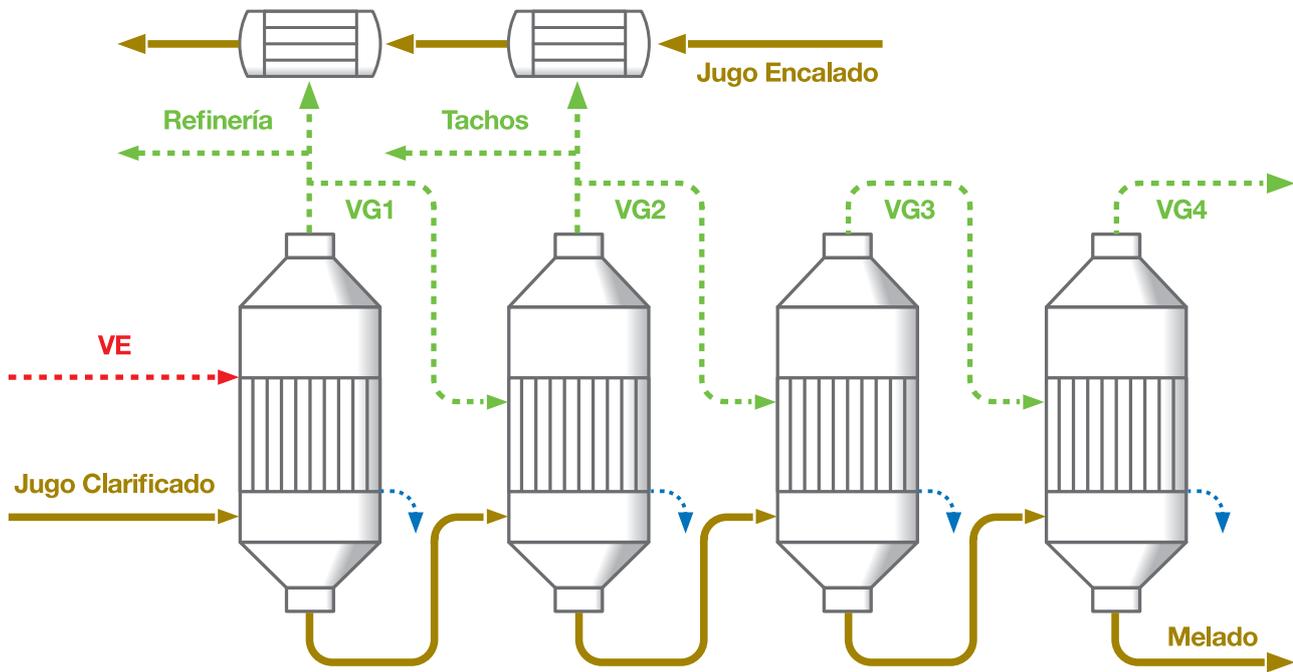


Figura 2. Esquema de evaporación correspondiente a la zafra 2012.

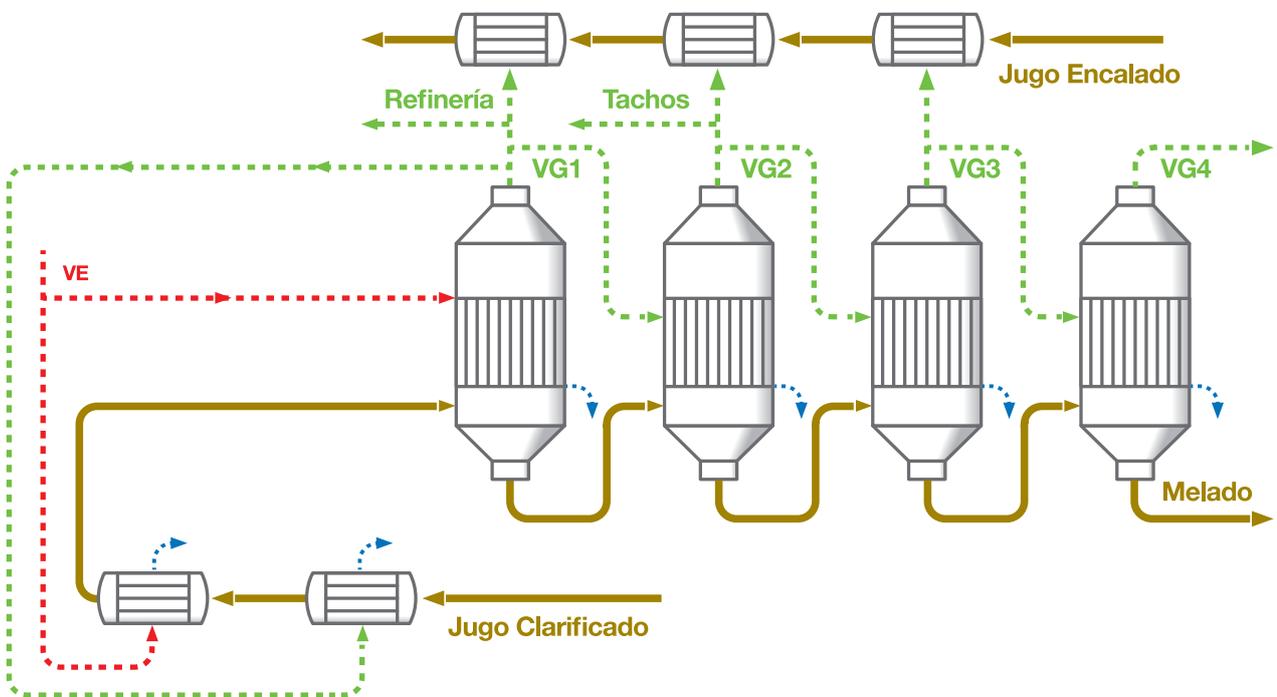


Figura 3. Sistema de Calentamiento y Evaporación con extracción de vapor vegetal del tercer efecto y la incorporación de recalentadores de jugo claro con VG1 y escape correspondientes a las zafras 2014 y 2015.

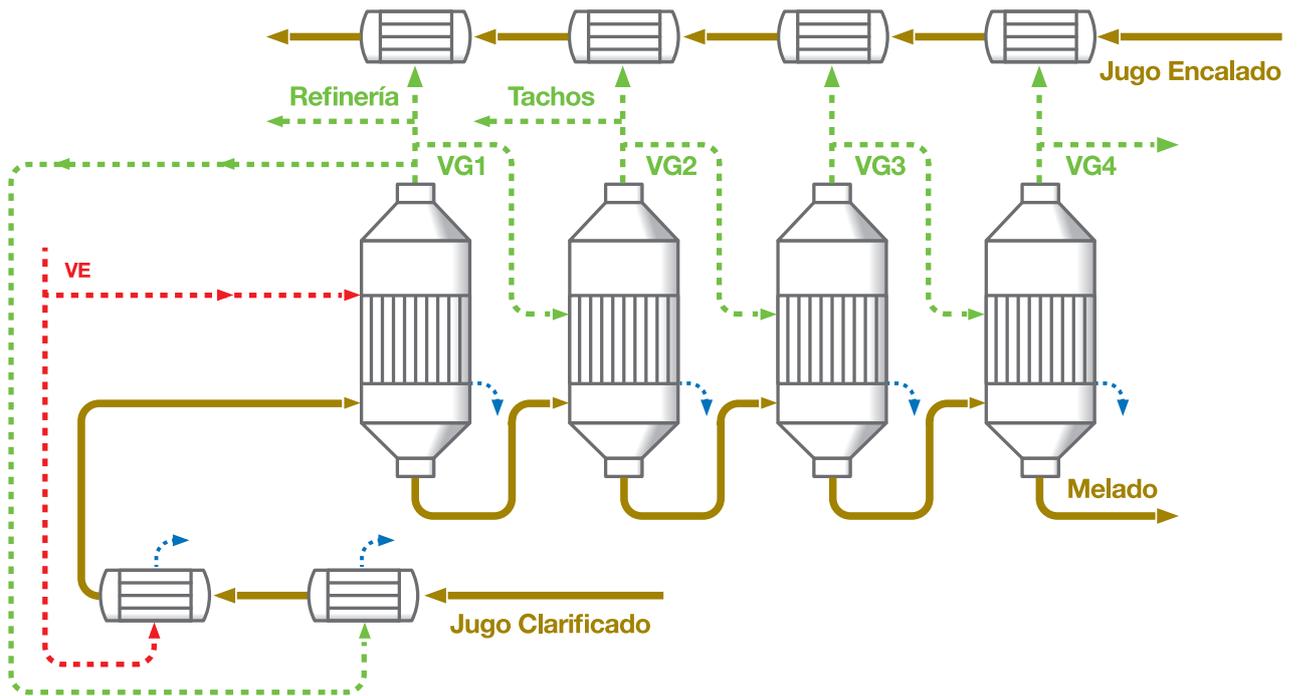


Figura 4. Sistema de calentamiento y evaporación con extracción de vapor vegetal del cuarto efecto correspondiente a las zafas 2016 y 2017.

En el año 2019 se agregó una nueva caja de evaporación de iguales características que la llamada Pre 1. Se comenzó a derivar VG2 para tachos y refinería y solo tres tachos pequeños quedaron abastecidos por VG1.

A partir de la zafa correspondiente al año 2020, el ingenio se mantuvo en características similares al año 2019 y el sistema quedó conformado como se ve en la Figura 5. Los equipos en líneas de trazos son los que se incorporaron al sistema durante las zafas estudiadas.

Mediciones en fábrica

Los ensayos de medición en fábrica se llevaron a cabo durante siete zafas correspondientes a los años 2012, 2014, 2015, 2016, 2017, 2020 y 2021. Por lo ge-

neral, los ensayos de evaporación en fábrica se realizan de tres a siete días, dependiendo del requerimiento y disponibilidad de la fábrica. Durante los ensayos se miden caudales y temperaturas de jugo claro y encalado, y temperatura del vapor de calefacción en las diferentes etapas de calentamiento. Este ingenio cuenta con medidores de temperatura de jugo en los calentadores, cuyos valores se registraron para luego ser comparados con los valores medidos con instrumental de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes (EEOC).

En el sistema de evaporación se toman muestras de las entradas y salidas de jugo en las cajas, que luego son analizadas con instrumental del ingenio y de la EEOC, para la determinación de Brix. Además, se miden temperaturas de jugo, vapor de calefacción y vapor vege-



Figura 5. Esquema del Sistema Calentamiento y Evaporación correspondiente al año 2021.

tal. Se toma nota, también, de los valores de presiones y temperaturas de los vapores de las cajas.

Estas mediciones se realizan con instrumentos de la EEAOC tales como medidor de caudal por tiempo de tránsito, no invasivo, marca Flexim, modelo fluxus F601; brixómetro para jugos y melado Brix-02 (marca Milwaukee, modelo MA871) con límite máximo de medición de 85° Bx; termómetro infrarrojo Temp-15 (marca Fluke, modelo 561) con rango de medición de -40 a 550°C, marca BrixStix; pirómetro óptico, marca Raytek; y cámara termográfica, marca TESTO 881-2.

Balances de masa y energía en el sistema Calentamiento y Evaporación

Para analizar los datos obtenidos de las mediciones y conocer el caudal de vapor escape consumido durante los ensayos se utilizó la simulación de procesos por computadora, empleando el programa de simulación SIMCE 3.0, desarrollado en la EEAOC (López *et al.*, 2000) y patentado en la Dirección Nacional del Derecho de Autor (Paz *et al.*, 2000), como obra publicada (N° 105662). Este software permite resolver los balances de masa y energía en estado estacionario de sistemas de C-E de la industria azucarera. La técnica consiste en la representación del proceso industrial mediante un modelo matemático cuya resolución permite predecir la performance probable del proceso real. La utilidad práctica de esta técnica radica en pronosticar la tendencia de evolución de las variables de proceso en respuesta a diversos juegos de valores de entrada y condiciones de operación.

Para los casos de estudio de sistemas de C-E, el programa SIMCE 3.0 resuelve los balances de masa y energía equipo a equipo, empleando en cada evaporador como variable iteradora la concentración de salida del jugo; y asumiendo un valor inicial para el caudal de vapor de calefacción que ingresa al primer efecto. Si la concentración de melado resultante del cálculo no es igual al valor ingresado como medido o requerido, el programa usa como variable de ajuste del sistema global el consumo de vapor de calefacción ingresado al primer efecto; y empleando el método de la secante, mediante iteraciones sucesivas logra alcanzar la concentración de melado deseada con un error del 0,001%. El manual del usuario SIMCE 3.0 y el diagrama de bloques del software se encuentra detallado en López *et al.* (2000).

En la Figura 6 se observa un esquema del modelo de evaporador empleado; aquí se simboliza lo que sería un evaporador en un tren de evaporación de *i* efectos. Luego se detallan los balances fundamentales de masa y energía y las ecuaciones de transferencia de calor que describen su comportamiento.

Balances de masa:

En la Ecuación 1 se plantea el balance de masa total y en la Ecuación 2, el balance de sólidos.

Balance de energía:

Al tomar la temperatura del líquido a la salida de cada efecto como la temperatura de referencia, el balance de energía resultante es el expresado en la Ecuación 3.

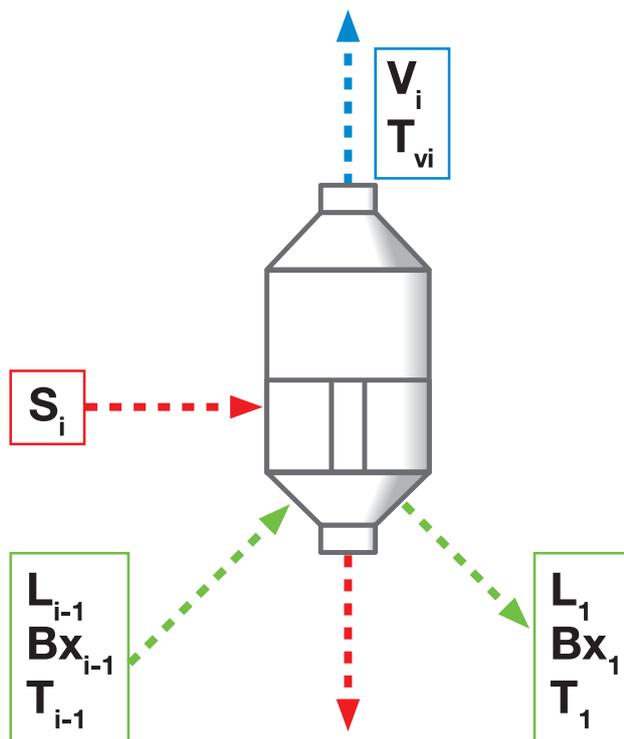


Figura 6. Modelo de evaporador empleado para el efecto *i*.

Donde:
 L: caudal másico de líquido
 S: caudal másico de vapor de calefacción
 V: caudal másico de vapor producido
 Bx: Brix
 T: temperatura

Ecuación 1

Balance total:
$$L_{i-1} = L_i + V_i$$

Ecuación 2

Balance de sólidos:
$$L_{i-1} * Bx_{i-1} = L_i * Bx_i$$

Ecuación 3

$$(1-\epsilon) * S_i * \lambda_{S_i} + L_{i-1} * Cp_{i-1} * [T_{i-1} - T_i] = V_i * [Cp_{ag} * (T_{vi} - T_i) + \lambda_{V_i}]$$

Donde:

Cp_{ag} : calor específico del agua en estado líquido.
 Cp_{i-1} : calor específico a presión constante del líquido.
 S_i : caudal másico del vapor calefaccionante del efecto *i*.
 T_i : temperatura de salida del líquido a la salida del efecto *i*.
 T_{i-1} : temperatura de salida del líquido a la salida del efecto *i-1*.
 T_{vi} : temperatura del vapor producido en el efecto *i*.
 λ_{S_i} : calor latente de vaporización del vapor calefaccionante del efecto *i*.
 λ_{V_i} : calor latente de vaporización del agua a T_{V_i} .
 ϵ : fracción de pérdidas calóricas por radiación.

Ecuación 4

Ecuación de transferencia de calor:

$$U_i * A_i * [T_{Si} - T_i] = S_i * \lambda_{Si} * (1 - \varepsilon)$$

Donde:

A_i: superficie de calefacción del efecto i.T_{Si}: temperatura del vapor calefaccionante del efecto i.U_i: coeficiente de transferencia de calor del efecto i.

Para resolver el modelo del evaporador utilizado, también son necesarias ecuaciones complementarias y empíricas para calcular el aumento del punto de ebullición (IPE), el coeficiente de transferencia (U), los calores latentes de vaporización (λ_v y λ_s) y el calor específico (cp). Estas ecuaciones a su vez dependen de los valores de Brix de jugo de entrada (Bx_{i-1}) y Brix de salida (Bx_i) de cada efecto, de la temperatura del vapor vegetal y de calefacción; y se encuentran con más detalle en López *et al.* (2000).

Simulación

Para la simulación se emplearon los valores promedio de molienda, caudal de jugo claro y encalado (en % caña), Brix de jugo claro, encalado y melado, temperatura de saturación correspondientes a las presiones de cada efecto, temperatura de vapor escape (saturado), temperatura de jugo encalado en los calentadores y temperatura de entrada de jugo claro al primer efecto.

Con los datos mencionados, se simula el proceso de evaporación, contemplándose un 3% de pérdidas por radiación en los evaporadores y ajustando los consumos de vapor vegetal de primer y segundo efecto a tachos y refinería, de manera de verificar los valores de Brix simulados con los valores promedios de Brix resultantes de los ensayos.

Eficiencia en Evaporación

Las modificaciones que se realizaron durante las zafas se tradujeron en una disminución del consumo de vapor escape. Para poder analizar la evolución del ingenio se calculó para cada año la eficiencia en evaporación que se define como Ecuación 5.

Ecuación 5

$$\eta_{evap} = AE / VE$$

Donde:

AE: cantidad de agua evaporada, en [tn/h].

VE: cantidad de vapor escape total insumido en la evaporación, en [tn/h].

Además se determinó para cada año, la mejora que se obtuvo, con respecto al año anterior. Esta mejora se calculó como ecuación 6:

Ecuación 6

$$\% \text{ mejora} = \frac{\eta_{evap}(n) - \eta_{evap}(n-1)}{\eta_{evap}(n-1)} * 100$$

Donde:

 $\eta_{evap}(n)$: eficiencia en evaporación del año en estudio, en %. $\eta_{evap}(n-1)$: eficiencia en evaporación de año anterior, en %.**RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En la Tabla 1 pueden observarse las variables consideradas en el sistema de calentamiento y evaporación de jugo para las zafas analizadas.

Dentro de las variables que se consideran se observan la molienda, la temperatura del jugo claro antes de su ingreso a la primera etapa de evaporación, los coeficientes globales de transferencia de calor correspondientes al primer efecto y la concentración del melado.

La molienda aumentó durante el período evaluado; esto se puede ver gráficamente en la Figura 7. Para el año 2021 se incrementó en un 68,2% con respecto al año de inicio (2012) de los ensayos de evaporación en el ingenio.

A partir de la incorporación de recalentadores de jugo claro (2015), la temperatura de este se aproximó a la temperatura de saturación del primer cuerpo (114 – 115 °C), lo cual se ve reflejado en el aumento del coeficiente de transferencia de calor en el primer efecto de evaporación, logrando que el evaporador trabaje de manera más

Tabla 1. Cuadro resumen de los datos obtenidos de las variables consideradas durante las siete zafas (2012 – 2021).

Parámetros	Unidad	Variables promedio consideradas							
		Ensayo 2012	Ensayo 2014	Ensayo 2015	Ensayo 2016	Ensayo 2017	Ensayo 2020	Ensayo 2021	
Molienda	TCD	5776	6781	7001	7035	7677	8884	9718	
	t/h	240,7	282,6	291,7	293,1	319,9	370,2	404,9	
Temperatura de jugo claro, de entrada al 1° efecto de evaporación	°C	94,0	93,0	103,2	104,6	111,8	110,5	111,0	
Coefficiente global de transferencia de calor del 1° efecto de evaporación	kcal/h m ² °C	1137	1215	2042	2686	2360	2662	2489	
Brix melado	%Bx	65,0	67,1	66,5	65,4	60,4	62,8	67,8	
Área total instalada de evaporación	m ²	9918	10.230	10.335	9989	10.313	14.261	14.261	

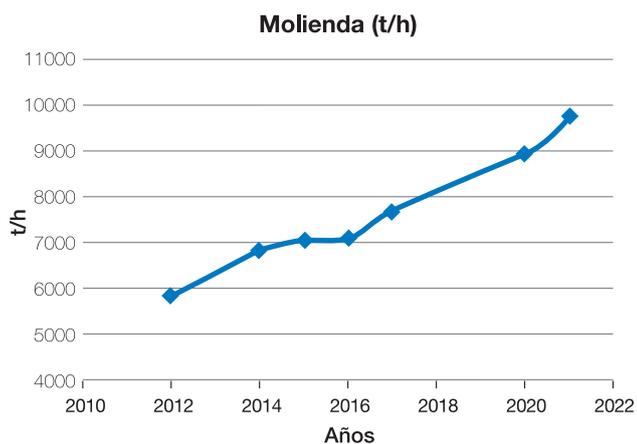


Figura 7. Evolución de la molienda durante las siete zafras (2012 - 2021).

eficiente. Además, los nuevos valores de coeficientes de transferencia de calor se encuentran dentro de los valores recomendados por Honig, Baloh, Clavijo y Hugot, entre otros (Baloh y Wittwer, 1995) para sistemas de cuatro efectos de evaporación.

Si nos enfocamos en la concentración del melado durante el período analizado, se observó un valor mínimo de 60,4 Brix en el año 2017 y un valor máximo de 67,8 Brix en la zafra 2021, lográndose un incremento de 12,3%.

El área total de evaporación instalada tiene en cuenta el promedio de la superficie que estuvo en operación durante las mediciones. Como se mencionó antes, se incorporaron dos cajas de similares características durante los años 2012 y 2019; esto representa un incremento de 43,79% de superficie de evaporación disponible.

En la Tabla 2 se presentan los resultados de las variables calculadas más relevantes del sistema.

En la Tabla 2, en las filas de extracción de VG3 y extracción de VG4 se observan los valores en % caña de los vapores derivados para calentamiento de jugo encala-

do. En el año 2020 se decidió derivar VG2 para alimentar a la refinería y los tachos de cocimiento. Cabe aclarar que no se tuvieron en cuenta los efectos que pudiera tener el cambio del tipo de vapor sobre el tiempo de elaboración en las templas. Luego, los tachos más pequeños existentes en línea quedaron alimentándose con VG1. Es por ello que desde el 2020, la extracción total de VG1 es inferior a la cantidad extraída de VG2.

La cantidad de vapor que se dirige al condensador barométrico es una medida del uso de los vapores vegetales. Se trata de minimizar este caudal para mejorar la eficiencia del sistema. Si comparamos el año 2021 con el año 2012, se logró reducir la cantidad de vapor al condensador barométrico en un 75,4 %.

En la Figura 8 se presenta gráficamente la producción de agua evaporada en función de los años en los cuales se realizaron las mediciones. Aquí se observa claramente que la cantidad de agua evaporada fue en ascenso, reflejando un buen desempeño del cuádruple efecto. Este valor se incrementó en un 62,2% en TCD desde 2012 a 2021.

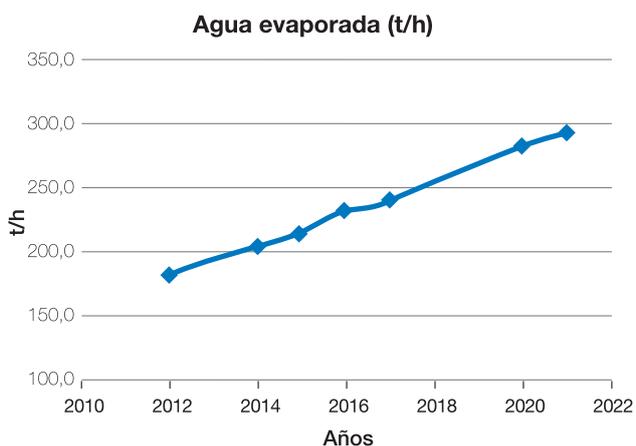


Figura 8. Cantidad de agua evaporada por el sistema durante los años en estudio.

Tabla 2. Cuadro resumen de los datos obtenidos de variables medidas, desde el año 2012 al año 2021.

Variables calculadas								
Parámetros	Unidad	Ensayo 2012	Ensayo 2014	Ensayo 2015	Ensayo 2016	Ensayo 2017	Ensayo 2020	Ensayo 2021
Extracción total de VG1	%C	19,9	22,6	16,2	18,5	15,8	6,9	8,0
Extracción total de VG2	%C	18,0	11,5	15,4	14,5	13,1	17,5	18,0
Extracción de VG3	%C	-	5,9	4,6	4,5	3,3	4,0	4,0
Extracción de VG4	%C	-	-	-	4,3	5,1	3,6	3,4
VG4 al condensador	%C	5,7	3,2	4,2	1,4	1,58	2,3	1,4
Vapor escape	t/h	114,6	125,1	131,0	130,7	130,0	138,9	151,5
	%C	47,6	44,5	44,9	44,6	40,6	37,5	37,4
Agua evaporada (AE)	t/h	181,3	204,6	214,0	231,4	239,7	282,0	294,0
	%C	75,3	72,5	73,4	79,0	74,9	76,2	72,6
Eficiencia en evaporación = AE / VE	-	1,58	1,63	1,63	1,77	1,84	2,12	2,12
% Mejora	%	-	2,91	0,33	8,33	4,14	14,99	0,00

En la Figura 9 se observa la evolución del consumo de vapor escape. En este sentido se demuestra gráficamente que este consumo fue disminuyendo a través de las modificaciones que se realizaron en el sistema de C-E. Si comparamos el consumo de vapor escape en el año 2021 con el del año 2012, este valor disminuyó un 21,3%.

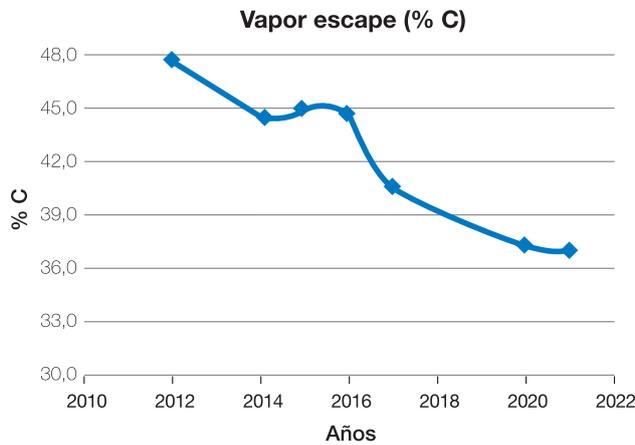


Figura 9. Consumo de vapor escape durante las zafas en estudio.

En la Figura 10 se muestra la eficiencia que tuvo el sistema de evaporación durante el tiempo analizado. Para el año 2021, el sistema fue 33,94% más eficiente comparado con el año 2012.

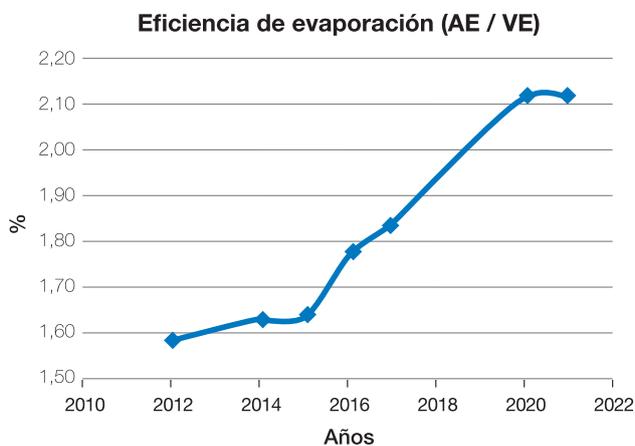


Figura 10. Eficiencia de evaporación durante las zafas estudiadas.

Se calculó el porcentaje de mejora de la eficiencia para cada año con respecto al año anterior (Tabla 2). Estos valores son siempre positivos, lo que indica que las estrategias implementadas basadas en el uso racional de la energía fueron beneficiosas para el sistema.

CONCLUSIONES

Los resultados de este trabajo indican que se mejoró el sistema de calentamiento y evaporación desde el año 2012 hasta el año 2021, siendo el sistema más

eficiente en un 33,94% para este último año, si se analiza la eficiencia de evaporación. Esto fue consecuencia de la implementación de tácticas de uso racional de la energía, a partir de las cuales se incorporaron estratégicamente nuevas extracciones de vapor vegetal para calentamiento de jugo encalado y nuevos equipos calentadores de jugo claro, lo que mejoró la transferencia de calor principalmente del primer efecto del tren de evaporación. Asimismo, la mejora de cada año con respecto al año anterior fue siempre positiva, habiéndose logrado el mayor valor entre el año 2020 y el 2021, con un 14,99%.

Para este ingenio se está evaluando, como próximas mejoras, aumentar el número de efectos; es decir, pasar de un cuádruple efecto a un quíntuple efecto. Para ello se tiene prevista la incorporación de equipos evaporadores para aumentar la superficie de transferencia, habida cuenta de que el sistema actual, como tal, ya es eficiente y se encontraría muy exigido si no se realizan cambios para operar en quíntuple efecto.

Este trabajo refleja la importancia y el potencial de los estudios realizados sobre los sistemas de calentamiento y evaporación, que permiten analizarlos para proponer posibles mejoras y luego comprobarlas. En este caso se logró una importante disminución del consumo de vapor escape, del 21%, que está directamente relacionada con una mejora en la eficiencia de la planta fabril, lo que podría traducirse en una disminución del consumo de combustible fósil o un aumento de excedentes de energía eléctrica para la red. Además del beneficio económico que ello conlleva, implica también propender a la sustentabilidad; es decir, hacer un uso consciente y responsable de los recursos, sin agotarlos ni exceder su capacidad de renovación; y sin comprometer el acceso a estos por parte de generaciones futuras.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Laboratorio de Ensayos de Mediciones Industriales (LEMI), en especial al Ing. Marcos Golato; y a los técnicos Walter Kacharoski y Alejandro De Los Ríos, por la colaboración en la realización de los ensayos en el ingenio.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Almirón, M. y D. Paz. 2006. Evaporadores empleados en la industria azucarera de caña. 2006. Avance Agroind. (38): 33-38.
- Baloh, T. y E. Wittwer. 1995. Manual de Energía para Fábricas de Azúcar. Berlín 1995.
- Diez, O. A.; G. Aso; D. Paz y G. Cárdenas. 1998. Mejoramiento energético de un ingenio mediante reordenamiento de equipos existentes. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán 75 (1-2):11-24.
- Diez, O. A.; C. Cruz y G. J. Cárdenas. 2011. Optimización energética para la producción simultánea de azúcar y alcohol en Tucumán, R. Argentina. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán 88 (2): 27-40.
- López, A. O.; D. Paz; O. A. Diez y G. J. Cárdenas. 2000. Manual del usuario de SIMCE 2.0.
- López, A. O.; D. Paz; O. A. Diez y G. J. Cárdenas. 2000.

SIMCE 2.0: Nuevo software para el análisis de sistemas de calentamiento, evaporación y cocimientos de la industria azucarera. *Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán* 77 (1): 89-98.

Paz, D.; G. J. Cárdenas; O. A. Diez y A. O. López. 2000. Inscripción en Dirección Nacional del Derecho del autor como obra publicada (N° 105662) del software SIMCE 2.0, especialmente preparado para el análisis, diseño y simulación de sistemas de calentamiento evaporación y cocimiento en la industria azucarera.

Paz D.; R. M. Ruiz; G. Aso y G. J. Cárdenas. 2003. Optimización del balance de vapor de la fábrica cuan-

do se reemplazan los tradicionales molinos por un difusor de caña. *Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán* 80 (1-2):11-24.

Rein, P. 2012. Ingeniería de la caña de azúcar. Berlín 2012.

Ruiz, R. M.; D. Paz; G. Cárdenas y G. Aso. 1991. Evaluación térmica experimental de evaporadores. Comparación con resultados obtenidos por simulación digital. *Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán* 68 (1-2):149-163.

Ruiz, R. M.; D. Paz; G. Cárdenas y G. Aso. 1992. Análisis de las diferentes alternativas de evaporación de la industria azucarera mediante simulación digital. *Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán* 69 (1-2): 119-129.