

**ESTUDIO DEL EFECTO DEL FLUJO DE CALOR EN EL PROCESO DE
EVAPORACIÓN DEL JUGO DE CAÑA EN UN ARREGLO DE PELÍCULA
DELGADA PLANA**

**DIEGO HERNANDO PEREZ SANCHEZ
JESSICA DURAN GOMEZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2012

**ESTUDIO DEL EFECTO DEL FLUJO DE CALOR EN EL PROCESO DE
EVAPORACIÓN DEL JUGO DE CAÑA EN UN ARREGLO DE PELÍCULA
DELGADA PLANA**

**DIEGO HERNANDO PEREZ SANCHEZ
JESSICA DURAN GOMEZ**

Trabajo de grado para optar el titulo de Ingeniero químico

DIRECTORES:

HUMBERTO ESCALANTE

Ing. Químico, PhD

Profesor escuela de Ing. Química

OSCAR ANDRÉS MENDIETA

Ing. Químico

Candidato a Magister de Ing. Química

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2012

DEDICATORIA

A Dios por ser mi guía y protector.

*A mis padres **Alonso Pérez** y **Aliria Rosa Sánchez**, que con su*

Amor y ejemplo de vida han sido el apoyo y el motivo

Para no desmayar en los momentos difíciles,

Por mostrarme su confianza incondicional

Hoy este triunfo es suyo.

*A mi hermano **Fabricio Pérez** por su compañía y apoyo.*

A toda mi familia que me apoyo en todo momento;

Con cariño y fe Siempre estuvieron presentes.

A mis amigos, que estuvieron presentes en este proceso de

Formación como críticos constructivos y de quienes nunca

Olvidare los momentos de risa que alegraron mi vida.

DIEGO

DEDICATORIA

*A Dios por permitirme estar en la universidad que quería,
A mi mamá Ana más bella y valiente que pueda existir,
A mi papá Ruben que siempre me apoyo en todo lo que me propuse,
A mis hermanos Aliandrus y Jarobsy y la sobrina más divida Aldry
A mis amigos que estuvieron cuando los necesite y cuando no también
Besitos a todos*

JESSICA

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	7
1. METODOLOGÍA	19
2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	18
2.1. EFECTO DEL PRECALENTAMIENTO, X_a , m_a Y T_s SOBRE h EN EL EPP	18
2.2. EFECTO DE LA T_s Y m_a SOBRE LA VARIACIÓN DE CSS	19
2.3. ANÁLISIS DE T_s Y X_a SOBRE EL % DE AGUA EVAPORADA	20
2.4. ANÁLISIS DEL FLUJO DE CALOR REQUERIDO EN LA EVAPORACIÓN	22
CONCLUSIONES	24
BIBLIOGRAFÍA	32

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Evaporador de película delgada	17
Figura 2. Evaporador de película delgada plana a escala piloto	19
Figura 3. Evaporador de película delgada plana a escala piloto	22
Figura 4. Efecto del precalentamiento, X_a , m_a y T_s sobre h en el EPP	25
Figura 5. Efecto de la T_s y m_a sobre la variación de CSS	20
Figura 6. Efecto de T_s y X_a sobre % de agua evaporada	21
Figura 7. Variación del flujo de calor requerido en el proceso de evaporación	23

RESUMEN

TITULO: estudio del efecto del flujo de calor en el proceso de evaporación del jugo de caña en un arreglo de película delgada plana

AUTORES: DIEGO HERNANDO PÉREZ SÁNCHEZ, JESSICA DURÁN GÓMEZ **

PALABRAS CLAVES: paila, evaporador de película plana, transferencia de calor, concentración.

DESCRIPCIÓN:

Actualmente el proceso de producción de panela se ve afectado por la falta de tecnología que permita que este sea eficiente. La evaporación es una de las etapas más importantes del proceso de producción de panela, donde se concentra el jugo de caña de azúcar, eliminando cerca del 80% del agua contenida mediante calentamiento. Hoy en día se utilizan pailas evaporadoras para llevar a cabo esta etapa; en las pailas la transferencia de calor es afectada por el tiempo de residencia, el área de contacto y por tanto su diseño.

El presente trabajo consistió en evaluar experimentalmente la evaporación del jugo de caña de azúcar en un equipo de placa plana a escala piloto, que opere en película, determinando el efecto de las variables temperatura del alimento y temperatura de la superficie dando respuesta al coeficiente de transferencia de calor.

Se obtuvo una mejora significativa en la transferencia de calor del evaporador en placa plana respecto a las pailas. Para concentrar el jugo de caña de azúcar las mejores condiciones en el rango de estudio fue una temperatura de la superficie correspondiente a 190°C y un precalentamiento del jugo a 60°C. Estas condiciones garantizan elevado coeficiente de transferencia de calor, y por ende un excelente aprovechamiento térmico calor.

* Proyecto de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas, Escuela de Ingeniería Química. Directores: PhD Humberto Escalante e Ing. Oscar Mendieta

ABSTRACT

TITLE: Studying the effect of heat flow in the evaporation process sugar cane juice in an array of thin film flat

AUTHORS: DIEGO HERNANDO PÉREZ SÁNCHEZ, JESSICA DURÁN GÓMEZ**

KEYWORDS: pan, thin film evaporator, heat transfer, concentration.

DESCRIPTION:

Currently the brown sugarloaf production process is affected by the lack of technology that allows it to be efficient. Evaporation is one of the most important steps of the production process of sugarloaf, which concentrates the sugar cane juice, removing about 80% of the contained water by heating. Today evaporating pans are used to carry out this step, into the boilers the heat transfer is affected by the residence time, the contact area and therefore their design.

The present study was made to evaluate experimentally the evaporation of sugarcane juice on a flat plate at a pilot scale, operating on film, determining the effect of variable food temperature and surface temperature in response to the transfer coefficient heat.

It was obtained a significant improvement in heat transfer plate evaporator flat against to the boilers. To concentrate the sugar cane juice the best conditions in the range of study was a corresponding surface temperature to 190 ° C and a preheating of the juice to 60 ° C. These conditions ensure high heat transfer coefficient and thus an excellent use thermal heat. It was obtained a significant improvement in heat transfer plate evaporator flat against to the boilers. To concentrate the sugar cane juice the best conditions in the range of study was a corresponding surface temperature to 190 ° C and a preheating of the juice to 60 ° C. These conditions ensure high heat transfer coefficient and thus an excellent use thermal heat.

* Thesis Project

** School of Chemical Engineering, Faculty of Physical Chemistry Engineering, Directors: Dr. Humberto Escalante and Ing. Oscar Mendieta

INTRODUCCIÓN

La panela es un producto alimenticio que se utiliza como edulcorante (posee carbohidratos, minerales, proteínas y vitaminas) y se obtiene por concentración del jugo de la caña de azúcar [Borray, 2005]. Colombia es el segundo productor mundial de panela y la producción en Santander es de 226,915 t/año [Fedepanela, 2010].

El proceso de elaboración de panela comprende las etapas de: a) extracción del jugo de la caña de azúcar (JCA), b) prelimpieza, c) clarificación d) evaporación, e) concentración y, f) agitación y solidificación a temperatura ambiente [García, 2007; Sardeshpande et al, 2010]. Las etapas de clarificación, evaporación y concentración del JCA, se desarrollan en una hornilla panelera compuesta de una cámara de combustión, un ducto gases, pailas (batería de concentración) y una chimenea [Anwar, S.I, 2010]. El suministro de energía a la hornilla se realiza por medio de los gases de combustión del Bagazo de Caña (BC).

En la evaporación, el jugo procedente de la clarificación ingresa a una paila, que se encuentra a una temperatura por debajo de su punto de ebullición (70°C). Cuando se suministra energía al jugo se incrementa su temperatura hasta alcanzar el punto de ebullición, el cual depende de la presión de operación [Mujica, et al, 2008]. En la evaporación se elimina alrededor del 80% del agua contenida en el jugo, logrando un cambio de concentración de sólidos solubles (CSS) desde 24 grados Brix (°B) hasta 65°B, por lo cual el jugo recibe el nombre de miel.

Actualmente el sector industrial de la panela en Santander, realiza la evaporación del JCA en pailas de diferentes formas y tamaños, fabricadas en cobre, aluminio,

acero inoxidable o hierro [García et al., 2008]. Las pailas son de forma semiesférica, plana, semicilíndrica, aleteada, pirotubular y piroaleteada y operan con temperaturas entre 353°C y 964°C [Hernández, 2004]. En las pailas la transferencia de calor es afectada por el tiempo de residencia, el área de contacto y por tanto su diseño.

La evaporación del JCA se realiza en un tiempo de 2,2h, por lo cual hay problemas de inversión y sobrecalentamiento del jugo [Amosun, 2000]. La eficiencia de las pailas se determina como la energía aprovechada por el JCA respecto a la energía suministrada por el BC. La eficiencia en las actuales pailas paneleras es del 20,12%, y al modificarla colocándole aletas la eficiencia aumenta hasta 29,46% [Anwar, 2010]. En las pailas hay pérdidas energéticas debido a que su área de transferencia de calor es pequeña y el volumen de JCA es grande; por consiguiente la ebullición es “tipo alberca”. Adicionalmente, estas pailas operan a presión atmosférica y no están aisladas; por lo tanto se requieren grandes cantidades de combustible para poder evaporar el jugo.

Para resolver los problemas de las pailas, arriba mencionados, se han desarrollado evaporadores de película como una alternativa para concentrar fluidos sensibles al calor. Estos equipos pueden operar a presión atmosférica, en continuo y con tiempos de residencia menores. La formación de una película mejora la transferencia de calor, reduciendo el consumo de energía y por tanto el consumo de combustible [Adib et al., 2009, Nindoet al., 2004].

El rendimiento de un evaporador se expresa por medio de la ley de Newton de enfriamiento en función del coeficiente de transferencia de calor:

$$Q = h_o * A_o * \Delta T_v \quad \text{Ecuación (1)}$$

Donde Q [W] es el calor intercambiado, A_o [m²] es la superficie de intercambio de energía y ΔT_v [°C] es una diferencia de temperatura entre el medio de calentamiento y el fluido.

Así mismo, el coeficiente global de transferencia de calor (h_o) para una geometría de película plana se puede establecer como una suma de resistencias térmicas:

$$\frac{1}{h_o} = \frac{1}{h_v} + \frac{e}{\lambda_w} + R_f + \frac{1}{h_L} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde $\frac{1}{h_v}$ es la resistencia a la transferencia del calor local en el lado del vapor, $\frac{e}{\lambda_w}$ es la resistencia generada por la conductividad en la placa para determinado espesor, R_f es la resistencia generada por la capa de suciedad en la placa, $\frac{1}{h_L}$ la resistencia a la transferencia de calor en la interfase sólido-líquido con el líquido en ebullición [Adib y Vasseur, 2008].

La resistencia limitante de la transferencia de calor es aquella que se encuentra entre la pared y el líquido $h = 1/h_L + R_f$, especialmente cuando la viscosidad del fluido se incrementa a altas concentraciones [Adib *et al.*, 2009]. La ecuación de transferencia de calor en un proceso a estado estable, puede expresarse como:

$$Q = A * h * \Delta T \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde Q [W] es la suma del calor sensible más el calor latente, A [m²] es el área que tiene contacto con el fluido, ΔT [°C] es la diferencia de temperatura entre la interfaz sólido-líquido y el seno del líquido.

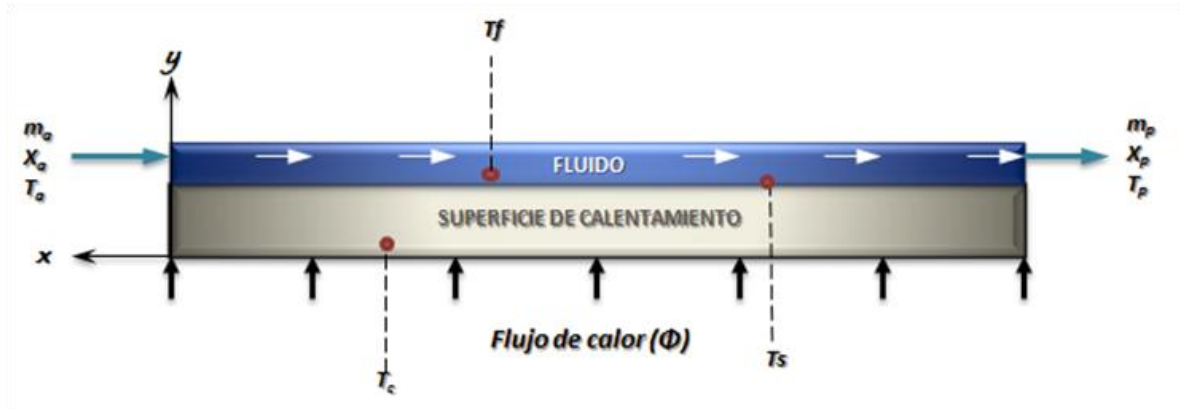
El coeficiente de transferencia de calor (h) depende de las propiedades físicas de líquido (viscosidad dinámica, densidad, tensión superficial, etc.), las condiciones de operación (flujo, temperatura de la superficie, concentración, temperatura del alimento, etc.), la naturaleza y geometría de la superficie del evaporador (tipo de material, espesor de la superficie etc.) [Chen H. *et al.*, 1997; Adib y Vasseur, 2008].

En el proceso de producción de panela usado actualmente no hay una temperatura establecida a la cual el jugo entra a la paila evaporadora, debido a esto se hace necesario verificar una temperatura de entrada más efectiva para iniciar la evaporación. El precalentamiento de la alimentación puede conducir potencialmente a mejoras en el rendimiento y la eficacia de evaporación [Nindo *et al.*, (2004)].

En un evaporador de película delgada las variables temperatura de la superficie y temperatura del alimento son importantes dado que cuando la diferencia entre estas aumenta, mayor es la energía que se debe suministrar al sistema para llevar el fluido al cambio de fase.

En la figura 1 se muestra un evaporador de película delgada plana, donde ingresa un fluido a la temperatura T_a , concentración de sólidos solubles X_a , y flujo másico m_a . El fluido pasa sobre la superficie que se encuentra a una temperatura T_s y al final se obtiene un producto con una concentración de sólidos solubles X_p , temperatura T_p y un flujo másico m_p .

Figura 1. Evaporador de película delgada



La capacidad del evaporador es una medida de la cantidad de agua evaporada por hora y puede estimarse a partir del balance de masa global y el balance de materia seca:

$$m_v = m_a (1 - x_a/x_p) \quad \text{Ecuación (4)}$$

El calor transferido al fluido corresponde a la suma del calor sensible (Q_S) y el calor latente (Q_L). Cuando hay una variación de temperatura, la cantidad de calor que ha tomado o perdido se calcula mediante el calor sensible:

$$Q_S = m * C_p * \Delta T \quad \text{Ecuación (5)}$$

Siendo, m [kg] el flujo másico, C_p [kJ/kg °C] el calor específico. El calor Q_L se determina como la masa de agua evaporada (m_v) por el calor latente de vaporización (ΔH_v):

$$Q_L = m_v * \Delta H_v \quad \text{Ecuación (6)}$$

La diferencia de temperatura de la ecuación 3 puede especificarse para el sistema de evaporación de película delgada, por medio de la ecuación:

$$\Delta T = T_s - \frac{T_a - T_p}{2} \quad \text{Ecuación (7)}$$

La temperatura de la superficie puede estimarse a partir de la ley de conducción de Fourier, una vez conocido el calor intercambiado:

$$Q = \frac{\lambda_w}{e} (T_c - T_s) \quad \text{Ecuación (8)}$$

Donde, λ_w [W/m °C] es la conductividad térmica de la pared, e el espesor de la placa, A el área de intercambio, T_c es la temperatura debajo de la placa y T_s la temperatura en la interfaz superficie-líquido.

$\sigma T'_s$ En el evaporador el área es constante y tiene un valor determinado, por consiguiente es posible obtener el coeficiente h a unas condiciones de operación definidas, a partir del calor intercambiado Q y la diferencia ΔT .

Por lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue evaluar experimentalmente la evaporación del JCA en un equipo de placa plana a escala piloto, que opere en película, determinando el efecto de las variables temperatura del alimento y temperatura de la superficie sobre el coeficiente de transferencia de calor

1. METODOLOGÍA

La etapa experimental se llevó a cabo en el Centro de Investigación para el Mejoramiento de la Agroindustria Panelera–CIMPA (CORPOICA), localizado en el municipio de Barbosa (Santander). Las pruebas se realizaron en un evaporador de película en placa plana (EPP) a escala piloto visible en la figura 2 y para mayor comprensión se muestra la figura 3.

Figura 2. Evaporador de película delgada plana a escala piloto



El EPP opera a presión atmosférica y tiene una placa con un área de 0,13m construida en acero inoxidable 316L, sobre la cual fluye el JCA. La superficie de

ensayo se calentó por medio de resistencias eléctricas hasta lograr una temperatura constante luego de alcanzar un estado estacionario.

Como fluido de trabajo se utilizó JCA, preparado a partir de miel de caña diluida. El EPP está compuesto por un tanque de almacenamiento en el cual se dispone el jugo y se fija la concentración del alimento utilizando un refractómetro referencia Pocket Atago (0-53%). El jugo es transferido al tanque distribuidor, provisto de a) un controlador de nivel conectado a una válvula solenoide, para lograr una cabeza estática del líquido constante en el tanque, b) una resistencia eléctrica y un control de temperatura para calentar el jugo hasta las condiciones del alimento, y c) una válvula tipo compuerta para fijar el flujo del alimento.

El jugo se distribuye sobre la superficie de calentamiento (puesta a 0° para asegurar su completa humectación y provista de una resistencia eléctrica de 5500W) formando una película delgada. Al final de la placa se ubicó el tanque recolector donde se almacena el producto. El volumen y la CSS del jugo concentrado se midieron cada tres minutos. La temperatura de la superficie y del jugo se midió con 11 termopares tipo K, cada 30s, las cuales estaban conectados a un Data logger multiplexor para el registro de los datos.

El flujo de JCA concentrado a la salida del evaporador se calculó con una ecuación que correlaciona la concentración de sólidos soluble con la densidad dada en unidades de kg/m^3 [Pacheco *et al.*, 1999, citado por L.M.M. Jorge *et al.*, 2010].

$$\rho = 1000 * (0,956 - 0,005X_p) \quad \text{Ecuación (9)}$$

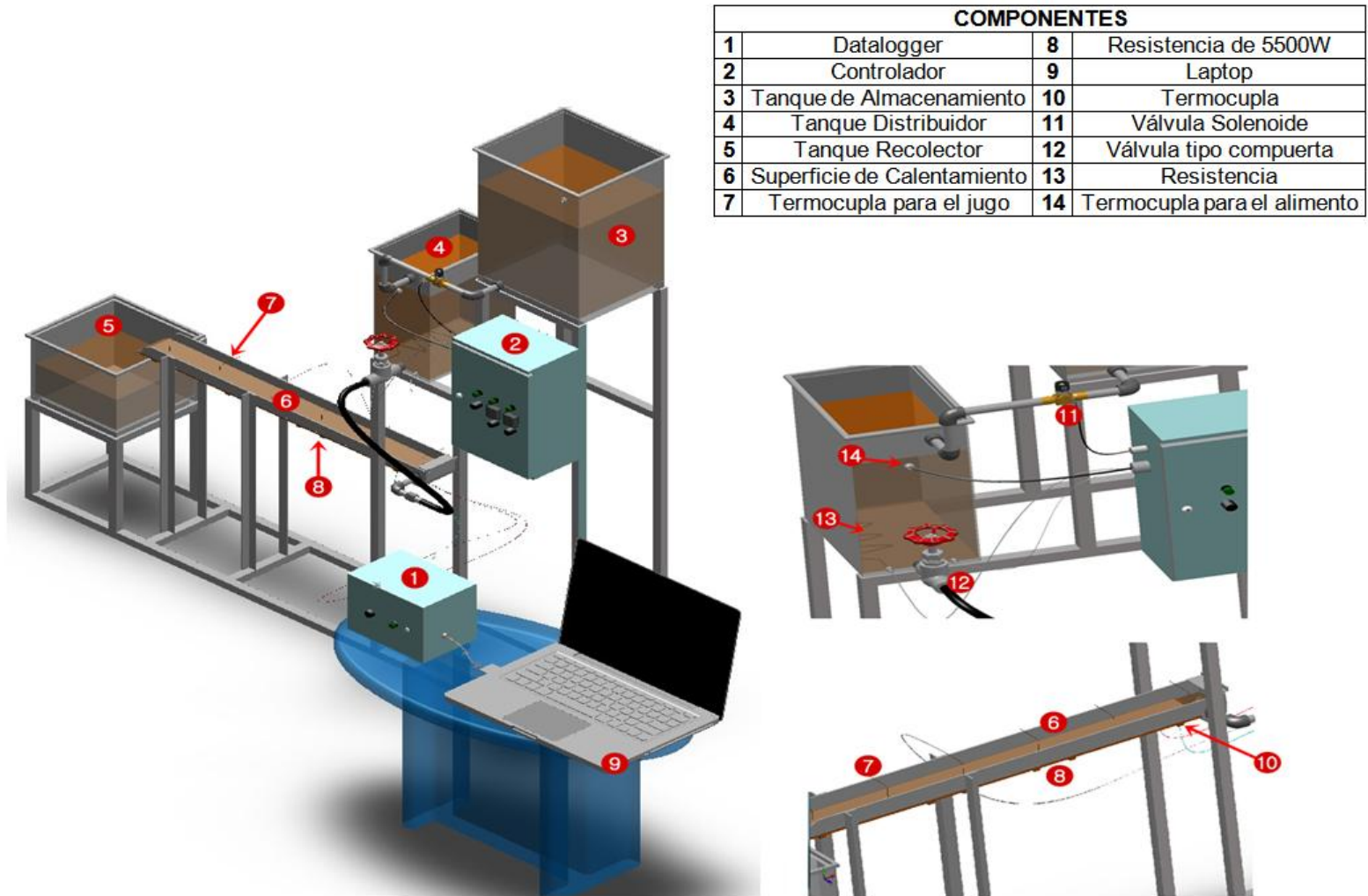
Para determinar el calor sensible, se utilizó la correlación de calor específico C_p [$\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$] propuesta por [Hugot, 1986, citado por L.M.M. Jorge *et al.*, 2010].

$$C_p = 4,1868 - 2,5121X_a \quad \text{Ecuación (10)}$$

El calor latente de vaporización [W] para calcular Q_L fue tomada de [Nindo, *et al.*, 2004]:

$$\Delta H_v = 2499 \text{ EXP}(-0,001016T) \quad \text{Ecuación (11)}$$

Figura 3. Evaporador de película delgada plana a escala piloto



La evaluación de las variables de operación se realizó usando dos niveles de variables fijas (CSS y flujo de alimento), para un total de 36 pruebas, cada una con una duración de 60min que incluye limpieza del equipo y estabilización de las condiciones de operación del evaporador (tabla 1).

Tabla 1. Diseño Experimental.

Variables de operación				
Experimento	Concentración (°B)	Flujo (Kg/h)	Talimento (°C)	Tsuperficie (°C)
1	18	5,7	60	140
2	18	5,7	75	140
3	18	5,7	90	140
4	18	5,7	60	165
5	18	5,7	75	165
6	18	5,7	90	165
7	18	5,7	60	190
8	18	5,7	75	190
9	18	5,7	90	190
10	18	38,4	60	140
11	18	38,4	75	140
12	18	38,4	90	140
13	18	38,4	60	165
14	18	38,4	75	165
15	18	38,4	90	165
16	18	38,4	60	190
17	18	38,4	75	190
18	18	38,4	90	190
19	30	5,7	60	140
20	30	5,7	75	140
21	30	5,7	90	140
22	30	5,7	60	165
23	30	5,7	75	165
24	30	5,7	90	165
25	30	5,7	60	190
26	30	5,7	75	190
27	30	5,7	90	190
28	30	38,4	60	140
29	30	38,4	75	140
30	30	38,4	90	140

31	30	38,4	60	165
32	30	38,4	75	165
33	30	38,4	90	165
34	30	38,4	60	190
35	30	38,4	75	190
36	30	38,4	90	190

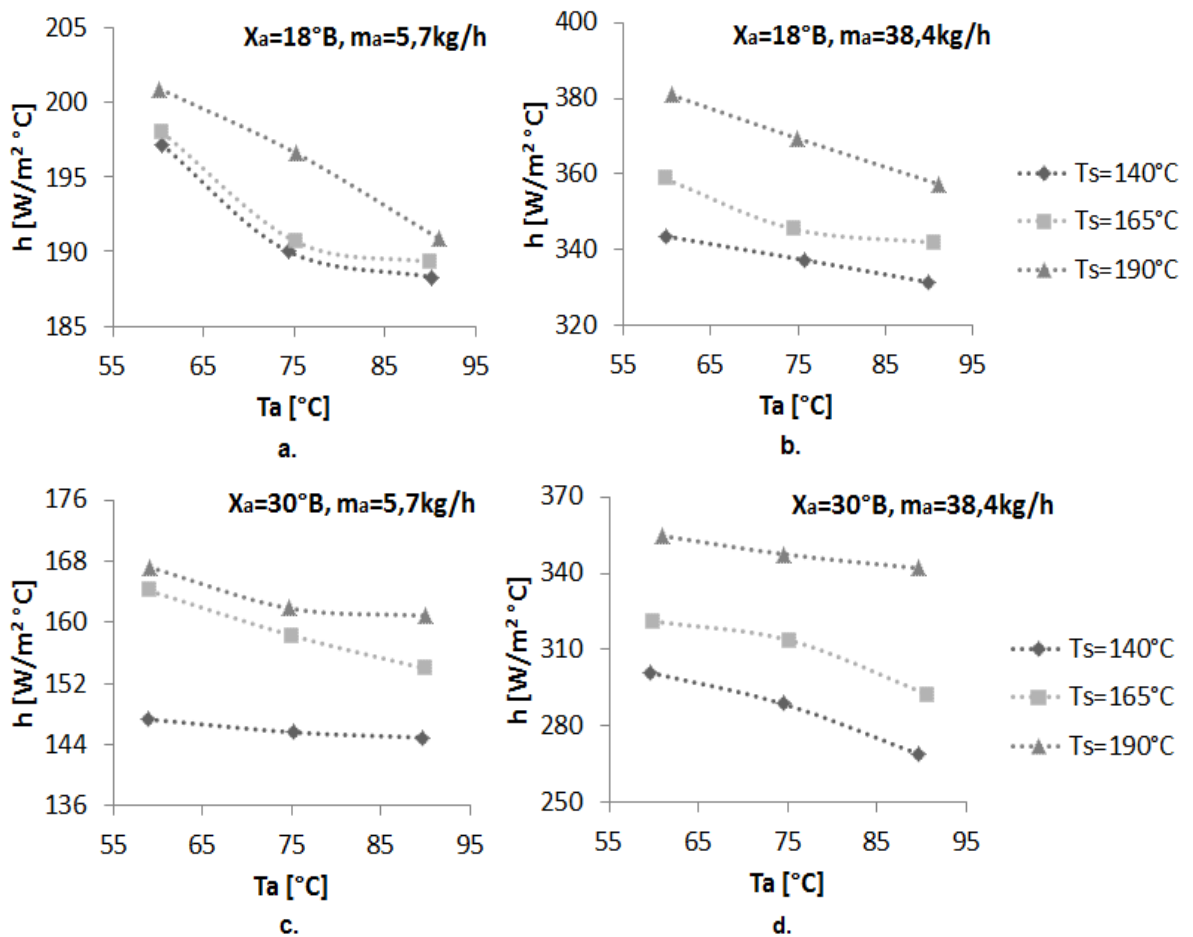
Debido al descenso en la temperatura del jugo al pasar de la clarificación a la evaporación que ocurre en el proceso tradicional de evaporación, se consideró el rango de operación para T_a de 60°C, 75°C y 90°C. En el evaporador EPP la T_s es inferior a la temperatura de la paila. Esta condición se tiene en cuenta para fijar los niveles de operación de T_s . Por lo tanto se seleccionó para T_s el rango de 140°C, 165°C y 190°C. Las pruebas se realizaron manteniendo constante la CSS inicial en dos niveles: 18°B y 30°B y el flujo de alimento en 5,7 kg/h y 38,4 kg/h.

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.1. EFECTO DEL PRECALENTAMIENTO, X_a , m_a Y T_s SOBRE h EN EL EPP

El comportamiento de h en función de la variación de T_a , a tres temperaturas de superficie, en el siguiente orden: a) $X_a=18^\circ\text{B}$ y $m_a=5,7\text{kg/h}$, b) $X_a=18^\circ\text{B}$ y $m_a=38,4\text{kg/h}$, c) $X_a=30^\circ\text{B}$ y $m_a=5,7\text{kg/h}$, d) $X_a=30^\circ\text{B}$ y $m_a=38,4\text{kg/h}$, se presenta en la figura 4.

Figura 4. Efecto del precalentamiento, X_a , m_a y T_s sobre h en el EPP



En general en el proceso de evaporación, se observa en las gráficas que al precalentar el alimento, en todos los experimentos el h disminuye con el incremento de T_a . Esta variación puede deberse a un menor requerimiento de flujo de calor para lograr la evaporación, ya que el fluido viene con un calentamiento previo y esto conduce potencialmente a mejoras en la eficiencia de la evaporación.

Al aumentar la concentración del jugo de 18°B a 30°B, el coeficiente h disminuye debido a que el fluido posee menos cantidad de agua para evaporar; por consiguiente para evaporar el agua se requiere menor flujo de calor desde la superficie de calentamiento hacia el líquido.

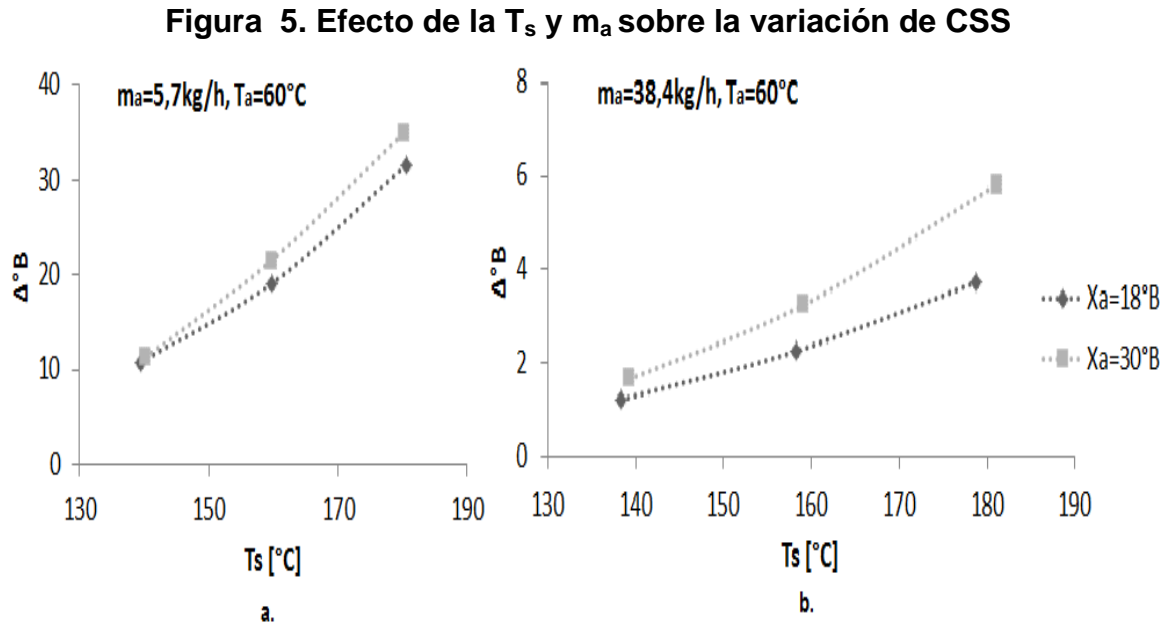
Al analizar la tendencia de h con respecto a la temperatura del alimento y de la superficie, se observó que el coeficiente varía más drásticamente con T_s , debido a que se genera gradientes (fuerza impulsadora de la transferencia de calor) mayores.

Con respecto a la variación del flujo másico de alimento, se observó que se favorece el fenómeno de transferencia de calor, incrementando la rata de jugo de caña. Este hecho conduce a elevar el h , debido a la convección generada por el movimiento del líquido sobre la placa [Nindo *et al.*, 2004]. Al aumentar T_s se genera un mayor gradiente de temperatura, lo cual favorece la transferencia de calor, por tanto las mejores condiciones para h se obtienen cuando $T_a=60^\circ\text{C}$ y $T_s=190^\circ\text{C}$.

2.2. EFECTO DE LA T_s Y m_a SOBRE LA VARIACIÓN DE CSS

De la figura 4 se determinó que la mejor $T_a=60^\circ\text{C}$, teniendo esto en cuenta se optó esta temperatura para analizar el cambio de concentración y el flujo másico. La

figura 5 muestra la variación del cambio de concentración del JCA en el EPP, a tres temperaturas de superficie, para a) $m_a=5,7\text{kg/h}$ b) $m_a=38,4\text{kg/h}$.

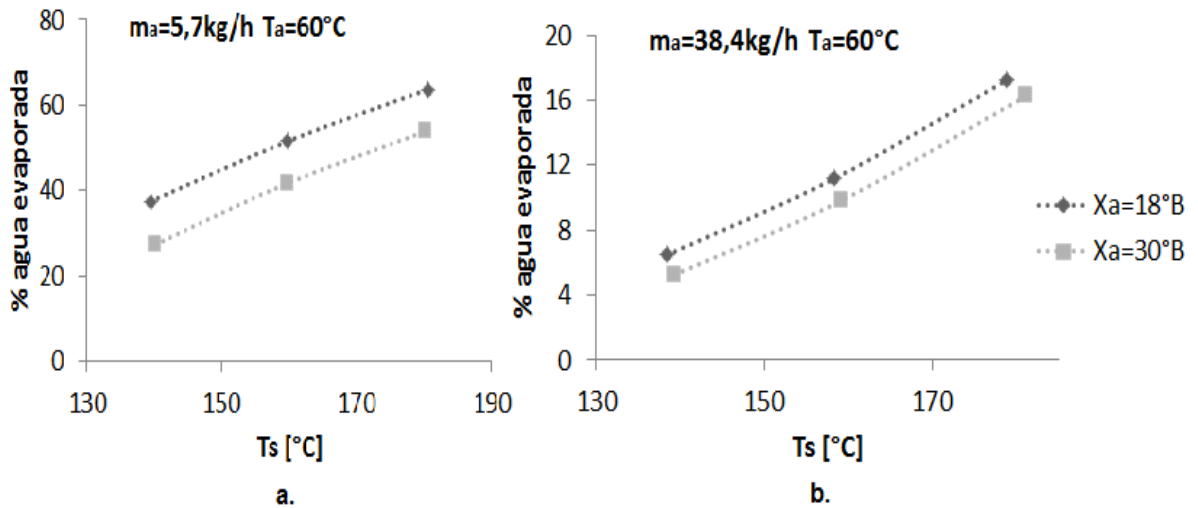


La variación $\Delta^\circ\text{B}$ respecto a T_s , presentan un incremento alrededor del 21,5% para un flujo de $5,7\text{kg/h}$, mientras que para el flujo de $38,4\text{kg/h}$ tan sólo es del 3,0%, este cambio de concentración es mayor debido a que el espesor de la película de líquido es más delgado y el tiempo de residencia mayor cuando el flujo de alimento es más pequeño [Tsay and Lin, 1995]. Sin embargo cuando se tiene un flujo mayor el coeficiente h se ve favorecido por el incremento del espesor del fluido.

2.3. ANÁLISIS DE T_s Y X_a SOBRE EL % DE AGUA EVAPORADA

En la figura 6 se presenta el porcentaje de agua evaporada para $T_a=60^\circ\text{C}$ y tres temperaturas de superficie, a) $m_a=5,7\text{kg/h}$, b) $m_a=38,4\text{kg/h}$.

Figura 6. Efecto de T_s y X_a sobre % de agua evaporada



La tendencia al aumentar la T_s es que se va a concentrar más y por lo tanto el agua evaporada va a ser mayor. Cuando el flujo de entrada es 5,7kg/h el agua evaporada alcanza hasta 60%, mientras que para el flujo 38,4kg/h solo se evapora el 17% del agua contenida en el jugo. El porcentaje de agua evaporada es significativamente menor cuando se incrementa el flujo, puesto que el tiempo de residencia es menor y la película de líquido es más gruesa. De otro lado, el porcentaje de agua evaporada es 15% mayor cuando $X_a = 18^\circ\text{B}$ en comparación con el de $X_a = 30^\circ\text{B}$.

En la tabla 2 se presentan los valores para el calor sensible, calor latente, calor total y flujo de calor a presión constante, para los tres niveles de T_s y T_a , con $X_a = 18^\circ\text{B}$.

Tabla 2. Flujo de calor requerido en el proceso de evaporación, $X_a=18^\circ\text{B}$

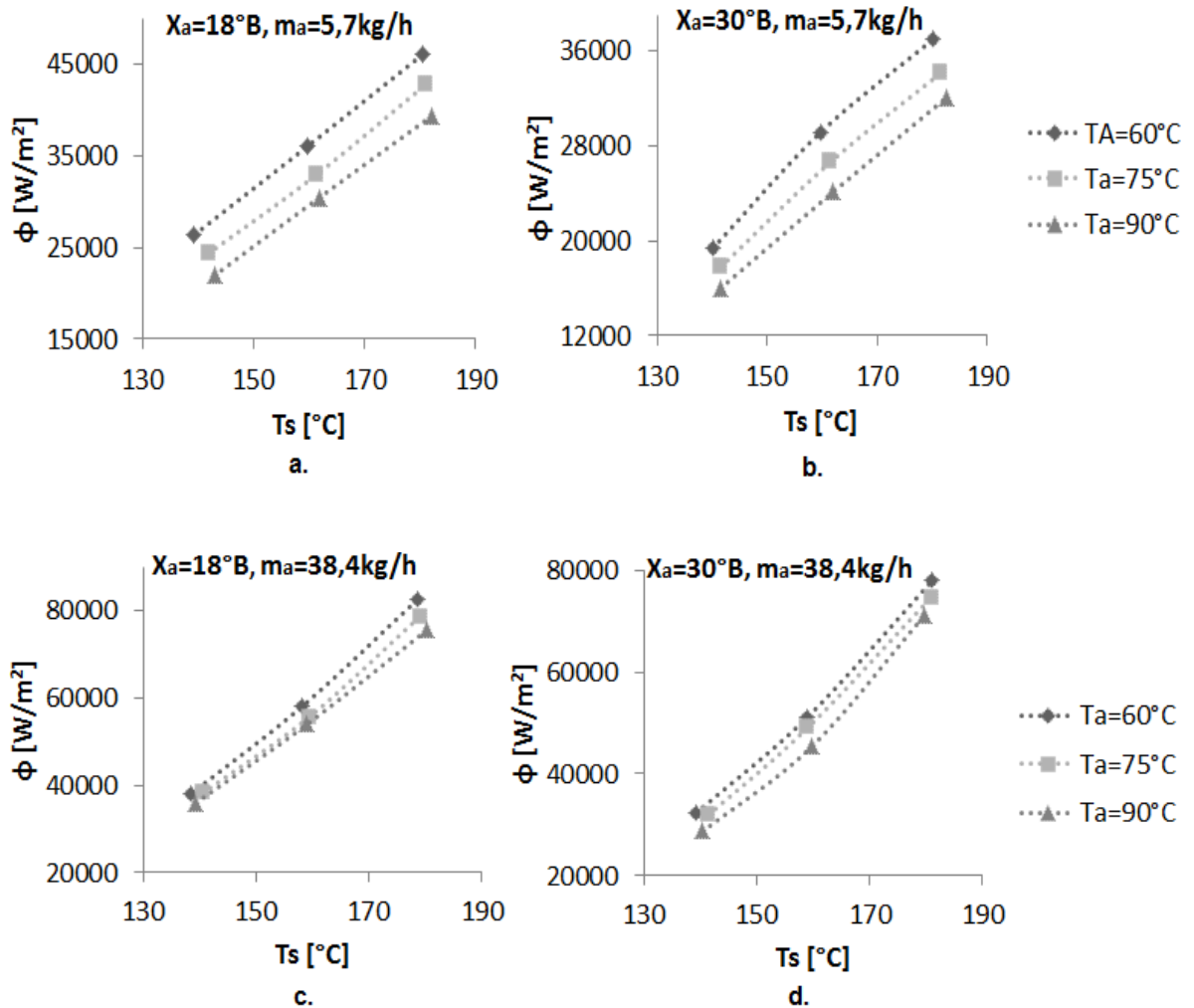
T_s ($^\circ\text{C}$)	T_a ($^\circ\text{C}$)	Q sensible (kJ/h)	Q latente (kJ/h)	Q (kJ/h)	ϕ (W/m^2)
$X_a=18^\circ\text{B}$, $m_a=5,7\text{kg}/\text{h}$					
139	60	221	3212	3433	26409
142	74	126	3036	3162	24323
143	90	30	2820	2849	21918
160	60	223	4460	4682	36018
161	75	120	4156	4276	32894
162	90	31	3923	3954	30413
181	60	235	5756	5991	46084
181	75	128	5441	5569	42837
182	91	27	5087	5114	39340
$X_a=18^\circ\text{B}$, $m_a=38,4\text{kg}/\text{h}$					
138	60	1414	3520	4934	37957
141	76	788	4181	4969	38220
139	90	226	4455	4680	36002
158	60	1430	6122	7552	58094
159	75	837	6398	7235	55656
159	91	198	6817	7015	53959
179	61	1390	9352	10742	82631
179	75	817	9414	10231	78699
180	91	175	9633	9808	75449

La magnitud del flujo de calor latente es varias veces superior que la del flujo de calor sensible. Esto indica que la mayor parte de la energía intercambiada se aprovecha en la evaporación del jugo [Nindoet *al.*, 2004].

2.4. ANÁLISIS DEL FLUJO DE CALOR REQUERIDO EN LA EVAPORACIÓN

La figura 7 representa el comportamiento del flujo de calor respecto a T_s y T_a , para a) $m_a=38,4\text{kg}/\text{h}$ y $X_a=18^\circ\text{B}$, b) $m_a=38,4\text{kg}/\text{h}$ y $X_a=30^\circ\text{B}$, c) $m_a=5,7\text{kg}/\text{h}$ y $X_a=18^\circ\text{B}$, d) $m_a=5,7\text{kg}/\text{h}$ y $X_a=30^\circ\text{B}$.

Figura 7. Variación del flujo de calor requerido en el proceso de evaporación



Cuando el flujo másico se incrementa se requiere mayor cantidad de flujo de calor para aumentar la temperatura en la interfaz superficie-fluido. Sin embargo, para una temperatura de la superficie constante y aumentando la temperatura del alimento, el flujo de calor disminuye debido a que el líquido ha sido previamente calentado lo que facilita la evaporación.

Al aumentar el flujo de calor, el coeficiente de transferencia de calor se incrementa debido a que ahí mayor energía suministrada al proceso de la evaporación del jugo de caña.

CONCLUSIONES

La evaporación de jugo de caña en el evaporador EPP, permite evidenciar (mediante la variación de h) que este tipo de equipo permite un mejor control del proceso, mediante los ajustes de temperatura de la superficie y alimento; es decir los gradientes de temperatura que controlan el proceso.

En el evaporador de placa plana, en la operación de concentración de jugo de caña, el coeficiente h es del orden de $140\text{W}/\text{m}^2\text{C}$ a $380\text{W}/\text{m}^2\text{C}$, mientras que en los equipos tradicionales tipo paila es más bajo ($11,2\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ a $150,5\text{W}/\text{m}^2\text{K}$, Tiwari *et al.*, 2003). Esto demuestra que el evaporador de placa plana permite un mejor aprovechamiento de la energía calórica.

Para concentrar el jugo de caña de azúcar, hasta 65°B , el evaporador de placa plana requiere un calentamiento en la placa correspondiente a 190°C y alimentar el jugo a 60°C . Estas condiciones garantizan elevado h , y por ende un excelente aprovechamiento térmico calor.

BIBLIOGRAFÍA

ADIB, T. A.; HEYD, B. and VASSEUR J. *Experimental results and modeling of boiling heat transfer coefficients in falling film evaporator usable for evaporator design*. Chemical Engineering and Processing vol. 48 (2009) pp. 961–968.

ADIB, T. A.; and VASSEUR, J. *Bibliographic analysis of predicting heat transfer coefficients in boiling for applications in designing liquid food evaporators*. Journal of Food Engineering vol. 87 (2008) pp.149–161.

AMOSUN, A.; GBABO, A. and WADA A. *Open Pan Sugar Processing Technology: An Option for Developing Countries*. Sugar tech (2000), vol. 2 (1&2) pp. 19 – 22.

ANWAR, S. *Fuel and energy saving in open pan furnace used in jaggery making through modified juice boiling/concentrating pans*. Energy Conversion and Management vol. 51 (2010) pp. 360–364.

BORRAY, G. R. *la agroindustria rural de la panela en Colombia roles, problemática y nuevos retos*. R. 2005.

CHEN H. and JEBSON R. *factors affecting heat transfer in falling film evaporators*. Food Technology Department, Massey University, Trans IChemE, Vol 75, Part C, June 1997.

Corporación colombiana de investigación agropecuaria (Corpoica). Disponible en: <http://www.corpoica.org.co/SitioWeb/Default.asp>. Fecha de consulta 12 de febrero de 2012.

Federación Nacional de Productores de Panela. Disponible en: <http://www.fedepanela.org.co/>. Fecha de consulta: 11 de abril de 2012.

GARCÍA B.;ALBARRACÍN L. C.; LATORRE, A.; SANTANA N.; INSUASTY O. *Guía tecnológica para el manejo integral del sistema productivo de caña panelera*. Colombia, 2007.

HERNÁNDEZ, R. *Determinación dinámica de los coeficientes globales de transferencia de calor para pailas aleteada, redonda, plana, Pirotubular y caldera enterrada (semicilíndrica) usadas en la industria panelera*. Trabajo de grado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga 2004.

NINDO, C. I.; TANG, J.; POWER, J. R. and BOLLAND K. *Energy consumption during refractance window evaporation of selected berry juices*. International Journal of Energy Research. Vol. 28 (2004).

L.M.M. Jorge, A.R. Righetto, P.A. Polli, O.A.A. Santos R. Maciel Filho. Simulation and analysis of a sugarcane juice evaporation system. Journal of Food Engineering vol. 99 (2010) pp. 351–359

MUJICA, M. V.; GUERRA, M. y SOTO N. *Efecto de la variedad, lavado de la caña y temperatura de punteo sobre la calidad de la panela granulada*. INCI vol. 33 n.8 Caracas ago. 2008.

SARDESHPANDE, V. R.; SHENDAGE D. J. and PILLAI, I. R. *Thermal performance evaluation of a four pan jaggery processing furnace for improvement in energy utilization*. Energy vol. 35 (2010) pp. 4740-4747.

TIWARI G.N.; KUMAR S.; PRAKASH Om. Study of heat and mass transfer from sugarcane juice for evaporation. Desalination 159 (2003) 8 I-96.

TSAY, Y. L. and LIN, T. F. Evaporation of a heated falling liquid film into a laminar gas stream. *Experimental Thermal and Fluid Science* 1995; vol. 11 pp. 61-71