

## **EVALUACIÓN Y CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE EVAPORACIÓN EN LA INDUSTRIA AZUCARERA**

**Fernando Rosales**  
**Recuperación de Sacarosa -CENGICAÑA**

### **RESUMEN**

La industria azucarera guatemalteca es de las más eficientes y vanguardistas a nivel mundial. Esto se debe principalmente a que invierten en investigación y desarrollo para un constante crecimiento y optimización de su proceso de producción de azúcar dentro de los ingenios.

Con la presente investigación se siembra la semilla del cambio, con la finalidad de intentar romper paradigmas en cuanto a los evaporadores Roberts. Estos han sido utilizados desde muchas décadas atrás, que si bien son ampliamente reconocidos en la industria azucarera, no son los más eficientes actualmente. Se demuestra que existen tecnologías nuevas con mejores parámetros operacionales que pueden adaptarse a los ingenios, para disminuir la destrucción de azúcar debida principalmente a factores como el tiempo de retención.

Los ingenios pueden utilizar el documento como una guía bajo la cual lograrán basarse al momento que requieran obtener información de los evaporadores disponibles en el mercado, evaluar sus ventajas y desventajas, para decidir optar por una tecnología u otra.

**Palabras clave:** evaporadores, pérdida, vapor, energía, tecnologías, sacarosa

## **EVALUATION AND CRITERIA USED FOR EVAPORATION TECHNOLOGIES SELECTION IN THE SUGAR INDUSTRY**

### **ABSTRACT**

The Guatemalan sugar industry is one of the most efficient and avant-garde in the world. This is mainly due to the fact of the investment in research and development for constant growth and optimization of the sugar production process within the sugar mills.

With this research, the seed of change is sown, in order to try to break paradigms regarding Roberts evaporators. These have been used for many decades, and although they are widely recognized in the sugar industry, they are not the most efficient today. It is shown that there are new technologies with better operational parameters that can be adapted to sugar mills, to reduce the destruction of sugar mainly due to factors such as retention time.

The mills can use the document as a guide under which they will be able to base themselves when they need to obtain information from the evaporators available in the market, evaluate their advantages and disadvantages, to decide to opt for one technology or another.

## INTRODUCCIÓN

Todas las tecnologías encontradas en cada etapa desde las mesas de limpieza de caña, hasta las centrífugas de lavado de azúcar han sido sustituidas por equipos con mejor rendimiento durante los últimos años. Sin embargo, los evaporadores para concentrar el jugo de caña no han corrido con la misma suerte, ya que fueron quedando relegados a segundo plano en cuanto a la adquisición de equipos que permitan menor pérdida de sacarosa en el proceso.

Debería prestarse la atención necesaria porque la etapa de evaporación es de suma importancia en la fabricación de azúcar. En ésta se da el mayor gradiente de concentración del jugo de caña, así mismo, las extracciones de vapor representan fuentes de energía para otros equipos dentro del ingenio como evaporadores en efectos posteriores, tachos *batch* y continuos, calentadores, etc. Para lograr dicha concentración se extraen grandes cantidades de agua en forma de vapor utilizando temperaturas por encima de su punto de ebullición.

Con tecnologías más eficientes no solo se mejoraría la producción de azúcar al disminuir las pérdidas, sino que permitiría un mayor aprovechamiento del vapor proveniente de las calderas para ser utilizado posteriormente como fuente de calentamiento en el ingenio.

## CONCEPTOS GENERALES

<b>°Brix</b>	Mide el contenido total de sólidos disueltos en el azúcar, jugo, licor o jarabe, realizado a partir de un refractómetro.
<b>Evaporador</b>	Son equipos encargadas de suministrar la energía necesaria en forma de calor latente para llevar el fluido a su condición de saturación y posterior vaporización. Esto con la finalidad de que el componente más volátil pueda ser retirado en forma de vapor, dejando como resultado una solución más concentrada.
<b>Efecto de evaporación</b>	Uno o más cuerpos que ebullean a una misma presión. El término evaporador denota todo el sistema de efectos, no necesariamente un cuerpo o un efecto.
<b>Vapor</b>	Fase gaseosa en que se transforma una sustancia, generalmente líquida, que se produce en temperaturas próximas al punto de ebullición. Al aplicarle una presión determinada comienza a licuar, pasando al estado líquido.
<b>Calandria</b>	Intercambiador de calor de tubos o placas encontrado en la parte inferior de los evaporadores.
<b>Gases incondensables</b>	Gases que no pueden pasar a estado líquido, o que para lograr su cambio de estado habría que disminuir significativamente su temperatura o aumentar mucho la presión.
<b>Meladura</b>	Jugo concentrado obtenido al final de los evaporadores.
<b>Sólidos disueltos</b>	Todo material soluto que está en solución, incluyendo sacarosa, monosacáridos, cenizas y otras impurezas orgánicas.

## TECNOLOGÍAS DE EVAPORACIÓN

La evaporación es una operación unitaria de carácter físico que se da cuando un líquido pasa a estado gaseoso debido a que su energía molecular, transmitida por temperatura, supera la tensión superficial, permitiendo que sus moléculas se liberen en forma de vapor. Se utiliza para concentrar soluciones o para separar un solvente volátil de un soluto no volátil. En la industria azucarera la etapa de evaporación del jugo de caña se efectúa para extraerle en forma de vapor un alto contenido de agua y concentrarlo de 15 a 65 °Brix.

Generalmente la evaporación se realiza con múltiples efectos, que no es más que un conjunto de evaporadores arreglados secuencialmente, ya sea de forma serial o paralela. Estos funcionan de acuerdo al principio desarrollado por Rillieux, el cual consiste en que el vapor obtenido en un evaporador puede ser utilizado para calentar el jugo que recorre el siguiente evaporador y así sucesivamente hasta llegar al último cuerpo. Las corrientes de vapor extraídas se conocen como vapores vegetales y son utilizadas como fuente de calentamiento en otros equipos de la fábrica.

El rápido desarrollo de las industrias de procesos y de nuevos productos ha proporcionado muchos líquidos con una amplia gama de propiedades físicas y químicas que requieren concentración por evaporación. El tipo de equipo utilizado depende en gran medida del método de aplicación de calor al jugo y el método de agitación. El calentamiento puede ser directo o indirecto. El directo está representado por la evaporación solar y por la combustión de un combustible. En el calentamiento indirecto, el calor generalmente proporcionado por la condensación de vapor, pasa a través de la superficie de calentamiento del evaporador.

### **Circulación de jugo en evaporadores**

El movimiento del líquido sobre la superficie de calentamiento tiene una influencia marcada en la velocidad de transferencia de calor, por lo que es conveniente clasificar los evaporadores de acuerdo con el método de agitación o la naturaleza de la circulación del jugo sobre la superficie de calentamiento. Los evaporadores pueden funcionar bajo circulación natural, circulación forzada y de tipo película (*Evaporator operation*, 2011).

#### *Circulación natural*

La circulación del jugo dentro de los evaporadores se logra por corrientes de convección que surgen a partir de la superficie de calentamiento y por diferencia de presión entre un efecto y otro si se trabaja bajo el principio del flujo de jugo en paralelo. No se hace necesario el uso de dispositivos generadores de movimiento y permite adjudicar un ahorro económico a las industrias que operan bajo este principio, debido a que dichos dispositivos requieren energía y mantenimiento para funcionar. Este tipo de circulación ha sido desarrollada por las industrias azucareras y de sales, donde el costo de evaporación representa un factor importante dentro de la economía del proceso.

#### *Circulación forzada*

Para este tipo de movimiento del jugo, los evaporadores utilizan dispositivos como bombas, turbinas, entre otros propulsores. El aumento de la velocidad de flujo del jugo a través de los tubos da como resultado un aumento significativo en el coeficiente de transferencia de película líquida. La circulación forzada permite alcanzar mayores grados de concentración, ya que la velocidad de transferencia de calor puede mantenerse a pesar del aumento de la viscosidad del líquido. Debido a que los costos de bombeo aumentan aproximadamente como la velocidad al cubo, el costo adicional de operación de este tipo de unidad puede hacer que no sea económico y máxime para líquidos poco viscosos, cuyas velocidades permanecen

similares. Cuando se va a utilizar acero inoxidable o aleaciones costosas como el monel, se favorece la circulación forzada porque las unidades pueden hacerse más pequeñas y baratas que las que dependen de la circulación natural.

Este tipo de circulación se utiliza principalmente para procesar materiales como extractos de carne, sal, soda cáustica, alumbre y otros que tienden a cristalizar, también con pegamentos, alcoholes y productos formadores de espuma.

#### *Circulación de tipo película*

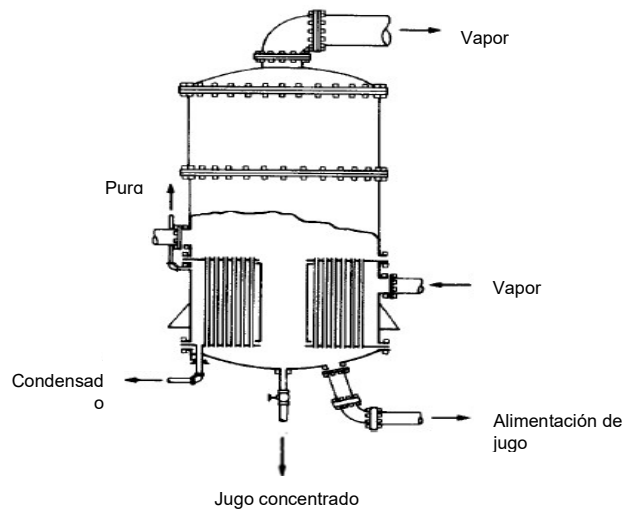
Tanto en la circulación natural como forzada, el jugo permanece durante un tiempo considerable dentro del evaporador, esto puede ser indeseable ya que muchos jugos se descomponen si se mantienen a temperaturas en o cerca de sus puntos de ebullición durante cualquier período de tiempo. Hay muchos jugos que son muy sensibles al calor, como el jugo de naranja, plasma sanguíneo, extractos de hígado y vitaminas. Si una unidad está diseñada para que el tiempo de residencia sea de solo unos segundos, estos peligros se reducen mucho. Este es el principio del evaporador de tubo largo Kestner.

En el mercado existen varias tecnologías de evaporación, sin embargo, unas se aplican mejor a algunos procesos productivos que otros. Con la finalidad de dilucidar cuales son más efectivos para ser utilizados en la industria azucarera se analizarán seis tecnologías diferentes, siendo estos: Roberts, Kestner de película ascendente, de película descendente, de película agitada, de placas y SRI (Roberts de nuevo diseño). Los evaporadores utilizados en Guatemala son del tipo Roberts exclusivamente.

### **1. Evaporadores Roberts**

Se conocen como los evaporadores estándar. De acuerdo con Rein (2012) los evaporadores provistos de un cuerpo y calandria con tubos verticales fueron introducidos por primera vez alrededor de 1850 por Roberts, el director de una fábrica de azúcar en República Checa. Generalmente cuentan con tubos de 3.8 a 5.1 cm de diámetro y longitudes de tubo en el rango de 1.5 a 3 m (ver Figura 1).

La mayoría de las calandrias tienen un tubo que la atraviesa normalmente en el centro del evaporador para mejorar la circulación y la transferencia de calor, que proporciona una conveniente ubicación para la salida del líquido concentrado. La evaporación por descompresión instantánea “*flash*” del líquido que entra promueve la circulación y la transferencia de calor, la que es utilizada en beneficio del proceso (Rein, 2012). La circulación del jugo o solución a concentrar en los tubos dispuestos en forma vertical es mejor a la horizontal, por lo tanto, el evaporador de tubo vertical se usa ampliamente en las industrias de azúcar y sal, presentando rendimientos bastante altos.



**Figura 1. Evaporador Roberts. (Fuente: *Evaporator operation*, 2011)**

### *Funcionamiento*

La solución ingresa a los tubos desde la parte inferior del cuerpo del evaporador y circula hacia arriba por convección natural venciendo la carga hidrostática. Para volver a entrar en los tubos el líquido desciende por un conducto central (*downcomer*). La fuerza impulsora se genera a partir de la diferencia de densidad de la solución, y en consecuencia de la presión hidrostática. El conducto central es una zona más fría con relación al interior de los tubos, donde el líquido está más caliente y con menor densidad. Es recomendable que el área del conducto central de retorno resulte entre 40-100 por ciento del área transversal del conjunto de tubos para que no se originen problemas de pérdida de carga (Mariani *et al.*, 2018).

La velocidad normal de entrada del líquido a los tubos es de 0.3 a 1 m/s. El aumento de entalpía de la solución a medida que la misma asciende a través de los tubos resulta suficiente para alcanzar la temperatura de ebullición, produciéndose vapor al llegar al extremo superior de los mismos (punto de menor presión). El nivel de líquido en el haz de tubos es una variable importante, si el mismo es alto aumenta la presión hidrostática y por ende, la temperatura de saturación; en cambio si es bajo se produce un mojado incompleto en la parte superior de los tubos. Cuanto menor sea la altura de los tubos mejor resulta el desempeño del equipo para líquidos con problemas de incrustaciones, pero simultáneamente aumenta el tiempo de operación y se debe recurrir a mayores diámetros de haz para compensar la disminución de área de intercambio. (Mariani *et al.*, 2018).

### *Ventajas*

Dentro de estas podemos mencionar las siguientes:

- Relativamente bajo costo, en particular si se fabrican de acero al carbono.
- Se obtienen coeficientes de transferencia de calor razonablemente altos para líquidos poco viscosos (viscosidad inferior a 5 cP).
- Dado que el diámetro de los tubos es relativamente grande, la limpieza interior de los mismos se ve facilitada.

### *Desventajas*

- Velocidad de circulación del líquido no es demasiado alta.
- Alto tiempo de retención en la superficie de calentamiento.

- No es recomendable su empleo en el caso de líquidos viscosos debido a que la velocidad de circulación puede resultar demasiado baja y por ende el valor del coeficiente de transferencia de calor.
- No resultan aptos para ser utilizados en el caso de sustancias térmicamente sensibles dado que los tiempos de residencia de la solución en el equipo en general son grandes.
- Son equipos con grandes diámetros porque requieren grandes áreas de transferencia debido a que los tubos son cortos.

## 2. Evaporadores Kestner o de película ascendente

Este tipo es conocido también como evaporador de tubos largos, los hay de circulación natural y forzada. Introducido en 1909, funciona bajo el principio de circulación tipo película. Los tubos tienen típicamente de 2.5 a 5 cm de diámetro.

Cuando se requieren evaporadores de gran capacidad, el evaporador Kestner puede proporcionar arreglos de evaporación compactos y de menor costo a través del empleo de tubos de mayor longitud, en el rango de 6 a 7.5 m. Por ejemplo, un Kestner de 2000 m<sup>2</sup> tiene un diámetro de 3 m, en comparación con 5.2 m para un evaporador Roberts equivalente. Sin embargo, en algunos diseños el Kestner requiere conectarse a un cuerpo separador de arrastres adicional, pero que es de diámetro pequeño. Normalmente se encuentran como primer o segundo efecto cuando se requieren grandes áreas de calentamiento para efectuar grandes extracciones de vapor. Los Kestner comparten con los evaporadores Roberts las propiedades de simplicidad y baja demanda de control por parte de operadores (Rein, 2012).

### Funcionamiento

El jugo ingresa por la parte inferior, y una mezcla de vapor y jugo arrastrado sale por la parte superior y entra en un separador, generalmente del tipo tangencial. El vapor sale en el extremo superior y el líquido por la parte inferior del separador. En los primeros modelos, el líquido concentrado se recirculaba a través de la unidad, aunque ahora el sistema de un solo paso se usa normalmente. La Figura 2 presenta un modelo de evaporador Kestner con su separador de arrastres incluido.

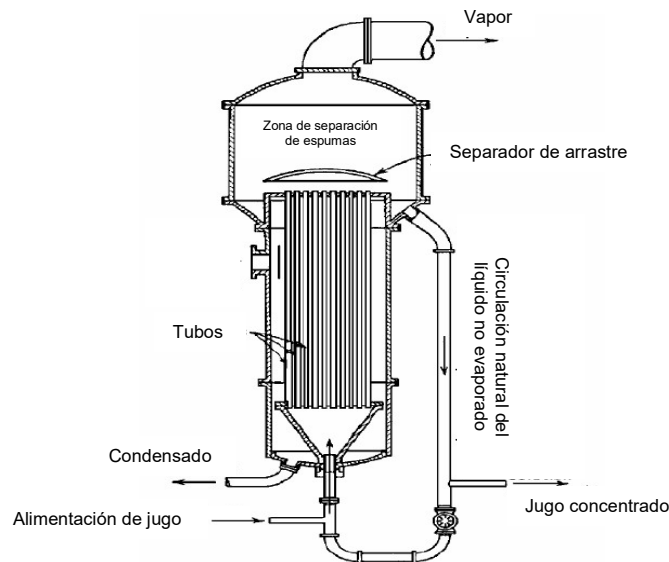
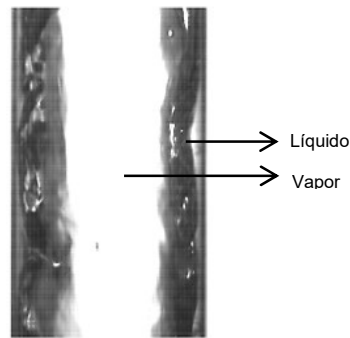


Figura 2. Evaporador Kestner. (Fuente: Mariani *et al.*, 2018)

La evaporación progresiva de un líquido, mientras pasa a través de un tubo, da lugar a una serie de regímenes de flujo. En el evaporador de tubo largo, el régimen de flujo anular o película ascendente se observa a lo largo de casi toda la longitud del tubo, manteniéndose la película ascendente por arrastre inducido por el núcleo de vapor que se mueve a alta velocidad con respecto a la película líquida (ver Figura 3). Sin embargo, con muchos materiales viscosos, las tasas de transferencia de calor en esta unidad son bajas porque hay poca turbulencia en la película, el grosor de la misma es demasiado grande para permitir una gran evaporación de la película como resultado de la conducción a través de ella (*Evaporator operation*, 2011).



**Figura 3. Flujo de película en tubo vertical. (Fuente: Guayón *et al.*, 2015)**

En evaporadores de este tipo, es esencial que la alimentación entre en los tubos lo más cerca posible a su punto de ebullición. Si la alimentación se sub-enfría, las secciones iniciales actuarán simplemente como un calentador, reduciendo así el rendimiento general de la unidad. Se hace mención del primer análisis publicado de la operación de este tipo de evaporador, en el cual se instaló un pequeño termopar dentro del tubo experimental, 32 mm de diámetro exterior y 5.65 m de largo, para que el termopar pudiera moverse arriba y abajo del centro del tubo. De esta manera, se descubrió que la temperatura aumentó ligeramente desde el fondo del tubo hasta el punto donde comenzó la ebullición, después de lo cual el cambio de temperatura fue relativamente pequeño. Aplicando esta técnica, fue posible determinar los coeficientes de transferencia de calor en las secciones del tubo sin ebullición (*Evaporator operation*, 2011).

#### *Ventajas*

- Mejora el coeficiente integral de transferencia de calor por aumento de la velocidad de circulación del líquido en los tubos si el líquido es poco viscoso.
- El empleo de un evaporador vertical de tubos largos de circulación forzada es aconsejable en el caso de soluciones que presenten viscosidades moderadamente altas.
- Bajos tiempos y volúmenes de residencia debido al aumento de velocidad del líquido en los tubos, es de gran utilidad para las sustancias que son sensibles al calor.
- Fácil incorporación de una limpieza química.
- Su costo es relativamente bajo.
- Alcanza una mayor evaporación a diferencia de los demás.
- Está particularmente indicado para líquidos formadores de espumas.

#### *Desventajas*

- Por lo general, no son apropiados para soluciones precipitantes o incrustantes.
- No se utilizan para soluciones muy viscosas.
- Algunos tipos requieren recirculación.

### 3. Evaporadores de película descendente

#### *Funcionamiento*

Un evaporador de película descendente, con el líquido moviéndose hacia abajo, funciona de manera similar al Kestner, como se muestra en la Figura 4. En este el jugo fluye bajo la fuerza gravitacional como una película delgada en el interior de los tubos verticales calentados, el vapor resultante normalmente fluye en forma coexistente con el líquido en el centro de los tubos.

Un equipo completo de este tipo está constituido por un evaporador, un separador de arrastres para separar los vapores del líquido residual y un condensador. Cuando se requieren altas proporciones de evaporación, parte del líquido concentrado se recircula nuevamente a la entrada del evaporador para garantizar que los tubos estén suficientemente húmedos. Una parte esencial de cada evaporador de película descendente es el sistema de distribución de líquido, ya que la alimentación de este no solo debe distribuirse uniformemente a todos los tubos, sino que también debe formar una película continua en la circunferencia interna de los tubos (*Evaporator operation*, 2011).

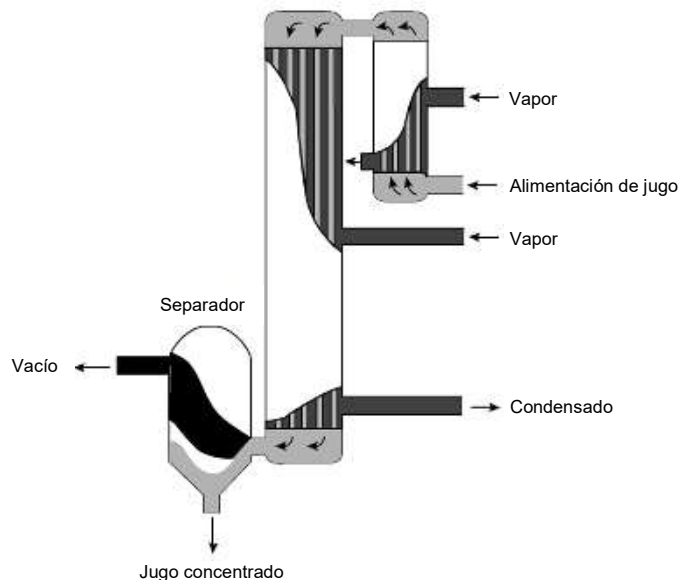


Figura 4. Evaporador de película descendente. (Fuente: *Evaporator operation*, 2011)

En el caso de productos sensibles al calor es conveniente operar con velocidades másicas bajas en cada tubo, lo que conduce a películas más finas y coeficientes de transferencia de calor equivalentes con menores gradientes de temperatura. Aunque, esta alternativa presenta la desventaja de favorecer en mayor medida el ensuciamiento (Mariani *et al.*, 2018).

Las ventajas y desventajas de los evaporadores de película descendente incluyen:

#### *Ventajas*

- Cortos tiempos de residencia en la superficie de calentamiento, sin recirculación.
- Bajas caídas de presión, 0.2-0.5 kN/m<sup>2</sup>.
- Adecuado para operación al vacío.



- Alta razón de evaporación, 70 por ciento sin recirculación y 95 por ciento con recirculación.
- Amplio rango de operación, hasta el 400 por ciento del rendimiento mínimo.
- Operación de costo mínimo.

#### *Desventajas*

- Los tubos secos se ensucian o bloquean rápidamente, por lo que es esencial que todos los tubos reciban un flujo adecuado de jugo para garantizar que estén bien humedecidos. Esto se debe a la mala distribución del material de alimentación a las unidades de película descendente. Para evitar esto se pueden implementar los siguientes sistemas de distribución: extender los tubos por sobre el mazo una determinada altura, emplear una placa distribuidora de líquido e implementar una boquilla atomizadora a la entrada al equipo. O se puede usar la técnica que consiste en precalentar la solución a tratar por sobre la temperatura de operación, de forma tal que se produzca una evaporación instantánea (*flash*) en el orificio de entrada al equipo. La misma provoca turbulencia y contribuye a dispersar el líquido.
- Para los evaporadores de película descendente la concentración que se puede alcanzar es limitada.
- Riesgo de inundación cuando el sentido del vapor es ascendente. En este caso, debe estimarse el valor del caudal de líquido que genera inundación y operar por debajo del mismo con un adecuado margen de seguridad.
- Las bombas de recirculación requieren una capacidad de sumidero adecuada para un trabajo constante, y este amortiguador agrega tiempo de retención a alta temperatura.
- Se deben tomar medidas para la adición inmediata de agua en caso de falla de la bomba o del suministro eléctrico.
- Se requieren instrumentos de protección y controles de los niveles y flujos de jugo para garantizar un funcionamiento seguro.
- Bajos coeficientes de transferencia de calor para jugos de caña.

De acuerdo con Rein (2012) estos evaporadores ofrecen algunas de las ventajas del evaporador Kestner, específicamente el uso de tubos largos y cuerpos más compactos. Sin embargo, estos demandan una distribución apropiada y uniforme del jugo en los tubos, y por lo tanto tienen la complicación de requerir recirculación del jugo y un sistema de distribución que alimente igual cantidad de jugo a cada tubo. Como se mencionó anteriormente, se debe contar con un sistema de alimentación de agua de emergencia, en caso de que falle el suministro de jugo; la ausencia de alimentación adecuada, incluso durante un breve periodo, puede resultar en incrustación severa de los tubos. El sistema de bombeo y los controles de nivel constituyen complicaciones adicionales.

#### *Caso real aplicado a ingenio*

En un ingenio de India se implementó un sistema evaporativo de quintuple efecto compuesto completamente por evaporadores de película descendente. Los objetivos bajo los cuales se realizó este diseño para esta planta fueron el buen funcionamiento de los evaporadores de película descendente en la industria del azúcar de caña, reducción considerable del consumo de vapor de la fábrica de azúcar y un claro aumento de la exportación de energía a la red local de suministro de energía.

La planta de evaporación con los cinco evaporadores de película descendente está diseñada para 7000 toneladas de caña de azúcar por día, utilizando el vapor vegetal del tercero para la cristalización. Cada uno de los primeros tres efectos tiene una superficie de 4000 m<sup>2</sup>, mientras que los dos últimos efectos tienen 1000 m<sup>2</sup>. Equipos adicionales complementan la planta, tales como: un tanque de condensado central para la expansión gradual del condensado, bombas para jugo claro, circulación de jugo y meladura. (Lehnberger et al., 2014).

Este diseño de evaporadores de película descendente funciona con un sistema de circulación de jugo independiente. Incluso si la velocidad de alimentación del jugo claro fluctúa, siempre se mantiene el funcionamiento correcto de los diferentes evaporadores, porque la humectación de los tubos de calentamiento con jugo circulante es independiente de la cantidad de jugo claro que ingresa al sistema.

El estudio concluye que los evaporadores de película descendente permiten implementar el ahorro de vapor para la producción de azúcar. Debido al gradiente de temperatura más bajo entre el vapor de calentamiento y el vapor vegetal, las incrustaciones y los gases incondensables tienen un claro efecto reductor de transferencia de calor en los evaporadores de película descendente.

Los procedimientos de limpieza adecuadamente implementados y la correcta descarga de gases incondensables permiten que las plantas con evaporadores de película descendente funcionen con fases de operación estables entre los intervalos de limpieza. El consumo específico de vapor para la producción de azúcar es entre 30 y 33 por ciento o.c., ayuda a maximizar la generación de energía eléctrica en comparación con los equipos que se han utilizado hasta ahora.

#### **4. Evaporadores de película agitada**

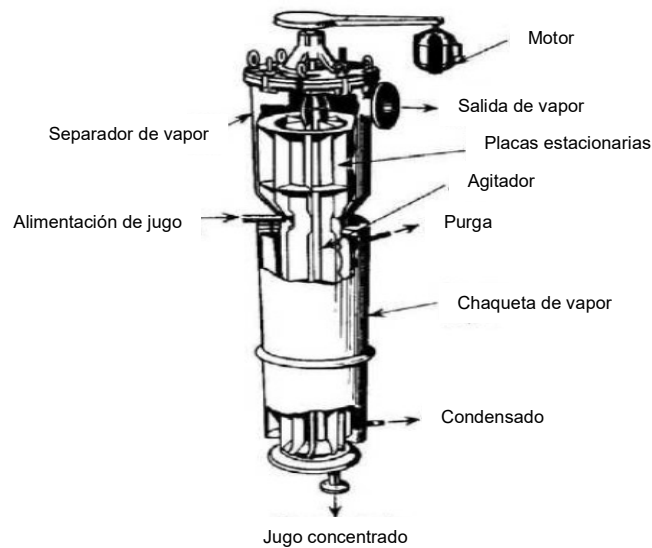
Este tipo de evaporador de película descendente, se muestra en la Figura 5. Consiste en un tubo vertical, cuya parte inferior está rodeada por una chaqueta que contiene el medio de calentamiento (vapor). La parte superior del tubo no está revestido y actúa como un separador. El tubo interno por donde baja el jugo posee un diámetro grande de 1.25 m y longitud entre 6 a 7 m. Un rotor, accionado por un motor externo, tiene cuchillas o paletas giratorias que se extienden casi hasta la parte inferior del tubo, montadas de manera que haya un espacio libre de solo aproximadamente 1.3 mm entre sus puntas y la superficie interna del tubo.

##### *Funcionamiento*

El jugo o líquido a concentrar se recoge mientras ingresa por las cuchillas giratorias y se lanza contra la pared del tubo. Esta acción proporciona una película delgada de líquido y suficiente agitación para proporcionar una buena transferencia de calor, incluso con líquidos muy viscosos. La película fluye hacia abajo por gravedad, concentrándose a medida que cae. El jugo concentrado es retirado en la parte inferior por una bomba, el vapor sale de la parte superior de la unidad donde pasa a un condensador.

Agua y varias soluciones acuosas de sacarosa y glicerol se analizaron en el evaporador. Una característica notable de la unidad fueron los altos flujos de calor obtenidos con las soluciones viscosas. Se obtuvieron valores tan altos como  $70 \text{ kW/m}^2$  al concentrar una corriente de sacarosa del 60 al 73 por ciento, a una diferencia de temperatura de la película de 16.5 K con una velocidad del agitador de 8.3 Hz. Los flujos obtenidos para la evaporación del agua en condiciones similares fueron casi 4.5 veces mayores (*Evaporator operation*, 2011).

Una ventaja de los evaporadores de película agitada, especialmente aquellos que producen una superficie raspada, es la reducción o supresión completa de la formación de incrustaciones, sin embargo, en procesos donde el rendimiento es muy alto, este tipo de unidad obviamente se vuelve poco rentable y la forma tradicional de evitar incrustaciones al operar un proceso de evaporación instantánea, es más adecuada (*Evaporator operation*, 2011).



**Figura 5. Evaporador de película agitada. (Fuente: Khoodaruth, 2015)**

#### *Ventajas*

- Posee bajos tiempos de residencia.
- Puede utilizarse para líquidos de cualquier viscosidad, desde 1,000 hasta 100,000 cP, especialmente para viscosidades altas.
- Ampliamente usado para sustancias con gran sensibilidad térmica.
- Adecuado para sustancias que producen incrustaciones o ensuciamiento.

#### *Desventajas*

- Utilizan un motor externo acoplado para hacer girar un conjunto de paletas, lo cual representa un consumo energético extra.
- Requieren mayor mantenimiento mecánico que otros tipos de evaporadores debido a que son más complejos mecánicamente.
- Su costo de adquisición está por encima de los otros evaporadores.

#### *Caso real aplicado a ingenio*

El caso presentado a continuación fue realizado en un ingenio de Mauricio, por el investigador Abdel Khoodaruth en el 2015.

Con el objetivo de reducir el consumo de vapor de la fábrica de azúcar, se propone aumentar el sistema evaporativo de cinco efectos existente en un efecto más. El efecto adicional se agregará antes del primer efecto del tren de evaporadores existente, y es del tipo película agitada. Para estos evaporadores, solo se necesita una diferencia de temperatura de 5-6 °C entre el jugo de caña y el vapor vegetal para el funcionamiento adecuado del evaporador en lugar de más de 10 °C para el caso de evaporador de película ascendente. Además, debido a la ausencia de presión hidrostática en el evaporador de película agitada, no se requiere elevación del punto de ebullición. Eligieron un equipo de área superficial de 5000 m<sup>2</sup> porque el jugo de caña que ingresa al primer efecto tiene el °Brix más bajo, se necesita una tasa de transferencia de calor más alta para la evaporación del jugo de caña, por ende, mayor área es necesaria.

Al final, lograron una economía de 41.5 ton/h por tonelada de caña al cambiar de un sistema de cinco efectos a uno de seis efectos. Esto representa un ahorro del 9.8 por ciento en términos de consumo de vapor para la fábrica.

Este ahorro en el consumo de vapor se puede utilizar para producir electricidad adicional. Dado que una tonelada de vapor produce 112 kWh en esta fábrica sometida al estudio, por cada tonelada de caña, se puede producir una cantidad adicional de 4.6 kWh de electricidad. Por lo tanto, para una producción anual de 1.2 millones de toneladas de caña, esto representa una electricidad adicional de 5.5 GWh que se puede exportar a la red nacional y generar ingresos adicionales de USD 660,000.00 dado que 1 kWh se vende por USD 0.12. Dado que el costo de un evaporador de película agitada es de alrededor de USD 2,000,000.00 y la reducción de tamaño de los evaporadores existentes costará USD 550,000.00, la recuperación del cambio de cinco efectos a seis efectos es de alrededor de 4 años. Además, como se muelen aproximadamente 3.9 millones de toneladas de caña anualmente en Mauricio, se pueden producir alrededor de 18 GWh de electricidad.

## 5. Evaporadores de placas

Constructivamente son similares a los intercambiadores de placas, pero se diferencian en forma de operación. Consiste en una serie de placas empaquetadas montadas dentro de un marco de soporte, como se muestra en la Figura 6. Se encuentran disponibles para operar en cuatro configuraciones distintas: película ascendente, película ascendente/descendente, película descendente, circulación forzada con ebullición suprimida y película fina, en este último caso la película delgada se alcanza estableciendo las condiciones fluido-dinámicas adecuadas y empleando una geometría de placa particular (Mariani *et al.*, 2018). A continuación se detallan dos de estas configuraciones.

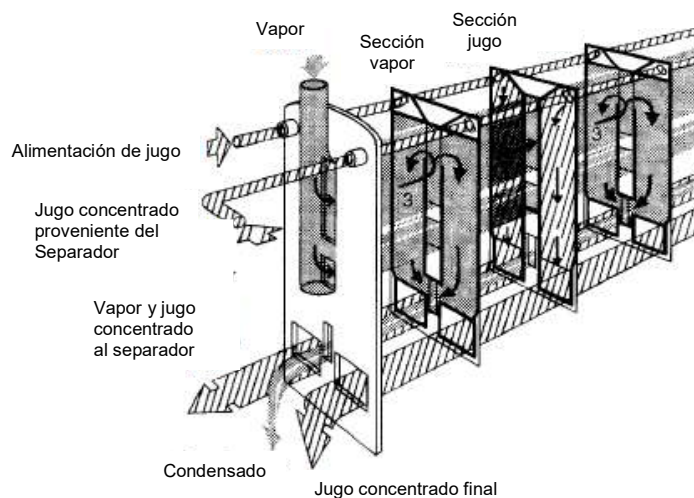


Figura 6. Evaporador de placas. (Fuente: *Evaporator operation*, 2011)

### 5.1. Evaporadores de placas de película ascendente

Cada unidad comprende una placa de producto y una placa de vapor, esta disposición se repite para proporcionar el área de transferencia de calor requerida. Los diseños más recientes consisten de dos placas adyacentes soldadas entre sí que conforman espacios para el paso del vapor, mientras que los pasos de jugo se forman entre placas de vapor adyacentes separadas por una empaquetadura (Rein, 2012).

En los evaporadores de placas de película ascendente el jugo se alimenta desde abajo y su ebullición comienza dentro del conjunto de placas a medida que asciende. La mezcla líquido-vapor que sale del paquete de placas pasa a un cuerpo en el cual el líquido es separado del vapor y donde se cuenta con algún tipo de separador de arrastres. Estos evaporadores se utilizan frecuentemente para adicionar superficie de calentamiento a efectos evaporadores existentes, pero en algunas instancias se utilizan como único evaporador de algunos efectos (Rein, 2012).

### 5.2. *Evaporadores de placas de película descendente*

Éste es el diseño más reciente de evaporadores, que consiste de un paquete de placas corrugadas de acero inoxidable soldadas entre sí, sin que sea necesario utilizar empaquetaduras. Se diseñan de manera que los pasajes para el paso del jugo se aproximen a una serie de tubos verticales, típicamente de 9 mm de diámetro, a través de los cuales el líquido fluye en forma descendente. Como en el caso del sistema de película ascendente, el vapor o escape se alimenta entre placas alternadas, y de nuevo, se logra un sistema de calentamiento compacto (Rein, 2012).

Este diseño requiere de un sistema distribuidor de jugo y contar con un mínimo flujo descendente a través de cada “tubo”, pero los requerimientos no son tan críticos como en el caso de los evaporadores tubulares de película descendente. En caso de una alimentación desigual localizada o taponamiento entre placas, el jugo puede en teoría fluir desde un “tubo” a otro, a través de pasajes interconectores horizontales. Las primeras instalaciones mostraron que en la práctica es crítico lograr una buena distribución del líquido en el paquete de placas. Los paquetes de placas son relativamente cortos, de alrededor de 300 mm de longitud, luego de lo cual se efectúa una redistribución del jugo (Rein, 2012).

En comparación con los evaporadores tubulares, los evaporadores de placas pueden ofrecer importantes ventajas en términos de altura libre, espacio, accesibilidad y flexibilidad (*Evaporator operation*, 2011). A continuación se mencionan otras ventajas:

#### *Ventajas*

- Tienen bajo costo de instalación, ventaja especialmente importante, en el caso que sea necesario emplear materiales de construcción costosos como aleaciones de níquel, aceros inoxidables, titanio etc.
- Instalaciones bastante compactas.
- La relación área de transferencia/volumen del equipo es mucho mayor que en los otros evaporadores.
- Los coeficientes de transferencia de calor para los equipos de placas resultan, en la mayoría de los casos, más altos que en las unidades de tipo tubular.
- Los fluidos circulan a gran velocidad dentro del equipo, desarrolladas por las corrugaciones de las placas. Por ello el líquido puede atomizarse parcialmente generando mayores coeficientes de transferencia de calor. Las altas velocidades también dificultan la formación de costras e incrustaciones y el crecimiento de colonias de bacterias.
- Dada la facilidad de desarme de estos equipos la limpieza de los mismos puede realizarse en forma relativamente sencilla.
- La capacidad de proceso de estas unidades puede modificarse en forma relativamente sencilla mediante el agregado o quitado de placas.
- Los tiempos de residencia en este tipo de equipos son bajos, circunstancia que los convierte especialmente indicados para procesar alimentos o sustancias sensibles al calor.

### *Desventajas*

- Limitación en las condiciones de operación (aproximadamente 10 atm y 200 °C), impuesta por las características de los materiales que actúan como juntas (usualmente elastómeros, ejemplo: estireno-butadieno).
- El material de las juntas, impide el uso de este tipo de equipo con algunos fluidos corrosivos.
- Las posibilidades de fugas de fluido son mayores que en el caso de los equipos tubulares.
- El espaciado entre las placas limita el tamaño de las partículas que pueden llegar a ser toleradas en suspensión a aproximadamente 0.25 mm.
- Se debe tener precaución durante el diseño para asegurar proporciones de flujo del líquido adecuadas a través de la unidad.
- Se ha informado sobre serias incrustaciones de las placas cuando el sistema no se opera con suficiente recirculación o cuando la distribución del jugo entre las placas no es uniforme. Por lo tanto, el diseño de las placas y el sistema de distribución del jugo son importantes para lograr un flujo uniforme en el evaporador.

## **6. Evaporadores SRI -Roberts de nuevo diseño-**

Este es un evaporador desarrollado por el Instituto de Investigación del Azúcar (*Sugar Research Institute - SRI- en inglés*) de Australia, que cuenta con el mismo diseño robusto del evaporador Roberts, pero con modificaciones que hacen más eficiente el proceso.

El rendimiento de transferencia de calor de muchos evaporadores Roberts en Colombia e India es entre un 20 y un 40 por ciento más bajo que el típico de las instalaciones de evaporadores multiefectos australianos. Esto motivó a realizar una examinación más de cerca sobre las diferencias físicas en la práctica del diseño y dio lugar a sugerencias para modificaciones del diseño que enfatizan sobre principios de diseño que brindan patrones de circulación mejorados y un rendimiento de transferencia de calor más alto (Wright *et al.*, 2003).

Las consideraciones de diseño se describen a continuación:

- Los sistemas de alimentación de jugo.
- Sistemas de extracción de jugo y control de nivel.
- La entrada de vapor y el flujo de vapor a través de la calandria.
- Extracción de condensado.
- Descarga de gases incondensables de la calandria.
- Las rutas del vapor en la calandria.

### *Ventajas*

- Diseño robusto, puede manejar fluctuaciones del proceso.
- Buena eliminación de condensados y gases.
- Control simple.
- Fácil acceso para reparación o limpieza, ya sea hidráulica o mecánica.
- Simple para realizar limpieza química.
- No requiere uso de bombas para el jugo.
- Coeficiente de transferencia de calor similar al evaporador de película descendente.

### *Desventajas*

- Necesita una tasa de vapor y  $\Delta T$  mínima para un funcionamiento efectivo.
- Requiere un  $\Delta T$  más elevado para el evaporador final.
- Mayor tiempo de residencia que los evaporadores de película descendente.
- Mayor pérdida de sacarosa que los evaporadores de película descendente.
- Ocupa gran espacio superficial (huella).
- Un 10 por ciento mayor costo a los evaporadores de película descendente, de acuerdo con datos de Australia.

### *Caso real aplicado a ingenio*

Un nuevo proyecto de cogeneración en la fábrica de San Antonio en Nicaragua solicitó el diseño, fabricación e instalación de un evaporador estilo Roberts con calandria de 5300 m<sup>2</sup> junto con otros trabajos asociadas para aumentar la capacidad de la estación a los niveles requeridos para una alta economía de vapor de proceso.

De acuerdo con su estudio el rendimiento general y los resultados de transferencia de calor estuvieron muy por encima de las expectativas. El nuevo diseño, con variaciones en la disposición de la forma del fondo, se recomienda como base para el desarrollo futuro del evaporador tipo Roberts en la industria azucarera.

## **SELECCIÓN DE EVAPORADORES**

Los equipos utilizados para concentrar el jugo dentro de los ingenios guatemaltecos han sido durante décadas los evaporadores tipo Roberts de tubos cortos. Con el desarrollo de nuevas tecnologías emergentes se han elaborado unidades más eficientes, tanto en el uso de vapor como en la concentración de la solución, principalmente al disminuir tiempos de residencia sobre las superficies de calentamiento.

Realizar la selección correcta de un tipo de evaporador que más se adecúe a las condiciones y materiales utilizados es una tarea que requiere conocimiento. Deben tomarse en cuenta: todas las tecnologías disponibles en el mercado, características del material a concentrar, condiciones operativas del proceso y cualquier restricción específica del manejo del material.

En la industria azucarera, algunos estudios se han llevado a cabo con la finalidad de comparar eficiencias de las tecnologías. Como el realizado en Sudáfrica por Ramaru *et al.*, en 2018, el cuál utilizó como variable comparativa el tiempo de retención de los evaporadores Roberts, de placas con película ascendente o descendente, de película ascendente o Kestner y de película descendente. O el realizado por Rein (2012) que compara más variables operativas como: flujo del líquido, tiempo de residencia, efecto de los sólidos suspendidos, tamaño y densidad de la superficie de intercambio, efecto de la altura hidrostática, opciones de limpieza, costos, opciones de expansión y coeficientes de transferencia de calor.

Según Ramaru *et al.* (2018) la inversión de la sacarosa es más severa a bajo °Brix, altas temperaturas, bajo pH y altos tiempos de retención, condiciones que generalmente pertenecen a los primeros efectos de las estaciones de evaporación. Los grandes evaporadores del primer y segundo efecto contribuyen inevitablemente a pérdidas indeterminadas por la degradación de la sacarosa. Purchase *et al.* (1987) informaron que existe una correlación entre el tamaño relativo de los dos primeros efectos y la pérdida de sacarosa indeterminada. Utilizando datos de fábricas sudafricanas, se observó que las fábricas con áreas de calentamiento más grandes en los dos primeros efectos experimentaron pérdidas de inversión de sacarosa relativamente más altas (Purchase *et al.*, 1987).

Como se mencionó, el jugo en los efectos iniciales de un tren de evaporadores se encuentra principalmente a bajo °Brix y expuesto a altas temperaturas, por lo que es de suma importancia seleccionar equipos para estas tareas que proporcionen un tiempo de retención bajo y logren minimizar las pérdidas por inversión. Este factor de tiempo se tomó en cuenta para realizar las comparaciones que siguen.

### **Experiencias prácticas en evaporadores Roberts**

Con respecto a evaporadores Roberts, algunas fábricas han adoptado grandes cuerpos de este tipo. Su tamaño físico es a menudo una limitación en las fábricas ya existentes con poco espacio para crecimiento, pero por mucho la mayor preocupación con estos es la pérdida oculta de sacarosa, manifestada como una pérdida indeterminada por inversión mientras el jugo se retiene a alta temperatura en los evaporadores. Esta puede ser grande pero a menudo no se reconoce porque las pérdidas directas no se miden fácilmente.

Varios investigadores como Dairam *et al.* (2016), Schäffler (2001) y Purchase *et al.* (1987) han encontrado que la fórmula de Vukov, ampliamente utilizada, subestima las pérdidas de inversión reales debido a suposiciones erróneas sobre las condiciones del proceso de evaporación y las tasas de flujo utilizadas para estimar el tiempo de retención.

Rein y Love (1995) midieron un tiempo de retención promedio mediante pruebas de rastreo en cuatro cuerpos pequeños de primer efecto Roberts (superficie de calentamiento total de 1074 m<sup>2</sup>) de 27.6 minutos. A un °Brix promedio en el recipiente de 18 por ciento, la temperatura del jugo de 116 °C (presión V1 170 kPa abs) y un pH real de 6.7, la pérdida de sacarosa calculada fue 0.72 por ciento. La experiencia del autor (no publicada) es que los tiempos de retención en otros evaporadores Roberts del ingenio Tongaat Hulett fueron entre 20 y 28 minutos.

Eggleston y Monge (2005) encontraron pérdidas de sacarosa promedio de 0.55 por ciento en los evaporadores Roberts en una fábrica de Estados Unidos. Más recientemente, Rackemann y Broadfoot (2016) predijeron una destrucción de sacarosa de 1.1 a 1.2 por ciento, lo que resultó en una pérdida de hasta 2.0 por ciento de la producción de azúcar, en una fábrica de cogeneración australiana con grandes evaporadores Roberts en el extremo frontal del sistema. Estos autores afirmaron que tales condiciones eran comunes a varios ingenios australianos.

En un estudio realizado por CENGICAÑA en Guatemala, durante la zafra 2019-2020, se cuantificaron las pérdidas globales en evaporadores de toda la industria, la cual utiliza equipos tipo Roberts. El resultado gremial fue de 0.66 por ciento (0.76 kg/t).

En general los tiempos de retención prolongados en los evaporadores Roberts se atribuyen al gran volumen de plato de fondo y jugo en los tubos en relación con la superficie de calentamiento. Estos tiempos son mucho más largos que el tiempo de residencia de 2.4 minutos en Kestner de película ascendente (incluidos sus separadores) medido por Rein y Love (1995) o en evaporadores de película descendente.

Existe un tipo de diseño de evaporadores Robert modificados, denominados “semi Kestner”, generalmente con tubos de 3 m hasta poco más de 4 m, siendo el diseño del ingenio Malalane con tubos un tanto más largos, de 4.6 m. Estos equipos probablemente se describan mejor como “Roberts de tubo largo”, la mayoría con tomas de jugo sin restricciones (Ramaru *et al.*, 2018).



### **Experiencias prácticas en evaporadores Kestner o de película ascendente**

Los evaporadores de película ascendente de tubo largo Kestner han sido ampliamente adoptados como la solución preferida en Sudáfrica, Colombia y varios otros países debido a su corto tiempo de retención. La corta retención en estos cuerpos se debe a que tienen tubos largos que permiten altas cargas de evaporación por pasada única, lo que da como resultado altas velocidades que conducen a altos coeficientes de transferencia de calor. Esto permite una base de diámetro pequeño y poco profunda para el Kestner, el nivel aparente de jugo en funcionamiento suele ser del 10 al 15 por ciento de la altura del tubo (que se compara con el 30-40 por ciento en el Roberts). En comparación con los evaporadores Roberts grandes, las pérdidas por inversión (según la fórmula de Vukov) en estos equipos de tubo largo son un 80-90 por ciento menos. Son significativamente más baratos que los Roberts y ocupan menor espacio (similar a los evaporadores tubulares de película descendente). Son simples de operar (tan simples como los Roberts), se autorregulan y no requieren instrumentación de protección ni bombas de recirculación (Ramaru *et al.*, 2018).

Se ha demostrado que un evaporador Kestner de planta piloto con tubos de 7 m de largo exhibía mejores coeficientes de transferencia de calor que los equipos Roberts convencionales de tubos cortos en todos los efectos de la estación de evaporación del ingenio Illovo. La experiencia práctica general en la industria ha confirmado que los Kestner logran coeficientes de transferencia ligeramente más altos que los Roberts en tareas similares, los primeros efectos suelen tener un promedio de 2.5 a 2.9 kW/m<sup>2</sup>K durante un ciclo de limpieza de dos semanas (ver Cuadro 1). Por estas razones, los evaporadores Kestner constituyen ahora el 90 por ciento de la superficie de calentamiento total de primer efecto en la industria sudafricana. Una fábrica tiene tres evaporadores tubulares de película descendente y cuatro fábricas todavía tienen evaporadores Roberts de primer efecto que funcionan en paralelo con los nuevos Kestner (Ramaru *et al.*, 2018).

Los tres evaporadores de película descendente no han sido seguidos por otros debido a sus requisitos de distribución de jugo y la necesidad de bombas de recirculación de alto volumen, ninguno de los cuales es requerido por los evaporadores Kestner. Con líneas de reflujo del tamaño correcto, el nivel de jugo en un Kestner se autorregula, por lo que, a diferencia de los evaporadores de película descendente, no se requiere instrumentación ni intervención del operador (Ramaru *et al.*, 2018).

Bosch Projects se ha basado en las ventajas comprobadas del diseño de Kestner para desarrollar un evaporador de tubo largo mejorado. En lugar del separador de arrastre separado común en los Kestner de la industria azucarera, su diseño tiene una zona de alta separación situada por encima de la calandria, seguida de un separador de persiana eficiente. Normalmente, el vapor sale en dos o más direcciones (una hacia el siguiente evaporador y una o más hacia las salidas de vapor). El diseño incluye recirculación impulsada por gravedad para garantizar una tasa de humectación adecuada del tubo. El funcionamiento y los coeficientes de transferencia de calor son similares a los Kestner convencionales, pero con un tiempo de retención de jugo más bajo (menos de 2.5 minutos) debido a que no se detiene en un recipiente separador (Ramaru *et al.*, 2018).

### **Experiencias prácticas en evaporadores de película descendente**

Los evaporadores tubulares de película descendente ocupan poco espacio, pueden lograr una diferencia de temperatura baja ( $\Delta T$  entre el vapor y el jugo) y tienen tiempos de retención cortos, pero tienen problemas prácticos, como los mencionados anteriormente en sus desventajas.

De acuerdo con Ramaru *et al.* (2018) para asegurar una humectación adecuada en todo momento, se requiere un flujo de jugo mínimo de 30 litros por hora por centímetro de longitud periférica del tubo. Para ello, es necesario un bombeo constante de recirculación de alto volumen, que utiliza unos 12.5 kW de potencia por 1000 m<sup>2</sup> de superficie de calentamiento.

Los coeficientes de transferencia de calor pueden ser considerados altos, estos son una ventaja de los evaporadores tubulares de película descendente (limpios); sin embargo, investigadores encontraron que esto se compensa con tasas de ensuciamiento bastante altas. Registraron los coeficientes de transferencia en un equipo de primer efecto que disminuyeron de 2.4 a 1 kW/m<sup>2</sup>K en el transcurso de un ciclo de limpieza de tres semanas (Ramaru *et al.*, 2018).

### **Experiencias prácticas en evaporadores de placas**

Los evaporadores de placas proporcionan una solución potencial al problema de la destrucción de sacarosa debido a los largos tiempos de retención y se han utilizado con éxito en la industria de la remolacha. Sin embargo, el jugo claro de caña que no se trata excepto por adición de cal tiene un potencial mucho mayor de ensuciamiento en las superficies calientes que el jugo de remolacha, y la mayoría de los diseños de evaporadores de placas son extremadamente difíciles o imposibles de limpiar cuando están severamente sucios (Ramaru *et al.*, 2018).

Se han reportado experiencias de ensuciamiento extremo en evaporadores de placa de película ascendente en Ubombo en Suazilandia y Hippo Valley en Zimbabue, y ensuciamiento catastrófico en evaporadores de placa de película descendente en Riche En Eau en Mauricio y La Gloria en México. Los dos últimos de estos dieron como resultado que se tuviera que construir una nueva y costosa área de evaporación. Por lo tanto, no se recomiendan los evaporadores de placas a gran escala para las fábricas de caña, aunque los calentadores de placa de gran espacio instalados entre las unidades Roberts o de película descendente tubular pueden usarse para aumentos secundarios en la capacidad. El uso de un calentador de placas con un camino mucho menos obstruido y un separador como etapa de evaporación se está adoptando ampliamente en varios países como Estados Unidos, India y Vietnam. Sin embargo, se experimentarán incrustaciones catastróficas si las placas se secan con vapor (Ramaru *et al.*, 2018).

### **Comparación de tecnologías**

La selección del equipo idóneo para concentración de una solución es una labor que debe tomar en cuenta varios parámetros. Distintos equipos se han desarrollado en un intento de abarcar uno o más de estos parámetros. En vista de la gran cantidad de tipos de evaporadores disponibles, la selección del equipo para una aplicación en particular solo se puede hacer después de un análisis detallado de todos los factores relevantes. Estos incluirán las propiedades del líquido a evaporar (viscosidad, sensibilidad al calor, propenso a formar incrustaciones), los costos de capital y funcionamiento, la capacidad, la retención y las características del tiempo de residencia (*Evaporator operation*, 2011).

En el libro de Rein (2012) se recopila información de 4 tipos de evaporadores, comparándolos de acuerdo a diferentes factores operativos propios de cada equipo, cuyo resumen se presenta detallado a continuación en el Cuadro 1.

**Cuadro 1. Comparación de evaporadores por diferentes variables. (Fuente: Elaboración propia, basado en Rein, 2012)**

	<b>Roberts</b>	<b>Kestner</b>	<b>Placas</b>	<b>Película descendente</b>
<b>Flujo del líquido</b>	No requiere distribuidor	No requiere distribuidor	Requiere distribuidor (película descendente)	Requiere distribuidor
<b>Tiempo de residencia</b>	Prolongado (28 min)	Mucho menor a Roberts (2.4 min)	Mucho menor a Roberts	Mucho menor a Roberts
<b>Efecto de los sólidos suspendidos</b>	Poca susceptibilidad	Poca susceptibilidad	Susceptible a bloqueos	Poca susceptibilidad
<b>Tamaño de superficie de intercambio</b>	3000 m <sup>2</sup> (5100 m <sup>2</sup> con 6.9 m de diámetro)	6000 m <sup>2</sup>	2000 m <sup>2</sup> (película ascendente)	6000 m <sup>2</sup>
<b>Densidad de superficie de intercambio</b>	40 a 50 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> de volumen	90 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> de volumen	240 m <sup>2</sup> /m <sup>3</sup> de volumen (película descendente)	---
<b>Efecto de la altura hidrostática</b>	Si hay efecto hidrostático	Si hay efecto hidrostático	Si hay efecto hidrostático	No hay efecto hidrostático
<b>Opciones de limpieza</b>	Limpieza mecánica y química	Limpieza mecánica y química	Limpieza química	Limpieza química
<b>Costos</b>	Bajo costo de instalación	Menor costo de instalación que Roberts	Menor costo de instalación	---
<b>Opciones de expansión</b>	Remoción de calandria e instalación de paquete de placas de película descendente	Adición como primeros efectos y redistribución de Roberts existentes	Fácil expansión por placas adicionales (película ascendente)	---
<b>Coefficientes de transferencia de calor</b>	2.5 a 2.8 kW/m <sup>2</sup> K (1er. efecto)	2.9 kW/m <sup>2</sup> K (1er. efecto)	2.6 a 5.5 kW/m <sup>2</sup> K (1er. efecto y película descendente)	1.2 kW/m <sup>2</sup> K (1er. efecto)

Por otra parte, se ha realizado otra comparación en el documento de (*Evaporator operation*, 2011), donde se ha intentado probar la idoneidad de cada diseño básico para tratar los problemas encontrados en la práctica, y la información básica se presenta en el Cuadro 2. Los factores considerados incluyen la capacidad de manejar líquidos en tres rangos de viscosidad, para tratar espuma, incrustaciones, producción de cristales, sólidos en suspensión y materiales sensibles al calor. También se proporciona una comparación del tiempo de residencia y el volumen de operación. Es interesante notar que el evaporador de película agitada es el único que se muestra aplicable en todo el rango de condiciones cubiertas.

**Cuadro 2. Selección de evaporadores de acuerdo a propiedades del jugo y condiciones operativas. (Fuente: Elaboración propia, basado en *Evaporator operation*, 2011)**

Categoría operacional	Tipo de evaporador	Condición de alimentación <sup>a</sup>							Adecuado para productos susceptibles al calor	Tiempo de retención <sup>b</sup> [s]	Volumen de retención <sup>c</sup> [m <sup>3</sup> ]
		Viscosidad alta (>2000 mN s/m <sup>2</sup> )	Viscosidad media (100-1000 mN s/m <sup>2</sup> )	Viscosidad baja (<100 mN s/m <sup>2</sup> )	Espuma	Incrustación o suciedad	Producción de cristales	Sólidos en suspensión			
Recirculación	Calandria <sup>d</sup> (Tubo corto vertical)								No	168.0	3.0
	Circulación forzada								Si	41.6	12.8
	Película descendente								No <sup>e</sup>	No se dispone	No se dispone
	Circulación natural (termosifón)								No <sup>e</sup>	16.0	10.1
Un solo paso	Película agitada (vertical u horizontal)								Si	1.0	1.0
	Tubular (tubos largos)								Si	No se dispone	No se dispone
	Película descendente								Si	No se dispone	No se dispone
Un solo paso tipo especial	Tubular (tubos largos)								Si	No se dispone	No se dispone
	Película ascendente								Si	0.5	0.8
Un solo paso tipo especial	Concentrador de película ascendente								Si	0.5	0.8
	Placas (puede ser con recirculación)								Si	No se dispone	No se dispone

Aplicable a las condiciones indicadas

Aplicable en la parte inferior del rango indicado

a: Las viscosidades están a temperatura de operación.

b: Basado en evaporador de película agitada=1.

c: Basado en evaporador de película agitada=1, a igual superficie.

d: Requiere un arreglo especial de separación para líquidos espumosos.

e: Puede ser utilizado en casos especiales.

## CONCLUSIONES

Los evaporadores Roberts han demostrado ser una tecnología que conlleva elevadas pérdidas de sacarosa, principalmente en los primeros efectos del sistema evaporativo, debido a las altas temperaturas y largos tiempos de retención manejados.

Con los evaporadores Kestner de tubos largos y película ascendente se ha reducido la problemática del tiempo de retención alto, ya que estudios en fábricas de otros países encontraron que dichos tiempos se reducen de 28 min, en Roberts, a 2.4 min en Kestner. Los coeficientes de transferencia de calor obtenidos son incluso mayores a los Roberts y de película descendente. Estos se han adoptado para ser colocados en los primeros efectos en países como Sudáfrica, Colombia, entre otros.

Los evaporadores de película descendente presentan bajos tiempos de retención, menores a los Roberts. Sin embargo, no tienen los mejores coeficientes de transferencia de calor, requieren control y uso de distribuidores de jugo para mantener un flujo constante, necesario para que todos los tubos permanezcan mojados y así evitar su incrustación severa.

Los evaporadores de película agitada son muy versátiles, pueden ser utilizados para cualquier condición operativa y propiedad del jugo. Se encontró evidencia de su uso en un ingenio de Mauricio para mejorar la

eficiencia en el uso de vapor, más no en la recuperación de azúcar. Aunque requiere uso de un motor para accionar las aspas del equipo, lo que se traduce en costo adicional de energía.

Los evaporadores de placas presentan los mejores coeficientes de transferencia de calor, pero su gran inconveniente es su fácil taponamiento por incrustaciones. Esto hace muy difícil su limpieza, incluso en ocasiones se necesita el cambio del paquete de placas.

Para la instalación de los evaporadores SRI puede utilizarse como base la estructura de los evaporadores Roberts ya existentes. Comparados con los Roberts convencionales, cuentan con menor tiempo de retención y mejor coeficiente de transferencia de calor. Aún con estos beneficios, se logran menores pérdidas de sacarosa con otras tecnologías.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Carchipulla, D; Castañeda, K; Galárraga, V; Oña, M. 2014. Evaporador vertical de tubos largos. Universidad Central del Ecuador. Quito, Ecuador. 6 p.
2. Dairam, N; Ramaru, R; Ngema, S; Sutar, N; Madho, S. 2016. *Sucrose losses across the Gledhow evaporators determined using NIRS predictions*. Proc S Afr Sug Technol Ass 89. p. 391-405.
3. Eggleston, G; Monge, A. 2005. *Minimisation of seasonal sucrose losses across Robert's-type evaporators in raw sugar manufacture by pH optimisation*. Journal of Agriculture, Food and Chemistry 53. p. 6332-6339.
4. *Evaporator operation*. 2011. Descargado el 6 de enero de 2020. De: [http://www.uobabylon.edu.iq/uobColeges/ad\\_downloads/4\\_12948\\_558.pdf](http://www.uobabylon.edu.iq/uobColeges/ad_downloads/4_12948_558.pdf)
5. Gayón, J; González, A; Vargas, P. 2015. Uso de imágenes de videos digitales para estimar el hold-up de líquido en tuberías verticales y reconocer los patrones de flujo. Universidad Simón Bolívar. Caracas, Venezuela. 10 p.
6. Khoodaruth, A. 2015. *Use of Falling Thin Film Evaporator for increasing cogenerated electricity in cane flexi-factory in Mauritius*. International Conference on Applied Energy. Réduit, Mauricio. 6 p.
7. Lehnberger, A; Brahim, F; Mallikarjun, S S. 2014. *Falling-film evaporator plant for a cane sugar factory: Presentation of the concept and operating results*. International Sugar Journal. p. 604-609.
8. Mariani, N J; Keegan, S D; Alves, J A; Martínez, O M. 2018. Evaporadores. Cátedra de Tecnología de Calor. Universidad Nacional de la Plata. Buenos Aires, Argentina. 20 p.
9. Purchase, B S; Day-Lewis, C M J; Schäffler K J. 1987. *A comparative study of sucrose degradation in different evaporators*. Proc S Afr Sug Technol Ass 61. p. 8-13.
10. Rackemann, D W. 2021. *Robert evaporators. Benchmarking the SRI Roberts design*. Webinar de CENGICAÑA. p. 1-16.
11. Rackemann, D W; Broadfoot, R. 2016. *Evaluation of sucrose loss in evaporators for different processing configurations*. Proc Int Soc Sug Cane Technol 29. p. 262-271.
12. Ramaru, R; Du Plessis, N; Moor, BStC; Rosettenstein, S. 2018. *Evaporators for large first and second effects*. Proc S Afr Sug Technol Ass 91. p. 248-255.
13. Rein, P. 2012. Ingeniería de la Caña de Azúcar. Berlin: Bartens. p. 313-367.
14. Rein, P; Love, D J. 1995. *Experiences with long tube climbing film evaporators*. Proc Int Soc Sug Cane Technol 22. p. 251-259.
15. Rosales, F. 2020. Comparativo de pérdidas de sacarosa por factores fisicoquímicos en evaporadores de la industria azucarera guatemalteca. En: Memoria Presentación de resultados de investigación. Zafra 2019-2020. Guatemala, CENGICAÑA. p. 435-456.
16. Schäffler, K J. 2001. *Front end losses of sucrose: Direct measurement or calculation using a mathematical model*. Proc Int Soc Sug Cane Technol 24. p. 356-357.
17. Wright, P G; Silva, T A y Pennisi, S N. 2003. *The SRI evaporator -A new Roberts design*. Proc. Aust. Soc. Sugar Cane Technol., Vol. 25. p. 1-11.