

Simulación computacional de la entrada de jugo de caña de azúcar a un evaporador Roberts

William F. Villarreal Albitres¹; Obidio Rubio Mercedes²

¹wfvillarrealalbitres@gmail.com;

²Departamento de Matemáticas, Universidad Nacional de Trujillo,
obidior@yahoo.co.uk

Recibido: 22-05-12

Aceptado: 24-09-12

RESUMEN

En la industria del azúcar los evaporadores juegan un rol importante en la cristalización y economía térmica por lo que se han experimentado muchos diseños de entrada de jugo al evaporador para mejorar su desempeño evaporativo y coeficiente de transferencia de calor, CTC. Se usó simulación computacional para entender el efecto del diseño de entrada de jugo sobre el coeficiente de transferencia de calor y para validar los resultados computacionales se llevaron a cabo mediciones experimentales de la temperatura de ebullición del jugo en la calandria. Fue utilizado un evaporador tipo Roberts de la segunda unidad de un sistema de cuatro evaporadores que trabajan en serie y cuatro diferentes sistemas de distribución de jugo para determinar el efecto sobre el CTC. Se empleó el software comercial ANSYS 13 el cual tiene un código que analiza un fluido por el método del volumen finito. Los resultados de simulaciones usando el código CFX-ANSYS demuestran que la posición y distribución del jugo al entrar por el fondo de un evaporador influyen en el coeficiente de transferencia de calor entre la superficie de calentamiento o calandria y el jugo; y que la velocidad del fluido y su posición de entrada por el fondo, afectan los campos de temperatura y consecuentemente el proceso de transferencia de calor. El diseño de la forma geométrica del sistema de distribución de jugo de un evaporador Roberts tipo Fletcher producen un coeficiente de transferencia de calor alto con respecto a otros diseños de entradas usados en la industria azucarera peruana.

Palabras clave: evaporador Roberts, calandria, DFC, simulación computacional, coeficiente de transferencia de calor, fondo evaporador, código CFX-ANSYS.

ABSTRACT

In the sugar industry the evaporators play an important role in the crystallization and thermal economy; therefore, many juice inlet designs to the evaporator have been tested to improve evaporation performance and increase its heat transfer coefficient. Computational simulation was used to understand the effect of the juice inlet design on the heat transfer coefficient. In order to validate computational results, several experimental tests of boiling juice temperature in the calandria of evaporator were carried out. A evaporator Roberts of the second place of a set of four evaporators were used and four different juice inlet designs in order to find the effect on the HTC. Results of computational simulations using the code CFX-ANSYS show that the position and distribution of the juice by entering the bottom of an evaporator influence on the coefficient of heat transfer between the heating surface and the juice. The velocity of the fluid and its inlet position at the bottom also affect the field of temperatures and consequently the process of heat transfer. Juice inlet design of an evaporator Roberts of model Fletcher produces a high heat transfer coefficient with respect to others juice inlet designs used in the Peruvian sugar industry.

Key words: calandria, Roberts evaporator, DFC, computational simulation, heat transfer coefficient, bottom of evaporator, code CFX-ANSYS.

I. INTRODUCCIÓN

En la industria de alimentos y bebidas, la evaporación constituye una aplicación familiar para separar mezclas de líquidos, concentrar una determinada solución, y sobresaturar una solución cristalina. La evaporación es un fenómeno físico que se caracteriza porque un líquido se transforma en vapor, hirviendo a alta tasa de transferencia de calor. Los aparatos usados para transformar una sustancia de líquido a vapor son conocidos como evaporadores o vaporizadores, cuya tarea fundamental es concentrar una determinada solución y remover líquidos. El diseño de los evaporadores está fundamentalmente gobernado, por las propiedades del líquido alimentado y la capacidad de evaporación deseada (Billet, 1989). Los fabricantes de evaporadores usan como parámetros esenciales de diseño: presión, temperatura, ratio de concentración, tiempo de residencia del material y las propiedades del fluido a concentrar (Rein 2007, Hugot, 1986; Billet, 1989). En la fabricación de azúcar, el uso de evaporadores constituye una operación unitaria necesaria para la cristalización de sacarosa como producto final, y está usualmente normalizada a cuatro o cinco unidades de evaporación de tipo Roberts (Figura 1). Éstos se caracterizan porque la alimentación de jugo es por el fondo, su área de calentamiento o calandria usa tubos cortos, y su operación es no tediosa.

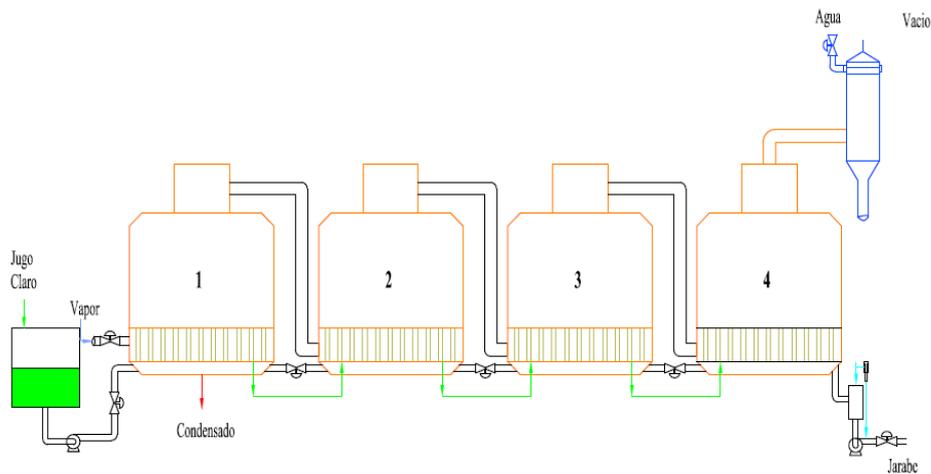


Figura 1. Sistema de evaporación en cuádruple efecto, usado para evaporar una solución azucarada.

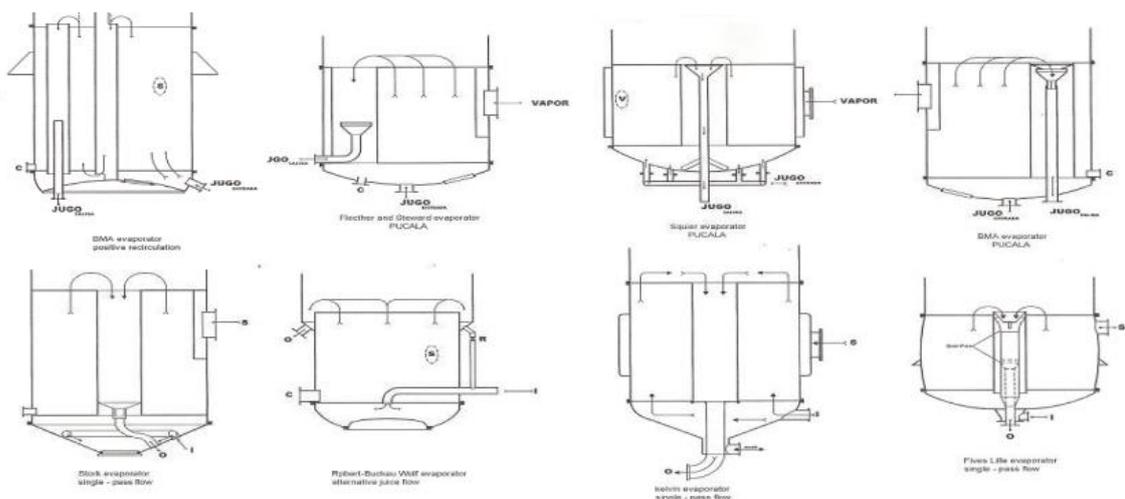


Figura 2. Variados diseños de entradas de jugo a evaporadores tipo Roberts.

En los últimos 60 años, el diseño del fondo del evaporador Roberts ha sido modificado tanto por fabricantes como usuarios de estos equipos a fin de mejorar su desempeño evaporativo (Figura 2).

Esta variación del fondo no solo ha abarcado su geometría, sino también el diseño de entrada de jugo o comúnmente denominado distribuidor. Aún cuando la diversidad de modificaciones geométricas experimentadas en el fondo de un evaporador no ha sido considerada lo suficientemente importante para una investigación científica, estas modificaciones sugieren que la geometría del fondo y modo de distribución del jugo en un evaporador es un factor que podría estar influyendo en su capacidad y desempeño, respectivamente. Por mucho tiempo ha sido interés de investigadores e ingenieros el desempeño y capacidad de un evaporador. La evaporación en un evaporador, solo o en múltiple efecto, depende de la transmisión de calor desde un vapor condensable a través de las paredes del tubo a un líquido frío que hierve. El coeficiente de transmisión de calor k , es la variable de mayor interés para los investigadores en sistemas de evaporación de múltiple efecto. La determinación de k es compleja y está afectada por varios factores, tales como velocidad del fluido líquido, temperatura del vapor, incrustación, nivel de carga hidrostática, viscosidad del material a ser evaporado, tensión superficial, elevación del punto de ebullición, diferencia de temperatura (entre el líquido alimentado y el vapor de calentamiento), entre otros (Kakaç, 1991, Tromp 1964; Ziegler, 1969).

Aún cuando en los últimos 50 años, abundante investigación científica ha sido publicado sobre evaporadores tales como: optimización energética de evaporadores, influencia de las propiedades del fluido en el proceso de transferencia de calor, incrustaciones de la superficie de calentamiento y otros (Tromp, 1964; Ziegler, 1973; Díaz, 1978; Pennisi, 2004), muy poco se ha estudiado el efecto del diseño de entrada de jugo a un evaporador sobre el coeficiente de transmisión de calor, CTC; a pesar que el fondo y diseño de entrada de jugo al evaporador ha variado en el tiempo (Figura 2). Puesto que el fenómeno de evaporación va acompañado de ebullición del jugo, su modelamiento matemático es complejo (Kreith, 2011), y su predicción de intercambio de energía tiene como única vía la experimentación.

En el presente estudio, se usó simulación computacional para analizar el efecto del fondo de un evaporador y el diseño de entrada de jugo al evaporador. El efecto del diseño de entrada de jugo y los campos de temperatura del jugo en el conjunto fondo-calandria fueron estudiados usando el código CFX de ANSYS, a cuatro diferentes diseños de alimentadores de jugo. Para determinar el CTC, la temperatura medida del jugo fue dato para calcular el CTC.

El propósito principal de este trabajo fue determinar el efecto de la geometría del sistema de distribución de jugo que entra al evaporador sobre el coeficiente de transferencia de calor para predecir patrones de flujo y diseñar evaporadores para jugo de caña.

II. MATERIAL Y METODOS

2.1 Objeto de Estudio

Nuestro objeto de estudio para el presente trabajo de investigación constituyó el evaporador de jugo de caña de azúcar tipo Roberts, ubicado en segundo lugar de un sistema de cuatro evaporadores que trabajan en serie evaporando el jugo de caña (Figura 1). Los evaporadores utilizados fueron tanto de las fabrica de la Empresa Azucarera Andahuasi SAA, en Lima, como la Empresa Industrial Pucalá, en Chiclayo.

Las variables independientes definidas tanto para la creación del dominio computacional como las condiciones de frontera: temperatura y velocidad del fluido de calentamiento y del fluido a ser evaporado, concentración de sólidos solubles azucarados, presión en el cuerpo del evaporador, y la geometría del distribuidor de jugo por el fondo del evaporador (Figura 3).

Variables Dependientes: coeficiente de transferencia de calor, temperatura de ebullición del jugo.

2.2 Equipos e Instrumentos

Se emplearon los siguientes equipos e instrumentos:

a. Equipos

- Un evaporador Roberts de 785 m² con tubos de calandria de 50 mm de diámetro x 2070 mm de longitud, perteneciente a la segunda unidad de un sistema de cuatro unidades de evaporación de la Empresa Industrial Pucalá, ubicado en el Valle de La Leche, Chiclayo, Lambayeque.
- Tres evaporadores Roberts de un conjunto de cuatro evaporadores de la fábrica de azúcar de la Empresa Azucarera Andahuasi SAC, ubicado en valle de Sayán, Huaura, Lima.
- Una computadora personal de 64-bit, 4 GB memoria RAM, 500 DD, 1GB tarjeta grafica, entorno Windows XP, versión 2007, Service Pack 3.
- Un software comercial ANSYS CFX 13.0 (inglés), que incorpora el código CFX el cual resuelve las ecuaciones diferenciales parciales que gobierna a un fluido de manera discretizada mediante el método de volumen finito (MVF).
- Un Software CAD-CAE Solidwork 2011 SP 0 (inglés) para modelar geometrías y ser exportados al DesingModeler de ANSYS 13

b. Instrumentación

- 01 Brixómetro digital de rango 0 a 80° Bx para medir sólidos totales disueltos azucarados, error $\pm 0.1\%$
- 01 Medidor de flujo volumétrico para jugo, de rango de 0 – 150 m³/s, con error de $\pm 1\text{ m}^3/\text{s}$.
- 02 Sensores de presión, rango 0 – 50 psig, error $\pm 0.5\text{ psi}$
- 10 Termómetros analógicos, rango 0 – 150 oC, error $\pm 1\text{ oC}$ para medir temperatura jugo
- 01 Cámara fotográfica Sony, de 12 Megapixels.

2.3 Métodos y Técnicas

a. Modelamiento y Diseño Computacional

El evaporador fue modelado a escala natural con material solido (tubos de acero inox 304, y su carcasa, fondo, y cuerpo de acero ASTM36), y el fluido líquido contenido en el evaporador como solución azucarada. El modelo fue limitado de modo que la simulación comprenda el dominio físico del fondo del evaporador, su calandria y una porción de la altura del cuerpo a 300 mm sobre la calandria. La restricción de la altura, fue determinada de modo que la parte superior del dominio represente la interfaz o frontera entre la fase líquida y el vapor en un evaporador. La interfaz fue modelada como superficie libre a través de la cual la fase líquida y gaseosa cruzan una a otra. Esta superficie libre fue considerada como abertura en la definición de las condiciones de frontera. El modelo computacional consistió en crear el dominio computacional mediante ANSYS, para generar un número finito de mallas, en las cuales se lleva a cabo la discretización de las ecuaciones parciales que gobiernan un fluido transformándolas en ecuaciones algebraicas, usando el método de volumen finito (MVF); para hallar la solución del fenómeno físico estudiado. El dominio computacional (4,20 m altura x 2,90 m diam.) de los cuatro tipos de evaporadores analizados comprendió: el fondo, tubos de calandria y porción de cuerpo del evaporador. El control y calidad de enmallado del dominio computacional, jugó un rol importante en la precisión de los resultados de simulación. Se usó enmallado tetraédrico y refinado en regiones con superficies complejas, para la captura de gradientes de velocidad y temperatura. El tamaño de malla por defecto fue de 0,25 mm. Para la simulación computacional de un fenómeno físico, el grado de resolución del enmallado es un importante requisito (Fernández, 2012), ya que la precisión de la solución a obtenerse dependerá de la memoria y procesador del computador. A mayor memoria RAM, mayor número de nodos. Para esta investigación se usó un computador de plataforma 64-bit, y 4 GB de memoria RAM. Esta capacidad del computador permite generar de 5 a 15 millones de nodos. Sin embargo; en situaciones en que la generación de malla causaba desborde de memoria del computador, el tamaño de la malla se incrementó hasta 50 mm para superar el problema. Sobre cada celda de la malla son derivadas las ecuaciones diferenciales parciales de masa, cantidad de movimiento, y energía, respectivamente. El código CFX predice el flujo de fluidos resolviendo numéricamente las ecuaciones diferenciales, el cual describe la conservación de masa y cantidad de movimiento. En condiciones reales la velocidad y presión de un flujo oscilan instantáneamente en el tiempo dando origen a flujos turbulentos. En este trabajo de investigación, los flujos turbulentos, fueron simulados mediante el modelo Promediado de Reynolds de las ecuaciones constitutivas Navier-Stokes (RANS). El flujo convectivo fue resuelto en esquema de Alta Resolución.

b. Descripción del Problema Físico y Metodología de Resolución en ANSYS

Cuatro geometrías de distribución de jugos de entrada al evaporador fueron seleccionados. Estas geometrías han sido modelo usados por muchos años (Ahmad, 1951, Tromp 1964, Diaz, 1968). Tres de ellos están ubicados en la fábrica de azúcar de la Empresa Azucarera Andahuasi, en Lima, y el cuarto diseño de evaporador se ubica en la fábrica de azúcar de Industrial Pucalá, en Chiclayo. El segundo evaporador de un sistema de cuatro evaporadores fue elegido como diseño para analizar el efecto de la alimentación de jugo en el coeficiente de transmisión de calor (Figura 1). La temperatura de vapor de calentamiento alimentado a la calandria, flujo másico, y propiedades del jugo se iniciaron en régimen estable. Valores promedios de los principales parámetros de diseño de los cuatro evaporadores estudiados fueron: área de calentamiento 866 m², diámetro de los tubos 0,76 m, longitud de los tubos 2,30 m, y diámetro de entrada de jugo al evaporador 0,152 m. Los parámetros de operación de los evaporadores fueron en el lado calandria: vapor a 165 KPa, 387° K y flujo másico de 30,10 ton/h. En el lado cuerpo del evaporador: presión de vapor a 131 kPa, 380° K, y 22,40 ton/h. La cantidad de sólidos solubles en el jugo proveniente del primer evaporador fue 33° Bx. En esta investigación solo se analizó el efecto de la superficie de calentamiento, más no el efecto de la altura y diámetro de la tubería de la calandria. El jugo se considera como un fluido que ha experimentado una evaporación previa, antes de ingresar al segundo evaporador del múltiple efecto. Las siguientes condiciones de frontera fueron establecidas para determinar los campos de temperatura y velocidades, con el propósito de resolver el coeficiente de transferencia de calor desde la superficie de calentamiento o calandria al jugo para los cuatro diseños de evaporadores (Figura 3):

1. La entrada fue ajustada para un flujo másico fijo y normal a la condición de frontera con turbulencia media (intensidad al 5%). La transferencia de calor a temperatura fija.
2. La salida fue ajustada a presión estática relativa fijada $a_p_{est} = 0$ Pa.
3. El fondo y calandria del evaporador se ajustó a condición de simetría, con el propósito de evitar desborde de la capacidad de memoria del CPU.

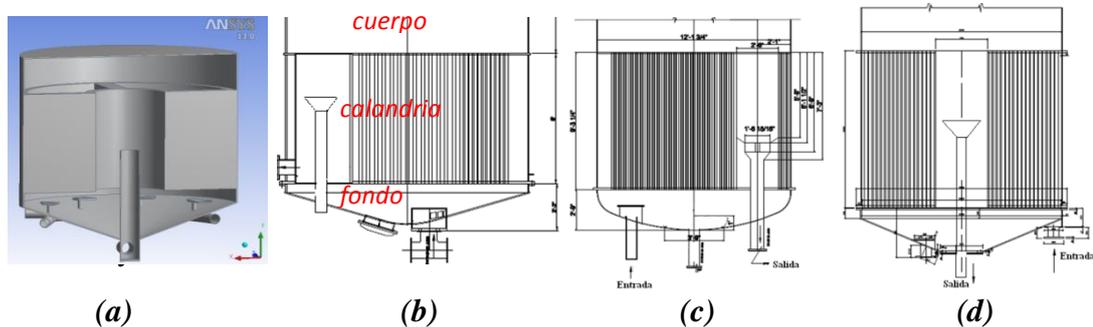


Figura 3. Cuatro diseños de entrada de jugo a evaporadores (a) Modelo Cubano-Andahuasi; (b) Modelo Fletcher, (c) Modelo Andahuasi, y (d) Modelo BMA de Pucalá.

El fluido tanto sobre las paredes internas del evaporador como sobre los tubos de calentamiento se considera que no están en movimiento; es decir cero-deslizamiento ($v = 0$ m/s). La pared se asume como pulida. La transferencia de calor entre el tubo de la calandria y el fluido en contacto fue ajustada a 1892 Wm⁻²K⁻¹, la superficie del tubo a 387° K. El análisis de transferencia de calor se hizo asumiendo el flujo en estado estable tridimensional y en una sola fase (líquida). No fue considerado ningún modelo de empuje.

Para obtener el coeficiente de transmisión de calor se usó la ecuación siguiente:

$$k = \frac{\dot{m}_{cond} h_{fg}}{A_{caland} (T_{vapcalen} - T_{ebull})} \quad (1)$$

donde \dot{m} es flujo másico del condensado formado en la calandria, A_{caland} es el área total de todos los tubos que componen la calandria, T_{ebull} es la temperatura promedio del jugo que hierve, y $T_{vap\ calent}$ la temperatura de vapor usado para hervir el jugo, h_g es la entalpia de vaporización. Para medir la temperatura del jugo, se usaron termómetros analógicos. Los termómetros fueron colocados tanto por encima como debajo de la calandria. En el tubo central no se midió la temperatura debido a su complejidad para obtener dichos datos. La temperatura del jugo hervido para el cálculo del coeficiente de transferencia de calor en el evaporador, fue el promedio de las temperaturas medidas tanto por encima como debajo de la superficie de la calandria.

III. RESULTADOS

3.1 Modelo Matemático

El proceso de evaporación de un líquido es un fenómeno que involucra flujo de fluidos, transferencia de calor, asociado con sistemas de dos-fases y turbulencia; por lo que las siguientes ecuaciones describen el movimiento de las partículas de un fluido que está siendo calentado, la ecuación de conservación de masa o continuidades dada como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (2)$$

Para simular la velocidad y presión del fluido, se usó la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento junto con la ecuación (1).

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} \vec{v}) = \nabla (\mu \nabla \vec{v}) - \nabla p + \rho \vec{g} + S_M \quad (3)$$

Para modelar la transferencia de calor, se usó la ecuación de conservación de energía:

$$\frac{\partial (\rho h_{tot})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} h_{tot}) = \nabla (k \nabla T) - \nabla \cdot (\vec{v} \tau) + p \vec{g} + S_E \quad (4)$$

donde

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} v^2 \quad \tau = \mu (\nabla \vec{v}) + (\nabla \vec{v})^T - \frac{2}{3} \delta \nabla \cdot \vec{v}$$

Siendo \vec{v} el vector velocidad del fluido, μ viscosidad del fluido, p la presión, \vec{g} aceleración de gravedad, ρ densidad, S_M y S_E fuente de fuerzas y de energía, respectivamente, añadida a la ecuación de conservación de la variable transportada, h_{tot} energía cinética total, τ esfuerzos de corte a que está sometido el fluido, T temperatura, k el coeficiente de conductividad térmica. El modelo de la turbulencia usado en este estudio está dado por el modelo empírico ESTANDAR $\kappa - \varepsilon$, y expresada como:

$$k = \frac{3}{2} (Tu \vec{v})^2 \quad \varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{L} \quad \mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (4)$$

Donde Tu es la intensidad de turbulencia, L longitud de estela, y constante experimental. La ecuaciones que gobiernan a un fluido son teóricas y no dependen de $k - \varepsilon$. La energía turbulenta k y la tasa de disipación viscosa ε , se acoplan agregando a ambos términos de la ecuación (2).

De la simulación computacional sobre un enmallado de 349950 nodos y 1904213 se obtuvieron los resultados presentados abajo. Debido a que las ecuaciones de gobierno de un fluido son no-lineales y acopladas, varias iteraciones previas se llevaron a cabo antes de la solución. La solución se obtuvo cuando el error de convergencia alcanzó un valor residual máximo de 0,0001.

3.2 Campos de temperatura a través del Fondo y Calandria de Evaporador Roberts

La Figura 4a muestra que el campo de temperaturas va decreciendo desde la región de entrada hasta la salida del fluido a través del tubo central. La región de la calandria opuesta al tubo central presenta magnitudes de temperatura más altas; mientras que la magnitud de temperatura más baja está en la región de evacuación del líquido. La Figura 4b exhibe el perfil de temperatura en tres posiciones: sobre, en medio y debajo de la calandria, respectivamente. La magnitud de temperatura más alta, respecto a la altura de la calandria, se halla debajo de ésta; mientras que la temperatura más baja está en la parte alta.

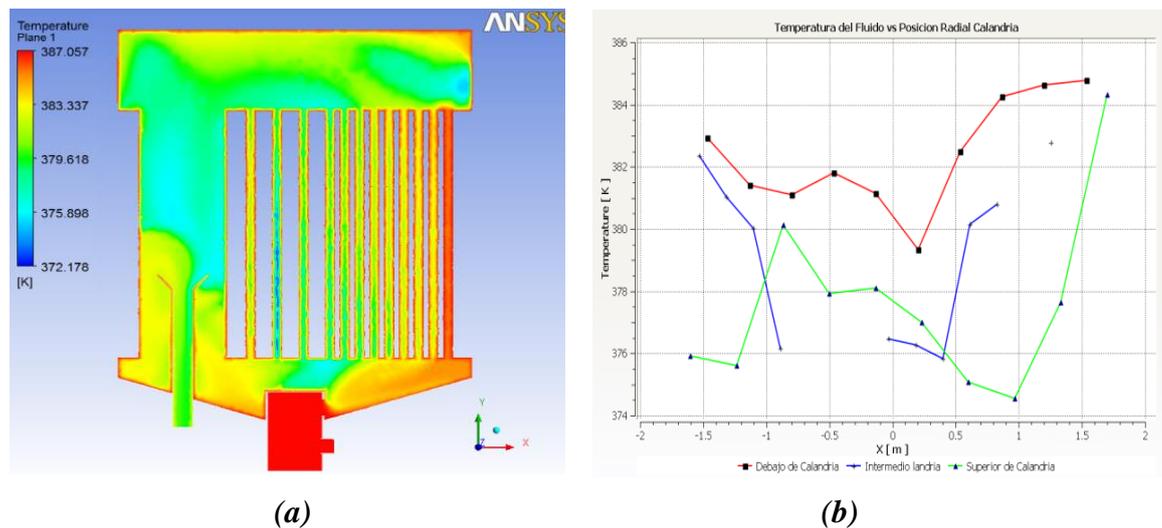


Figura 4. (a) Contornos de temperatura en fondo y calandria, (b) Perfil de temperatura vs Sección transversal de calandria en Evaporador modelo Fletcher (EAA Andahuasi SAA).

La Figura 5a muestra el campo de temperaturas de un evaporador modelo Cubano. Para este tipo de diseño de entrada de evaporador, la distribución de temperatura es uniforme y equivalente a 369° K, a excepción del distribuidor de líquido en la cual la magnitud de temperatura es mayor e igual a 387° K. La Figura 5b presenta el perfil de temperaturas sobre, intermedio y debajo de la calandria. De acuerdo al gráfico mostrado, la temperatura promedio más alta se halla sobre la calandria; mientras que la temperatura promedio más baja, está debajo de ésta. La Figura 5c muestra el tipo de distribuidor usado para dispersar el jugo alimentado a la calandria. El distribuidor consiste de ocho piezas.

La Figura 6a muestra el contorno del campo de temperaturas de un evaporador modelo Andahuasi. Las magnitudes de temperatura más alta se halla en la región de alimentación al evaporador; mientras que la magnitud de temperaturas más baja en la región de evacuación del líquido.

La Figura 6b presenta el perfil de temperaturas sobre, intermedio y debajo de la calandria, respectivamente. La magnitud de temperatura promedio más alta se halla sobre la calandria, mientras que la magnitud de temperatura promedio más baja se halla en la parte intermedia de ésta.

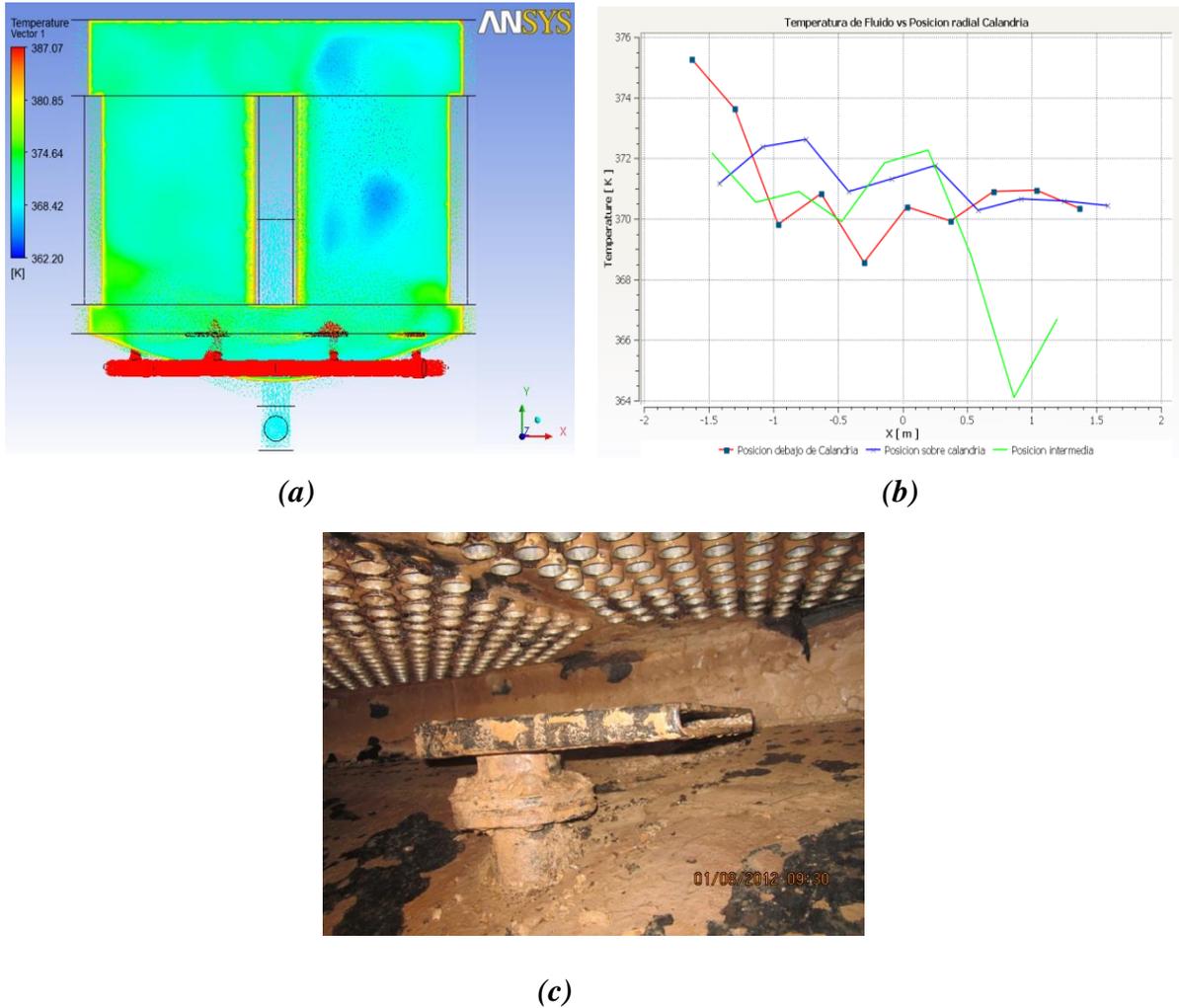


Figura 5. (a) Contornos de temperatura en fondo y calandria, (b) Perfil de temperatura vs. Sección transversal de calandria en Evaporador modelo cubano (EAA Andahuasi SAA), (c) Distribuidor de liquido tipo "pico de pato".

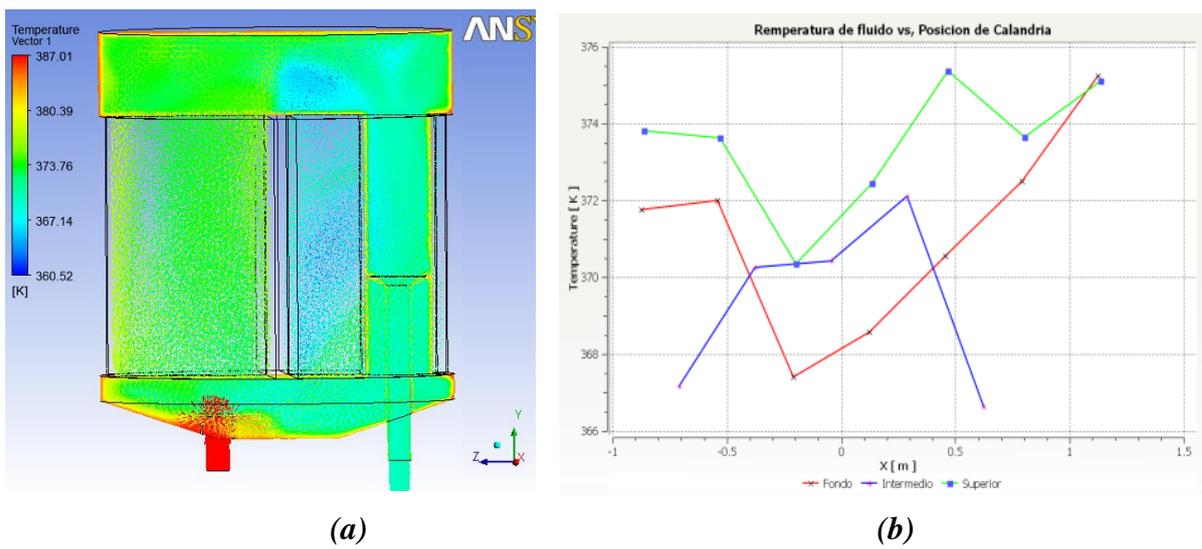


Figura 6. (a) Contornos de temperatura en fondo y calandria, (b) Perfil de temperatura vs. Sección transversal de calandria en evaporador modelo Andahuasi (EAA Andahuasi SAA).

La Figura 7a exhibe el campo de temperaturas para un evaporador modelo BMA de Pucalá. Las magnitudes de temperaturas más altas están en la región de entrada de líquido al evaporador; mientras que la magnitud de temperatura baja en la región opuesta a la entrada de líquido. La Figura 7b muestra el perfil de temperaturas sobre, intermedio, y debajo de la calandria; respectivamente. Para este modelo de evaporador la magnitud de temperatura promedio se halla sobre la calandria; mientras que la magnitud de temperatura baja se encuentra debajo de la calandria.

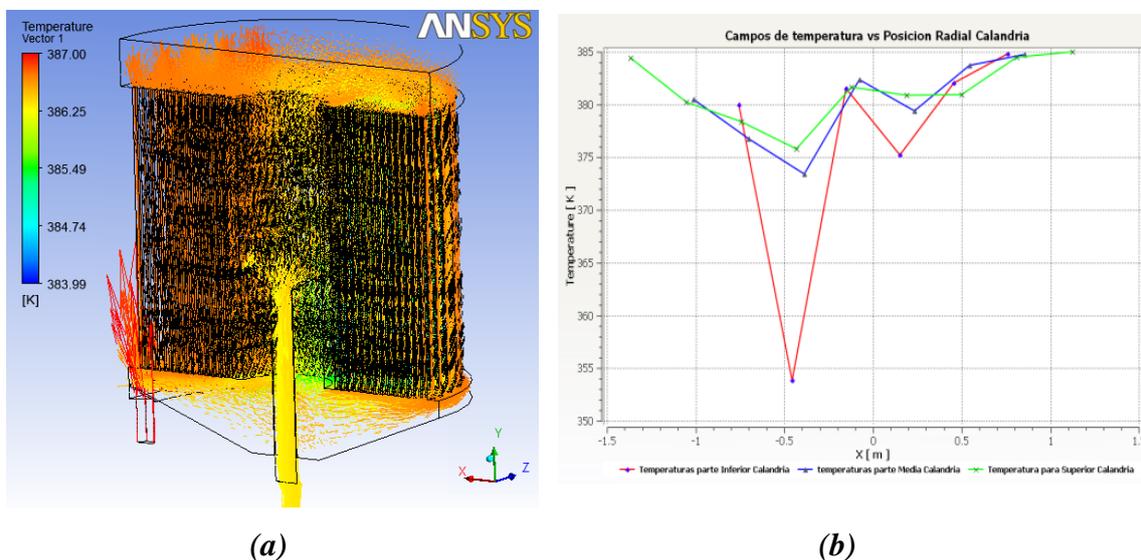


Figura 7. (a) Contornos de temperatura en fondo y calandria, (b) Correlación de temperatura y posición de calandria en Evaporador modelo BMA de Pucalá.

3.3 Coeficiente de transferencia de Calor

Los valores promedio de las temperaturas registrados por los termómetros analógicos se muestran en la Tabla 1. Estos valores representaron a T_{ebull} en la Ecuación (5) y fue tomada para determinar el CTC. Las temperaturas expresan valores tanto por encima, como debajo de la calandria para cada uno de los cuatro modelos de evaporadores estudiados. El evaporador modelo BMA de Pucalá presenta temperaturas promedios del líquido calentado más alta y equivalente a $381,17^{\circ} K$; mientras que el modelo Cubano expresa una temperatura promedio de líquido más baja e igual a $371,25^{\circ} K$.

Tabla 1. Valores de Coeficiente de Traserferencia de Calor, $W/(m^2.K)$ calculados, predichos por DFC y comparados con Rein (2007) y Hugot (1986)

TEMPERATURA DE JUGO SEGÚN POSICION CALANDRIA, ° K					
PRUEBA	POSICION	Diseño de entrada de jugo a Evaporador			
		Fletcher	Cubano	Andahuasi	Pucalá
1	Sobre la Calandria	379,0	371,5	375,0	382,0
2		377,0	372,0	371,0	378,0
3		384,0	368,0	373,5	385,0
4		383,0	375,0	372,0	379,0
5	Debajo de la Calandria	380,0	370,0	367,0	375,0
6		386,0	371,0	375,0	384,0
PROMEDIO TEMPERATURA, °K		381,17	371,25	372,25	380,50

La Figura 8a exhibe las temperaturas promedio de cada uno de los modelos de evaporadores estudiados tanto medidos como predichos por la DFC. La Figura 8b presenta el CTC para cuatro modelos de evaporadores tanto calculados como predichos por simulación computacional. Tanto en temperatura como en CTC, el modelo Fletcher tiene los valores más altos; mientras que el modelo cubano tiene los valores más bajos.

La Tabla 2 exhibe valores promedio de temperatura, valores tanto calculados como predichos por la DFC del CTC. De igual manera la Tabla 2 exhibe el CTC validado con los hallados empíricamente por Hugot (1986) y Rein (2007), respectivamente.

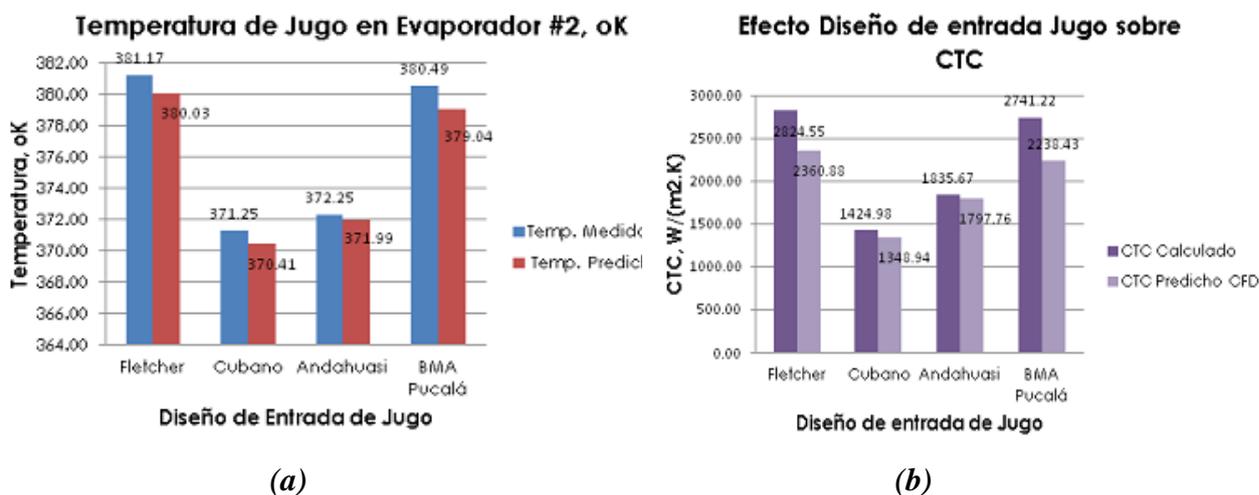


Fig. 8. Valores de temperatura de jugo y coeficientes de transferencia de calor calculado y predicho por la DFC para cada modelo de evaporador.

Tabla 2. Valores de Coeficiente de Trasterencia de Calor, W/(m².K) calculados, predichos por la DFC, y presentados empíricamente tanto por Rein (2007) como por Hugot (1986).

DISEÑO DE ENTRADA	Fletcher	Cubano	Andahuasi	Pucalá
Temperatura jugo, °K.	381,17	371,25	372,25	380,50
CTC, simulación DFC	2360,88	1348,94	1797,76	2238,43
CTC, Calculado	2824,55	1424,98	1835,67	2741,22
CTC, (Rein, 2007)	2000,00	2000,00	2000,00	2000,00
CTC (Hugot, 1986)	1845,30	1845,30	1845,30	1845,30

IV. DISCUSION

Los resultados obtenidos a través del modelamiento computacional, muestran que los campos de temperatura presentan un comportamiento variable en el dominio computacional del evaporador, y que el desempeño evaporativo de un líquido de solución azucarada, depende no solo de los campos de velocidad del fluido para lograr altas tasas de transferencia de calor, sino también de la manera como el fluido alimentado se mueve desde el fondo de la calandria hasta la superficie superior, sobre la cual se halla una región de salida, la cual es vía de descarga y de recirculación del fluido, acompañado de mezcla turbulenta entre el jugo en ebullición y jugo alimentado fresco.

Puesto que esta investigación tuvo como objetivo determinar el efecto del diseño de entrada de un fluido al evaporador sobre el coeficiente de transferencia de calor; según la Ecuación (5), la temperatura a la que ebulle el fluido constituye un parámetro importante en el cálculo de dicho

coeficiente; por lo que las simulaciones presentan las visualizaciones de los campos de temperatura de los cuatro diseños estudiados, y la validaciones de las temperaturas medidas según el diseño de alimentador.

En los cuatro modelos de evaporadores estudiados se muestra que la región de mayor temperatura se localiza en el interior de los tubos (cercanos a la temperatura del fluido de calentamiento, 387° K), y en los receptáculos de entrada de jugo. Este último presenta valores altos de temperatura respecto al promedio de temperatura debido a que el Evaporador 1 (Figura 1) tiene un gradiente mayor de temperatura respecto al Evaporador 2, el cual se encuentra a la mitad de presión por diseño operativo (Hugot, 1986, Echeverri, 2004). Tanto el evaporador tipo Fletcher de Andahuasi como el evaporador tipo BMA de Pucalá muestran las temperaturas más altas, lo que indica el probable efecto del recorrido de una partícula de fluido desde que sale del distribuidor de jugo, aún cuando cada modelo de evaporador presenta diseños de fondo y calandria similares. Es probable, que los altos valores de temperatura se deban a una baja recirculación del fluido a través del tubo central. La recirculación en un evaporador se produce en la región descendente (vía tubo central) del fluido desde la placa superior de la calandria del evaporador y el tubo de evacuación del fluido concentrado. A mayor espacio anular mayor circulación. De los cuatro evaporadores estudiados, el evaporador modelo Cubano (Figura 5a) muestra sus campos de temperatura más bajos. La baja temperatura alcanzada posiblemente sea causada por los campos de velocidad formados de las toberas de inyección de jugo, el cual indica que hay pérdida de energía cinética. Por ejemplo el modelo Cubano presenta vectores de velocidad que rotan alrededor de la periferia de la placa inferior de la calandria, creando posibles regiones de estancamiento que da lugar a que las partículas de fluido tengan un desplazamiento hacia la placa superior de la calandria. Este direccionamiento es creado por las toberas tipo "pico de pato", las mismas que están dirigidas a un ángulo con dirección a la periferia. Es probable que este ángulo cause una pobre cobertura debajo de la placa inferior de la calandria. Los campos de velocidad formados en el evaporador Fletcher (Figura 4a), muestran una distribución y cobertura uniforme desde la región de entrada de jugo. Este comportamiento sugiere que velocidad y temperatura son parámetros de importancia en el mecanismo de transferencia de calor. Este fenómeno ha sido analizado por Kakaç (1991), Díaz (1978), y Agarwal (2011) quienes sostienen que la velocidad y temperatura son parámetros que están interrelacionados y que juegan un rol importante en el proceso de transferencia de calor. La siguiente correlación presenta Agarwal (2011):

$$k = C_a Nu \quad Nu = C_b Re^m Pr^n \quad (6)$$

Los contornos de temperaturas en los evaporadores muestran una variación de los campos de temperatura en los evaporadores tanto para el modelo Andahuasi como BMA de Pucalá (Figuras 6a y 7a), corroborando que el diseño de entrada de líquido al evaporador, tiene un efecto significativo en sus respectivos campos de temperatura. El evaporador modelo BMA de Pucalá, presenta valores de temperatura mayores que el evaporador modelo Andahuasi. Este comportamiento, sugiere que el diseño de entrada de jugo del modelo BMA origina campos de temperatura con mejor efecto que el evaporador modelo Andahuasi. Según la Figura 4a y 4b, respectivamente, indica que a medida que el distribuidor de jugo se aleja del centro del evaporador mejora la transferencia de calor. Es probable, que la velocidad de las partículas de fluido con la que sale del distribuidor de jugo permite una cobertura mayor del flujo debajo de la calandria; mejorando el desempeño evaporativo.

La transferencia de calor por convección desde la superficie de los tubos de la calandria al fluido está dada por:

$$Q = k \square A (T_{\text{supcalent}} - T_{\text{jugoebull}}) \quad (7)$$

Esta relación matemática, en términos de la temperatura de ebullición del jugo, fue usada para determinar el coeficiente de transferencia de calor de cada modelo de evaporador. Lo valores de temperatura del jugo, registrado según Figura 8 se muestran en la Tabla 1. Analizando las Figuras 4b

a 7b, los valores más altos de la temperatura del jugo se presentan en la periferia del evaporador y en la mitad de los tubos de la calandria; mientras que los valores más bajos están en el centro de la calandria. Este comportamiento podría deberse a que en el centro de la calandria se encuentra el tubo central y que en dicha región existe recirculación de jugo sin ser hervido; es decir, mezclado con jugo concentrado que ha recorrido el interior de los tubos. La Figura 4b exhibe simulaciones de un evaporador Fletcher, el cual muestra los valores más altos de temperatura del jugo, seguido por el evaporador tipo BMA de Pucalá (Figura 7a), mientras que el tipo Cubano (Figura 5b), registra los valores más bajos. La Figura 8a muestra la validación entre la temperatura registrada y la temperatura simulada computacionalmente. Los valores de la temperatura muestran la buena concordancia con lo simulado. Las desviaciones son pequeñas siendo la máxima en el orden de 0,38%. La Figura 8b muestra la validación de coeficiente de transferencia de calor. De acuerdo con la Tabla 2, los valores promedios del CTC presentados por Rein (2007) están en el orden de 2000 W/(m².oK), sin embargo los valores calculados y simulados muestran una diferencia aceptable con respecto a los tipos de evaporadores Fletcher y Pucalá. Para los modelos Andahuasi y Cubano, el coeficiente de transferencia de calor difiere significativamente, siendo la desviación 28,71%, respecto a Rein (2007); sin embargo, estos valores son razonables para los presentados por Hugot (1986). Esta variación indica que existen probables otros factores que no han sido identificados y que están influyendo en el CTC (Rackmann, 2007; Kim, 2007; King, 1961). A pesar del corto margen de temperatura entre el jugo medido y simulado, la temperatura del jugo y el área de superficie de calentamiento son parámetros que estarían jugando un rol importante en la maximización del coeficiente de transferencia de calor en un evaporador tipo Roberts; por lo que requiere llevar a cabo más investigación para entender esta desviación.

V. CONCLUSIONES

1. El campo de temperatura del jugo de caña en un evaporador Roberts hallados computacionalmente predicen que los más altos valores están sobre la placa superior de la calandria, independientemente del tipo de diseño de entrada de alimentación de jugo construido.
2. Cálculos de la simulación computacional predicen que a medida que las partículas de un fluido se alejan del centro de la calandria, la temperatura de ebullición dentro de los tubos se incrementa, siendo la periferia de la calandria la región de más alta temperatura.
3. Las temperaturas medidas experimentalmente en la parte inferior de la calandria, son las más bajas como consecuencia de la recirculación de jugo en dicha región.
4. Entrada de líquido excéntrica al fondo del evaporador y de distribución radial, aumenta el coeficiente de transferencia de calor.
5. La velocidad y temperatura son parámetros que juegan un rol importante en la maximización del coeficiente de transferencia de calor.
6. Mediciones experimentales muestran que evaporadores con caja de distribución de jugo excéntrica al eje central del evaporador y tubo de evacuación de jugo opuesta a la entrada radial de jugo, presenta los más altos valores de coeficiente de transferencia de calor.
7. El distribuidor de jugo de diseño Fletcher produce altos coeficientes de transferencia de calor

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMAD, Q. 1951. **The Effect of Juice Inlet Design on Evaporator Efficiency**. The Sugar Journal. July. (pp. 17-19).
- AGARWAL, P; SHRIKHANDE, M; SINIVASAN, P. 2011. **Heat Transfer Simulation by CFD from Fins of an Air Cooled Motorcycle Engine under Varying Climatic Conditions**. Proceedings of the World Congress on Engineering 2011, Vol. III, WCE 2011, July 6-8, London. UK.
- BILLET, R. 1989. **Evaporation Technology: Principles, Applications, Economics**. Germany. VCH.

- DIAZ, E. 1978. **El Diseño del Evaporador. Causa principal de las Incrustaciones Fuertes del Cuádruple Efecto.** Cuba-Azúcar. Julio-Setiembre. (pp 3-10).
- HUGOT, E. 1986. **Handbook of Cane Sugar Engineering. Holland.** 3rd Edition. Amsterdam. Elsevier.
- ECHEVERRI, L. E. 2007. Measurements and Computations of the Flow in Full-Scale Sugar Evaporative-Crystallizers and Lab-Scale Models. Louisiana State University. USA. PhD Thesis
- FERNANDEZ ORO, J.M. 2012. **Técnicas Numéricas en Ingeniería de Fluidos.** España. Edit. Reverte.
- KAKAC, S. 1991. **Boilers, Evaporators and Condensers.** USA. New York. Wiley & Sons, Inc.
- KIM J., YOUNG H. G. 2007. **Simulation of bubbling Fluidized bed of fine particles using CFD.** Korean J. Chem. Eng., 24(3), (pp. 445-450).
- KING P.P. 1961. **Some Factors affecting Heat Transfer in Sugar Factory Evaporators.** The international Sugar Journal. (pp. 140-142).
- KREITH, F. 2011. **Principles of Heat Transfer.** 6th Edition. USA. Cengage Learning Inc.
- LEAL, D.; FRIEDMAN, P.; VALDEZ, A. 1984. **Influencia del Uso de Extracciones Sobre el Coeficiente de Transferencia de Calor en Evaporadores de Múltiple Efecto.** Cuba-Azúcar, Enero-Marzo. (pp. 3-9).
- MORENO, J. 2005. Experimental and Analytical Study of two-phase Pressure Drop during Evaporation in Horizontal Tubes. Ecole Polytechnique Federale de Laussane. France. Docteur These.
- PENNISI, S. 2004. Development of a more energy Efficient Robert Evaporator Based on CFD Modelling. James Cook University. Australia. PhD Thesis.
- RACKMANN, D.; BROADFOOD, R. 2007. **Improve Pan Stirrer Performance Through CFD Modelling.** Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol. Vol. 26. (pp. 1573-1584).
- REIN, P. 2007. **Cane Sugar Engineering.** Berlin. Verlag Dr. A. Bartens KG.
- TROMP, L.A. 1964. **Single Pass vs. Recirculation in Evaporator.** International Sugar Journal. July. (pp 222-224 y pp 253-254).
- WANTA, W. 2006. Computational Fluid Dynamics of a DBT Crystallizer. Suranaree University of Technology. MEChE. Thesis.
- ZIEGLER, J. 1969. **Single Pass Evaporator-True or False.** The Sugar Journal. June. (pp. 9-10).
- ZIEGLER, J. 1973. **Sugar Evaporator.** The Sugar Journal. March. (pp 47-53).