

Simulación computacional de flujo en dos-fases en un evaporador Roberts

Computer simulation of two-phase flow in a Roberts evaporador

William Villarreal Albitres¹ y Obidio Rubio Mercedes¹

Resumen

El objetivo de la investigación fue determinar el comportamiento de los campos de velocidades, temperaturas y presiones del jugo de caña, como fluido de estudio, de un sistema de dos-fase de un evaporador Roberts. Para simular computacionalmente el movimiento de la partícula del fluido en un medio ambiente de dos-fases se usó el código CFX-ANSYS, el cual calcula el campo del flujo por el Método del Volumen Finito. Asimismo, se registraron las condiciones del flujo tanto de jugo como de vapor a la entrada y salida de un evaporador Roberts de 785 m² de Industrial Pucalá en Chiclayo. Para validar el perfil del campo de temperatura simulados computacionalmente se tomaron datos experimentales del jugo hirviendo, colocando bulbos de temperatura sobre la calandria del evaporador. Resultados obtenidos de la simulación computacional de los campos de velocidad, temperatura y presión del jugo de caña de un evaporador Roberts mostraron que la velocidad del jugo cae dramáticamente en el fondo y calandria del evaporador. Recirculación de jugo abundante ocurre entre la línea de salida de jugo evaporado y el tubo central de recirculado. Así mismo, las temperaturas del fluido que hierve son más altas en la parte media de la altura de la calandria, y su presión decrece uniformemente desde el fondo al cuerpo del evaporador. Los valores de la temperatura del jugo simulados computacionalmente y medidos experimentalmente mostraron estar en buena concordancia, validando al modelo desarrollado.

Palabras clave: Simulación computacional, calandria, dos-fases, evaporador, CFX-ANSYS.

Abstract

This research work was carried out with the aim of determining the behavior of the fields of velocities, temperatures and pressures of a system of two-phase of a Roberts evaporator. The computational simulation of A particle motion of A fluid in an environment of two-phases was used the CFX- ANSYS code which calculates the flow field by the Finite Volume Method. Also, the flow conditions both juice as steam inlet and outlet of an evaporator of 785 m² Roberts of Industrial Pucalá in Chiclayo were registered. To validate the temperature field profile computationally simulated, experimental data were taken placing bulbs juice boiling temperature on the calandria of evaporator. Results obtained from computer simulation of the fields of velocity, temperature and pressure of cane juice of a Roberts evaporator showed that the velocity of the juice drops dramatically at the bottom and the evaporator calandria. Abundant juice recirculation occurs between the discharge line of juice and the recirculation center tube. Likewise, boiling fluid temperatures are higher in the middle of the height of the calendar, and its pressure decreases uniformly from the bottom to the body of the evaporator. Juice temperature values computationally simulated and measured experimentally shown to be in good agreement, validating the model developed.

Keywords: computer simulation, calandria, two-phases, evaporator, CFX-ANSYS.

Introducción

Flujo de dos-fase es el flujo de una mezcla de fases tales como gases (burbujas) en un líquido, o líquido (gotas) en gases o partículas en líquidos y/o gases. Un gran número de sistemas de dos-fases existen en la industria de procesos químicos. Ejemplo de sistema de fase líquido-vapor es el usado es la industria azucarera, la cual usa evaporadores para remover el líquido del jugo de caña aplicando energía térmica en forma de vapor en casi el 70% de la demanda total (Hugot, 1986).

¹ Universidad Nacional de Trujillo, wfvillarrealalbitres@gmail.com

El problema de los evaporadores es que éstos no están diseñados en base a las propiedades del fluido como: velocidad, temperatura, presión, densidad, entre otros; ni en estado de dos-fases; sino por correlaciones empíricas, debido a que las ecuaciones que gobiernan no están bien determinadas.

En los últimos años muchos trabajos de investigación tanto exploratoria como aplicada han sido realizados y publicados sobre procesos de ebullición, evaporación y condensación con aplicación en sistemas de fuerza, refrigeración, procesos de transferencia de calor y mecánica de fluidos (Hugot, 1986; Kim, 2007). Recientemente, la Fluidodinámica Computacional (Computational Fluid Dynamics, CFD, en inglés), se ha convertido en una herramienta tanto para modelar como simular sistemas de flujos en dos-fases; a fin de estudiar las propiedades de flujos, burbujas, y cristalización de soluciones químicas. Simulación computacional ha sido también introducida en la industria del azúcar con bastante éxito en recientes años en evaporación de jugos, evapo-cristalización, y combustión (Pennisi, 2003; Echeverri, 2007; Rackmann, 2007); pero todos ellos simulados en una fase. Hasta donde el autor conoce, muy poca literatura técnica ha sido publicada sobre simulación computacional en sistemas de evaporación en dos-fases, lo que sugiere que esta disciplina es aún poco difundida. La importancia de simular computacionalmente el comportamiento del campo de las propiedades fundamentales del jugo, en un medio ambiente de dos-fases, es predecir la trayectoria del fluido para determinar la geometría apropiada del evaporador que permita una óptima transferencia de calor entre el jugo alimentado y un medio de calentamiento. El presente trabajo de investigación tuvo como objetivo simular computacionalmente el campo de velocidades, temperatura y presión del jugo de caña en dos-fases en un evaporador tipo Roberts.

En cuanto al fundamento teórico, un fluido en dos fases es considerado como un fluido disperso o separado en fases y tratadas como fases continuas. Cada fase es gobernada por las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y energía. Para la determinación del volumen de espacio ocupado por una partícula de fluido en cada fase el concepto de fracción de volumen de fase-dispersada es introducido,

$$\sum_{k=1}^n \alpha_k = 1.0 \quad (1)$$

Las ecuaciones de gobierno para cada fase dispersa están definidas por:

La ecuación de continuidad o conservación de masa para la fase k puede ser escrita así:

$$\frac{\partial(\alpha_k \rho_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k U_k) = \sum_{p=1, p \neq k}^n S_{pk} \quad (2)$$

El balance de la cantidad de movimiento para la fase k puede escribirse:

$$\frac{\partial(\alpha_k \rho_k U_k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k U_k U_k) = -\alpha_k \nabla p - \nabla \cdot (\alpha_k \tau_k) + \alpha_k \rho_k g + F_k \quad (3)$$

Los términos de acoplamiento de la interfaz están definidos por la siguiente relación:

$$F_k = \sum_{q=1}^n K_{kq} (U_q - U_k) + \sum_{q=1, q \neq k}^n S_{qk} U_{qk} \quad (4)$$

La ecuación de energía térmica para flujos de baja velocidad, dos-fases con adiciones de calor es dada como:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_k \rho_k h_k) - r_k \frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha_k \rho_k U_k k_{tot,k} - \alpha_k \lambda_k \nabla T_k) - \nabla \cdot \left(\left[\alpha_k \mu_k (\nabla U_k + (\nabla U_k)^T) \right] U_k \right) = \sum_{p=1}^n (\Gamma_{pk}^+ h_k - \Gamma_{kp}^+ h_k) \rho_k \alpha_k (U_k \cdot g) + S_{E,k} + \sum_{p=1}^n Q_{pk} \quad (5)$$

La tasa de energía entre las fases:

$$Q_{pk} = h_{pk} (\phi_p - \phi_k) \quad \text{ó} \quad S_{pk} = k_{pk} (\phi_p - \phi_k) \quad (6)$$

Material y métodos

Por la naturaleza del objetivo planteado, la metodología desarrollada para el presente trabajo de investigación fue basada en los siguientes tipos de investigación:

- Explicativa, se pretendió no solo describir el comportamiento del flujo de jugo sino también explicar las causas.
- Predictiva, se uso de código CFX para predecir fenómenos basados en datos anteriores y técnicas cuantitativas.
- Experimental, se realizaron mediciones experimentales para validar datos de la simulación computacional.

Respecto al material de estudio, para el modelamiento del campo de flujo en dos-fases (objeto de estudio), los siguientes propósitos computacionales fueron establecidos: el estado termodinámico del fluido fue una solución de agua con 13% de sacarosa y vapor, respectivamente. El régimen del flujo multifásico con fase secundaria (vapor) dispersa en el fluido primario (líquido) y viceversa. Cantidad de dispersión de la fase vapor, con fracción de volumen en la fase líquida menor al 10%, y dispersión del líquido con fracción de volumen en la fase vapor es mayor al 10%; por lo que la fase líquida se consideró fase dispersa con tamaño de gotas de 2 mm (ANSYS, 2010).

Se utilizaron los siguientes equipos e instrumentos:

- Un evaporador Roberts de 785 m², con tubos de calandria de 50.4 mm diam x 2,070 mm long, perteneciente a la primera unidad de un sistema de cuatro unidades de evaporación de la Emp. Azucarera Pucalá SAA, Lambayeque.
- Termómetros analógicos de rango 0° C a 150° C , con aproximación ±2.0° C
- Medidor de flujo másico de rango 0-150 m³/h, con aproximación ± 1m³/h
- PC de 64-bit, memoria RAM 4GB.
- Software comercial de ANSYS 13,
- Útiles de escritorio.

El Modelo Computacional, existen muchos tipos de modelos disponibles para flujos multifásicos. En este trabajo de investigación se usó el modelo Euler-Euler. En este modelo las fases fueron tratadas como continuas, y las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento y energía fueron definidas para cada fase en el código CFX. Puesto que el modelo Euler-Euler requiere de la complementación de correlaciones empíricas para la ecuación de cantidad de movimiento a fin de alcanzar buenos resultados, las siguientes correlaciones empíricas fueron usadas:

- Para la fuerza de arrastre total C_D se usó el modelo de Ishii-Zuber.

- b. Para la variación de la velocidad del flujo en el tiempo el modelo de viscosidad turbulenta.
- c. Para modelar la fuerza de dispersión de turbulencia se consideró la correlación de López de Bertodano.
- d. La viscosidad turbulenta según correlación de Sato y Sekoyuchi (ANSYS, 2010) y la correlación de Hughmark (Wanta, 2006):

Métodos y Técnicas Computacionales

El método para simular computacionalmente los campos de flujo usando la DFC con ANSYS fue el siguiente:

- a. Modelo geométrico del evaporador a escala 1:1 respecto al evaporador real tomando la parte simétrica al eje central vertical.
- b. Mallado tetraédrico de 600.000 nodos, 2 millones de elementos. El tamaño de la malla desde 0.25mm hasta 250 mm. Se refinaron las mallas
- c. Las propiedades físicas del fluido son para una solución azucarada y vapor de agua. Diámetro de burbuja de vapor en fase líquida de 2 mm. La interfaz a 300 mm sobre la placa superior de la calandria.
- d. Dominio computacional de 8.9 m de longitud x 2.9 m de diámetro. Tanto paredes internas del evaporador como de tubos de calandria fueron puestas a cero-deslizamiento ($v=0$ m/s) e impenetrabilidad del flujo.
- e. El procedimiento computacional para el cálculo de campos de flujo es por el Método del Volumen Finito, código de ANSYS. Convergencia con un residuo de 0.0001 y esquema numérico Upwind.

Diseño Experimental

Para validar la simulación computacional del campo de temperaturas se tomaron datos experimentales de temperatura; para ello se ubicaron cinco bulbos de temperatura tanto sobre la calandria como debajo de ésta. Los bulbos estuvieron a 100 mm de cada placa (superior e inferior). Un bulbo fue posicionado en el centro y los restantes separados radialmente a 700mm y 1400 mm del centro de cada lado del bulbo central. Se tomaron muestras cada media hora por un lapso cuatro horas y cuatro días. Se hicieron dos replicas. Los promedios fueron obtenidos estadísticamente.

Resultados

Los siguientes resultados se obtuvieron de la simulación computacional del campo de flujo de un sistema de dos-fases:

La figura 1 muestra que el campo de velocidades de la fase líquida cae dramáticamente desde la región de alimentación de líquido (3 m/s) hasta la superficie libre (0 m/s) sobre la placa superior de la calandria. El volumen del líquido alimentado muestra dos trayectorias: ascenso hacia la placa superior con velocidades desde 0.7 m/s a 2.3 m/s., y flujo hacia tubo central alcanzando valores de velocidad cercanos a 1m/s. El campo de velocidades del líquido disperso varía desde 0.7 m/s hasta 1.53 m/s. La Figura 2 revela que las velocidades más altas se hallan en la región cercana al alimentador de líquido. La Figura 3 exhibe el campo de velocidades de la fase vapor. La velocidad más alta del fluido gaseoso se encuentra en la mitad de la calandria y sobre la placa superior, alcanzando valores de hasta 22.82 m/s. Las velocidades más bajas se hallan en la región de salida del vapor, y el fondo del evaporador de hasta 5.70 m/s. La Figura 4 muestra el campo de temperaturas en el evaporador. Las temperaturas más

altas se hallan en el fondo del evaporador llegando a 448°K . Las temperaturas altas se hallan debajo de la calandria, mientras que las máximas se encuentran aproximadamente a la tercera parte de ésta, alcanzando un valor máximo de 438°K , la cual se incrementa rápidamente desde la región de alimentación de líquido a la periferia opuesta a esa región. La figura 6 representa el campo de presiones. La caída de presión en el evaporador es gradual desde el fondo al cuerpo. Se observa que la caída de presión entre la entrada de líquido y el fondo es dramática de 239 kPa a 220 kPa . La figura 7 muestra perfil de temperaturas simulados computacionalmente versus temperaturas tomadas experimentalmente. Los valores experimentales hallados muestran bastante consistencia con los simulados. Estos valores se muestran en la tabla 1.

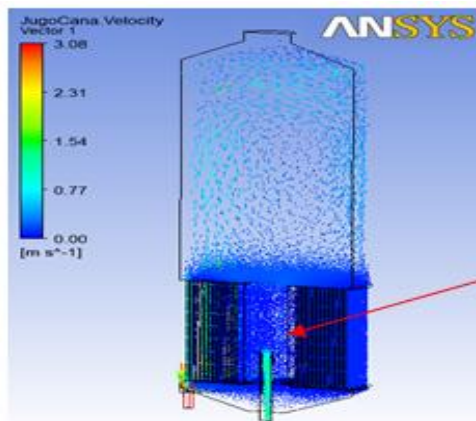


Figura 1. Vectores de velocidad de Fase líquida y fase vapor en 3D

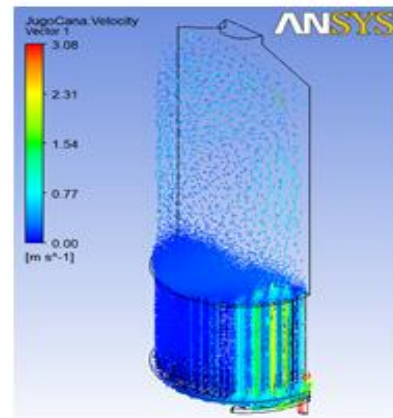


Figura 2. Vista lateral de vectores de Velocidad de fase líquida y vapor en 3D

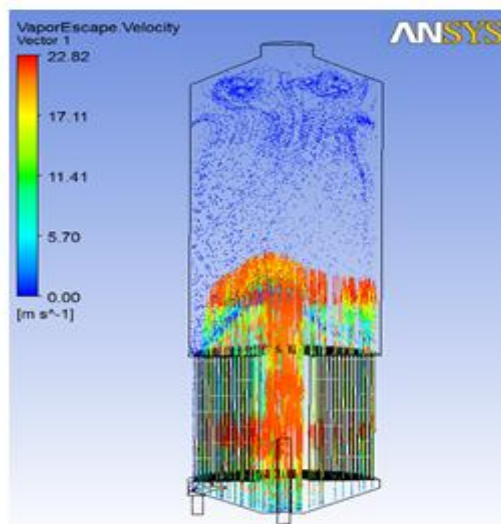


Figura 3. Campos de velocidad de fase Vapor desprendido de tubos de calandria

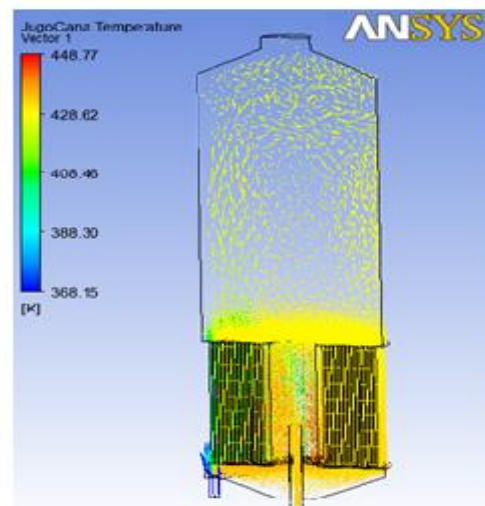


Figura 4. Campo de temperaturas de Fase líquida en fondo y calandria

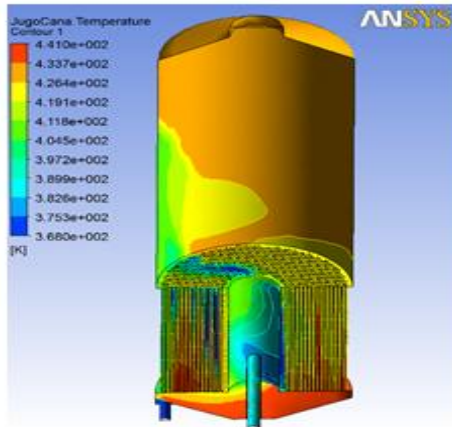


Figura 5. Contornos de temperaturas de Fase líquida en fondo y calandria

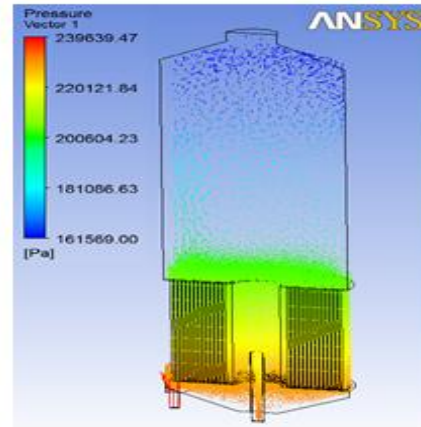


Figura 6. Campos de presión de un flujo de dos-fases en un evaporador tipo Roberts

Perfil de Temperatura Líquido versus Sección Transversal de Calandria

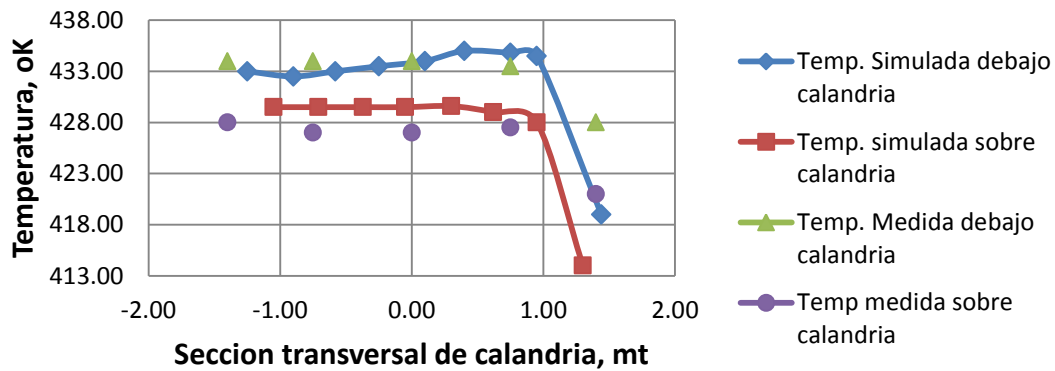


Figura 7. Perfil de temperatura debajo y encima de calandria simulado computacionalmente versus temperatura medida tanto debajo como encima de calandria.

Tabla 1. Valores de temperatura tanto simulados computacionalmente como medidos experimentalmente. Valores correspondientes tanto debajo como encima de calandria.

Temp. Simulada Debajo calandria		Temp. Simulada Encima calandria		Temp. Medida en calandria		
Sección radial. (m)	oK	Sección radial. (m)	oK	Sección radial. (m)	Encima oK	Debajo oK
-1.25	433.00	-1.05	429.50	-1.40	434.00	428.00
-0.90	432.50	-0.75	429.50			
-0.58	433.00	-0.37	429.50	-0.75	434.00	427.00
-0.25	433.50	-0.05	429.50			
0.10	434.00	0.30	429.60	0.00	434.00	427.00
0.40	435.00	0.62	429.00			
0.75	434.80	0.95	428.00	0.75	433.50	427.50
0.95	434.50	1.30	414.00			
1.44	419.00			1.40	428.00	421.00

Discusión

La caída dramática del campo de velocidades en el evaporador desde la entrada de líquido corresponde la cantidad de energía cinética contenida del fluido, necesaria para llegar a una determinada superficie libre que constituye la interfaz de las dos-fases. El campo de velocidades presenta un comportamiento diferente a la opinión generalizada de recorrer radial y uniformemente cubriendo el fondo del evaporador. Según la figura 1, los vectores de velocidad no tienen dirección ascendente; es decir desde el fondo hacia la placa superior, sino en sentido opuesto o descendente. Similares resultados han sido hallados por Pennisi (2003). Este fenómeno es debido probablemente a que el alimentador de líquido al evaporador está posicionado en la región perimétrica del evaporador, causando que el fluido no permita un desplazamiento de ascenso.

Este comportamiento sugiere que la entrada de alimentación y su posición en el fondo influyen en el campo de velocidades. Esta afirmación está en concordancia con lo afirmado por Ahmad (1951). El área efectiva entre el tubo central y el de evacuación jugaría un rol importante en el tiempo de residencia del líquido debido al fenómeno de recirculado de jugo. El fenómeno de recirculación de líquido en el tubo central de un evaporador ha sido estudiado por Tromp (1964), Bosnjak (1969), quienes afirman que éste causa pobre evaporación de líquido si no es correctamente diseñado. La formación de cantidad de masa dispersa en forma de gotas de líquido en el cuerpo del evaporador, llamadas arrastres (Tromp, 1964), estarían en buena concordancia con el modelo usado para simular el fluido en dos-fases.

La variabilidad del campo de temperaturas según las figuras 4 y 5 parecen estar afectados por el comportamiento del campo de velocidades ya que el movimiento de las partículas del fluido en la calandria estaría determinando que la región de entrada de líquido y a alta velocidad el proceso de transferencia de calor sea menor que las regiones de descenso y a baja velocidad. Esto podría explicar porque el líquido debajo de la calandria es mayor su temperatura que encima de la calandria, como se muestra el perfil de temperaturas de la figura 5. Este comportamiento es corroborado con los datos experimentales obtenidos en la tabla 1.

Para un sistema de evaporación con calandria la máxima transferencia de calor estaría ocurriendo entre la mitad y tercera parte de un tubo según la figura 6. Este resultado está en concordancia con lo afirmado por Kakac (1991). De acuerdo a la figura 7 se puede ver que el modelo computacional desarrollado está en buena concordancia con los valores de temperaturas medidos experimentalmente (tabla 1); es decir el modelo que mide el campo de temperaturas responde a los datos medidos en la realidad. Aunque los valores de temperaturas más bajas correspondientes a la región de alimentación difieren de las simuladas computacionalmente, probablemente el método de muestreo y posición de los bulbos del termómetro hayan influenciado en la respuesta. El campo de presiones de la fase líquida (figura 6), está definido por la altura del nivel de líquido presente en el evaporador (Kakac, 1991); es decir a mayor altura mayor carga hidrostática. Esto sugiere que trabajando a bajas alturas de líquido se podría obtener una mayor ebullición del fluido.

Conclusiones

El campo de velocidades tiene una trayectoria circular ascendente y de dirección paralela al eje axial del evaporador cuando sale del distribuidor de jugo con posición excéntrica al su eje axial.

El campo de velocidades en la región del fondo del evaporador son de magnitud significativamente baja

El campo de velocidades es caótico en la región entre el área efectiva de recirculación y el área de descarga del jugo, respectivamente; determinando un tiempo de residencia del líquido en el evaporador.

El campo de temperatura del líquido sobre la placa superior de la calandria es menor que el de la placa inferior de la calandria.

El campo de temperatura del líquido es máxima en la región media de la altura de la calandria.

El campo de temperatura está influenciado directamente por el campo de velocidades e indirectamente por el campo de presiones en un evaporador.

El campo de presiones del jugo presenta una marcada caída en su trayectoria ascendente a la placa superior de la calandria. Alta en el fondo y baja en el cuerpo.

Referencias bibliográficas

- Ahmad, Q. (1951). The Effect of Juice Inlet Design on Evaporator Efficiency. *The Sugar Journal*. July. (pp. 17-19).
- Ansys (2010). ANSYS CFX.13. United States.
- Bosnjak, M. (1969). Importance of Recirculation in Evaporators. *The Sugar Journal*. October. (pp. 9-10 y 33).
- Echeverri, L.E. (2007). *Measurements and Computations of the Flow in Full-Scale Sugar Evaporative-Crystallizers and Lab-Scale Models*. PhD. Thesis. Louisiana State University. USA.
- Hugot, E. (1986). *Handbook of Cane Sugar Engineering* (3^a Ed.). Amsterdam. Holland. Elsevier.
- Kakac, S. (1991). *Boilers, Evaporators, and Condensers*. USA. John Wiley & Son.
- 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).
- Pennisi, S. (2004). *Development of a more Efficient Roberts Evaporator based on CFD Modeling*. PhD Thesis. James Cook University. Australia.
- Rackmann, D. y Broadfood, R. (2007). Improve Pan Stirrer Performance Through CFD Modelling. *Proc. Int. Soc. Sugar Cane Technol.* Vol. 26. (pp. 1573-1584).
- Tromp, L.A. (1964). Single Pass vs. Recirculation in Evaporators. *The International Sugar Journal*. July. (pp 222-224).
- Wanta, W. (2006). *Computational Fluid Dynamics of a DBT Crystallizer*. Tesis. Suranaree University of Technology. MEChE.