

## OPTIMIZACIÓN DE LOS SUBLIMADORES DE AZUFRE USADOS EN LA INDUSTRIA FLORICULTORA COLOMBIANA MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA EN ANSYS/FLOTRAN CFD

Juan M. Caro, y José I. Huertas

Departamento de Ingeniería Mecánica - Universidad de los Andes  
Cra 1. No 18 A - 10 – Bogotá, Colombia. Tel: 3394949 Ext: 5303  
email: [jua-caro@uniandes.edu.co](mailto:jua-caro@uniandes.edu.co), [jhuertas@uniandes.edu.co](mailto:jhuertas@uniandes.edu.co)

**Palabras Clave:** Sublimación, evaporación, múltiples especies, análisis multifísico, CFD.

**Resumen.** *Los sublimadores de azufre son utilizados en la industria floricultora colombiana como un método de control del Oidio, el cual es considerado una de las plagas más fuertes que atacan los cultivos de rosas. Estudios previos han encontrado que la eficiencia térmica de los sublimadores comerciales es muy baja.*

*Trabajos experimentales y analíticos se han llevado a cabo para determinar la temperatura de operación y la geometría que maximizan la eficiencia térmica de los sublimadores de azufre y en general de cualquier dispositivo de evaporación a atmósfera abierta. Inicialmente se planteó un modelo analítico simplificado que concluye que la eficiencia térmica es máxima para una temperatura de trabajo cercana a la temperatura de ebullición y que es independiente de la geometría del sublimador. Sin embargo, resultados experimentales indican que la geometría del evaporador influye fuertemente sobre la eficiencia.*

*Por tanto, con el propósito de analizar el efecto de la geometría sobre la eficiencia térmica se hace necesario contar con un modelo más completo que tenga en cuenta todos los fenómenos involucrados. Dado que el proceso de evaporación a atmósfera abierta involucra los fenómenos de transferencia de masa y transferencia de calor de sistemas multi-compuestos se hizo necesario simular el proceso numéricamente. El software de simulación utilizado fue ANSYS/FLOTRAN CFD (Computational Fluid Dynamic). Los resultados obtenidos mediante la simulación numérica fueron validados experimentalmente. Posteriormente se simularon diferentes condiciones de operación y se encontró que la geometría óptima es una función de la sustancia, de la temperatura de trabajo y de la tasa de evaporación deseada.*

## 1 INTRODUCCIÓN

Las flores colombianas son conocidas en el mercado mundial por su calidad, colorido, tamaño y variedad. Según el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), la industria floricultora ocupa el primer lugar dentro los generadores de ganancias en exportaciones no tradicionales en Colombia, destacando a la rosa como la principal dentro de la variada gama de flores[1]. Sin embargo, los esfuerzos requeridos para satisfacer el mercado son grandes, y los cultivadores de rosas se tienen que enfrentar diariamente a enfermedades que atacan los cultivos bajo invernadero.

Dentro de estas enfermedades, *el Oidio* se considera como una de las más fuertes. Ataca las hojas y los capullos en forma de manchas blanquecinas, polvorientas, de olor mohoso y destruye totalmente la flor, la cual finalmente cae. La alternativa química de control más común es el uso de polvos de azufre. Estos se deben esparcir permanente y uniformemente sobre el cultivo. Para esto se utiliza un *sublimador de azufre* (nombre comercial), dentro del cual se vaporiza el azufre sólido mediante el uso de una resistencia eléctrica que transfiere calor al recipiente [2]. La figura 1 ilustra la disposición esquemática de un sublimador con forma cilíndrica que es la más común entre los sublimadores comerciales.

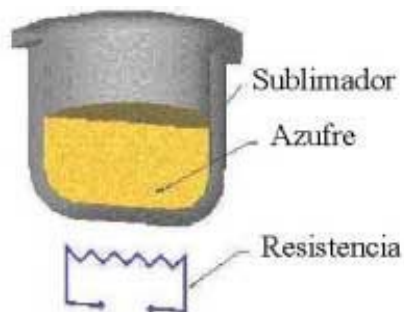


Figura 1: Sublimador de azufre [2]

### 1.1 Situación actual

Estudios previos en fincas floricultoras de la Sabana de Bogotá, realizados por la Universidad de los Andes permitieron determinar:

1) Un cultivo típico utiliza unos 150 a 200 evaporadores por hectárea, lo que corresponde a 8KW/hectárea. El uso de estos artefactos representa más del 50% del consumo energético total en los cultivos de rosas.

2) Los sublimadores actualmente utilizados son altamente ineficientes desde el punto de vista de manejo de energía. La eficiencia de los dispositivos se estima menor de 0.1%, sugiriendo deficiencias en su desarrollo tecnológico y calidad de fabricación [2].

En vista de la importancia económica de este método de control de plagas dentro de los costos operativos en la producción de rosas, se han venido desarrollando una serie de trabajos

que permiten comprender el fenómeno, proponer soluciones para optimizar los procesos de Sublimación y Evaporización (S&E) y contribuir al ahorro energético en las plantaciones de rosas.

## 1.2 Trabajos previos

La primera etapa del trabajo, inicia con el estudio de las generalidades de transferencia de masa y de calor de los procesos S&E y la experimentación con sublimadores comerciales y modelos construidos según las conclusiones inducidas por el análisis de las ecuaciones que gobiernan los fenómenos, con el objeto de determinar la calidad de estos artefactos desde el punto de vista de la eficiencia energética [2]. En la tabla 1 se indican las características de los sublimadores utilizados durante la fase experimental.

Los principales fenómenos que se analizaron, fueron:

- 1) Las pérdidas de energía por transferencia de calor por convección, que aumenta con el área de exposición a la atmósfera y el gradiente de temperaturas.
- 2) La tasa de transferencia de masa por difusión, que aumenta igualmente con el área de exposición a la atmósfera.

De éstas observaciones se concluye que el *área de exposición óptima* debe ser un balance entre un área grande para aumentar la tasa de transferencia de masa y un área mínima para reducir las pérdidas de calor [2]. Simultáneamente, la temperatura de operación aumenta tanto la tasa de transferencia de masa como las pérdidas de calor, lo cual sugiere que paralelo al área de exposición, debe existir una *temperatura óptima de operación*.

En conclusión, como la temperatura de la sustancia es una variable que se puede controlar mediante la variación del voltaje suministrado, es necesario investigar sobre el diseño de una geometría óptima que maximice la eficiencia térmica de los sublimadores teniendo en cuenta simultáneamente la variedad de fenómenos de transferencia de masa y calor.

Teniendo en cuenta diversos factores como tiempo y dinero, se considera necesario implementar métodos económicos más rápidos y manipulables que la práctica experimental, para realizar estudios de los procesos S&E en su fase característica. La simulación numérica, además de solucionar estos inconvenientes, ofrece la ventaja adicional de simular diferentes fenómenos físicos simultáneamente y realizar un análisis íntegro de los procesos. Es por este conjunto de ventajas, que se escogió ANSYS/FLOTRAN CFD (Versión 5.5), como el software de simulación adecuado para modelar el fenómeno de difusión debido a la interacción de especies, simultáneamente con un análisis térmico y un análisis de convección natural.

## 1.3 Nomenclatura

$A_E$  = Área de exposición

$C_S$  = Concentración molar del vapor en la superficie

$D_{AB}$  = Coeficiente de difusión entre A y B

$g$  = Aceleración gravitacional

$\bar{h}$  = Coeficiente de convección térmico

$\bar{h}_m$  = Coeficiente de convección másico

$k_f$  = Conductividad térmica

$L$  = Distancia, que para este caso es  $L = \frac{A_s}{Pe}$ , dónde  $A_s$  es el área de evaporación, y  $Pe$  el perímetro que encierra tal área.

$M_i$  = Peso molecular de la sustancia  $i$

$\dot{m}$  = Tasa de transferencia de masa

$P_{S(T_S)}$  = Presión de saturación de vapor de agua a la temperatura de operación

$P_{Am}$  = Presión atmosférica

$T_S$  = Temperatura de la sustancia

$T_\infty$  = Temperatura del medio

$V_y(r)$  = Velocidad vertical a una distancia  $r$

$Y_v$  = Porcentaje másico de vapor de agua

$Y_i(r)$  = Proporción másica a una distancia  $r$

$\alpha$  = Coeficiente de difusividad térmica

$\rho$  = Densidad de vapor saturado

## 2 MODELAJE COMPUTACIONAL

Hasta ahora se ha planteado en términos muy generales el fenómeno que se desea analizar. Durante el modelaje computacional se deben concretar éstas generalidades y de esta forma utilizar técnicas matemáticas de aproximación para resolver las ecuaciones de continuidad y conservación de energía teniendo en cuenta la multiplicidad de fenómenos, incluida la interacción de especies. Este tema se presenta en tres partes: 1. definición del problema, 2. simplificación geométrica y 3. condiciones de la simulación.

### 2.1 Definición del problema

Para facilitar el análisis, se decide trabajar con agua como la sustancia a evaporar teniendo en cuenta principalmente la posibilidad de encontrar en la literatura los valores de las diferentes propiedades de estado de esta sustancia. Además, partiendo de las consideraciones de optimización, se observa que la variable manipulable mediante el diseño es la geometría del evaporador, es decir áreas de exposición y de evaporación principalmente.

Con el fin de realizar el análisis geométrico, se debe considerar el estado estable del proceso y dejar abierta la posibilidad de alterar las variables geométricas para de esta forma observar su influencia. Aprovechando la existencia de la fase característica en los procesos S&E en donde la temperatura de operación y tasa de evaporación permanecen constantes, se decide utilizar éstas como las principales características del análisis, en donde:

1) La temperatura de operación se utiliza para describir el sistema o el estado inicial de la sustancia y corresponde a la temperatura de vapor saturado. De esta forma el proceso se analiza desde que la sustancia ya ha cambiado de estado y *se comporta como una capa horizontal de vapor de agua* [3] influenciada por el medio ambiente: aire, fuerza gravitacional, temperatura y presión atmosférica.

2) La tasa de evaporación se utiliza para describir la respuesta del sistema, de tal forma que considerando condiciones uniformes (material del evaporador, cantidad de sustancia en el recipiente, cantidad de resistencia, transferencia de calor, voltaje, corriente, etc.), se convierte en el indicador principal para evaluar la eficiencia del evaporador.

La figura 2 resume el esquema que define el problema que se desea analizar mediante la simulación numérica. Sus principales características son:

3) Área de evaporación con capa de vapor de agua a temperatura de saturación. Para el análisis de estado estable, se considera una fuente infinita.

4) Condiciones atmosféricas. Presión atmosférica y temperatura ambiente, aire y fuerza gravitacional.

5) Pared del evaporador adiabática.

6) Se ignoran los procesos previos al estado estable, la transferencia de calor desde la resistencia eléctrica, el fenómeno de cambio de estado de la sustancia, y las corrientes convectivas del aire.

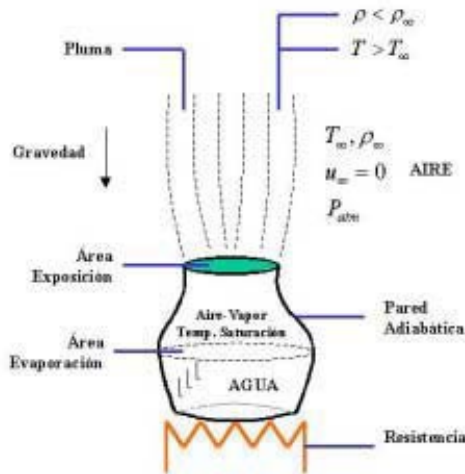


Figura 2: Esquema de la definición del problema para la simulación [7]

## 2.2 Simplificación geométrica

Inicialmente, se construyó un modelo bidimensional que representaba el corte transversal de la sección superior del evaporador. Las especies que interactúan son dos: aire y vapor. Por

lo tanto, la geometría se construyó desde donde se presentan éstas dos sustancias. Es decir, el modelo limitaba por la parte inferior con el área de evaporación. Sin embargo, la bidimensionalidad del corte no representaba la geometría real del proceso debido a que la profundidad del modelo podía ser variable. Para solucionar este inconveniente, se construyó un modelo con simetría axial y tridimensional [4]. En la literatura se encuentra el análisis de flujos axisimétricos tridimensionales como el que se muestra en la figura 3, en donde la línea AB gira alrededor del eje de simetría "z", conformando un sólido de revolución.

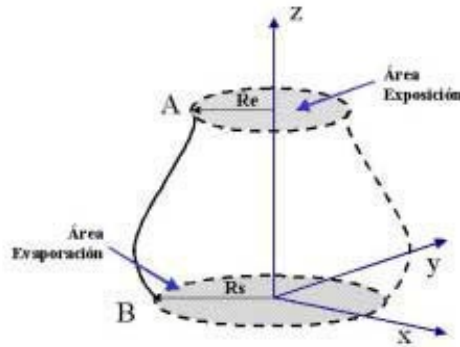


Figura 3: Giro de AB alrededor del eje de simetría [4]

### 2.3 Condiciones de la simulación

Una vez caracterizado el problema, se deben seleccionar los recursos necesarios que satisfagan los requerimientos. En éste caso particular, las principales dificultades para seleccionar el software de simulación fueron:

- 1) La interacción de múltiples especies.
- 2) El análisis de múltiples fenómenos físicos simultáneamente.
- 3) La consideración de la aceleración gravitacional.

Las condiciones de atmósfera abierta que se asumieron fueron: temperatura y presión atmosférica, composición de especies en un 100% de aire, aceleración gravitacional y ausencia de corrientes convectivas de aire.

Para definir la composición de especies en el área de evaporación se asume que la suma de las presiones parciales de cada sustancia debe ser la presión atmosférica. De esta forma se calcula la proporción másica de vapor según la ecuación 1, para obtener los resultados que se muestran en la figura 4, caracterizada por la forma exponencial de la curva: Porcentaje másico de vapor vs. Temperatura (°C).

$$Y_V = \frac{P_{S(T_S)} \times M_V}{P_{S(T_S)} \times M_V + (P_{Atm} - P_{S(T_S)}) \times M_A} \quad (1)$$

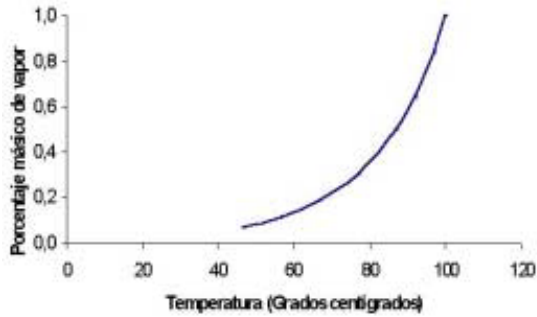


Figura 4: Porcentaje másico de vapor vs. Temperatura de operación

En la Figura 5 se indican las condiciones de frontera de los modelos desarrollados.

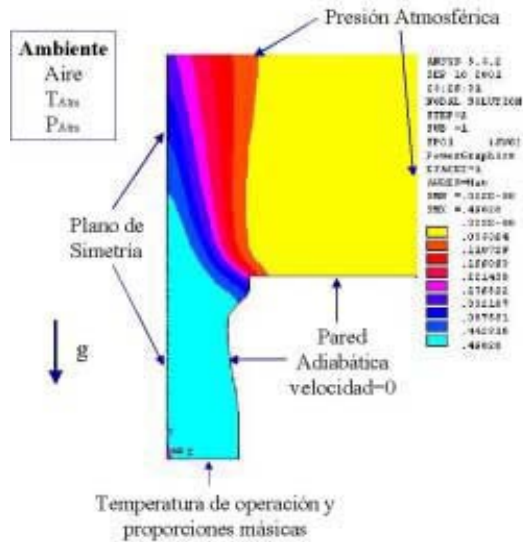


Figura 5: Condiciones de frontera [7]

Una vez implementadas todas las características del modelaje se puede realizar la simulación. Sin embargo, los resultados deben ser validados de alguna forma para poder realizar inferencias sobre la respuesta. En el siguiente tema se presenta la metodología utilizada para validar los resultados de la simulación de los modelos correspondientes a los evaporadores utilizados durante la fase experimental.

### 3 VALIDACIÓN DEL MODELO Y RESULTADOS

La metodología de validación empleada es la comparación con los cálculos del modelo analítico desarrollado según la teoría para convección natural. También se presentan los resultados de la experimentación realizada en paralelo a este trabajo. Los criterios más importantes para la validación son la forma de la respuesta con respecto a su distribución de temperaturas, perfiles de velocidad, el orden de magnitud de los diferentes resultados y las curvas características de operación. Este tema se presenta en tres partes: 1. Distribuciones y forma de la respuesta, 2. modelo analítico y resultados numéricos y 3. curvas características de operación.

#### 3.1 Distribuciones y forma de la respuesta

La teoría se refiere a la forma de pluma para las líneas de corriente del flujo en convección natural, como la forma de respuesta esperada ilustrada en la figura 2. Debido a que el interior de esta pluma está conformado principalmente por la sustancia de interés, se espera que las distribuciones de masa y temperatura, se concentren en el interior de esta pluma. La figura 6 muestra los resultados gráficos de la Simulación en Estado Estable (SEE) para las geometrías de plato (Izq.) y Jarrón (Der.) en donde se observa que tanto la distribución de masa (Izq.) y la distribución de temperaturas (Der.) desarrolla la forma de pluma. Su ancho va aumentando con la distancia desde el área de evaporación y se va disipando como resultado de los efectos viscosos y la reducción de la fuerza de flotación causada por el enfriamiento del fluido dentro de la pluma [3].

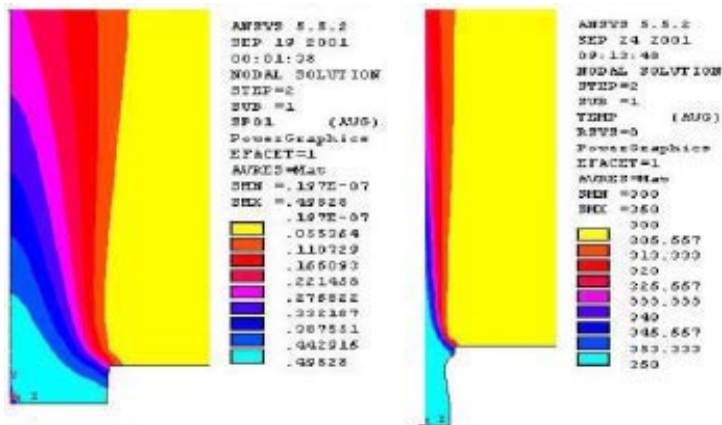


Figura 6: SEE con vapor de agua a 360K. Distribución másica del vapor en geometría con forma de plato (Izquierda). Distribución de temperaturas en geometría con forma de Jarrón (Derecha) [7]



Las geometrías axisimétricas que se muestran en la figura 7 presentan las líneas de corriente que conforman el flujo libre con similitud a la pluma descrita en la convección natural del vapor de agua: referencia bibliográfica (Izq.) [3] y simulación numérica (Der.)

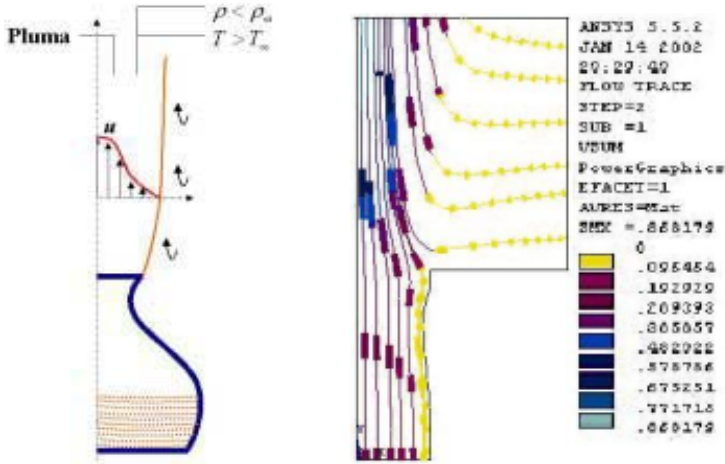


Figura 7: Líneas de corriente formando la pluma en convección libre .Característica empírica referida en la literatura [3] (Izq.). Simulación de la evaporación de agua a 360 K en la geometría de Jarrón (Der.) [7]

### 3.2 Modelo analítico y resultados numéricos

Las ecuaciones que describen la transferencia de momentum y energía en convección natural, se derivan a partir de los principios de conservación y de las ecuaciones de continuidad. El resultado se presenta en las siguientes ecuaciones para la transferencia de calor y de masa respectivamente:

$$\dot{q}_{conv} = \bar{h} \times A_E \times (T_S - T_\infty) \quad (3)$$

$$\dot{m} = \bar{h}_m \times A_E \times M \times (C_S - C_\infty) \quad (4)$$

Donde los coeficientes de convección térmico y másico, despreciando el efecto difusivo o de transferencia entre especies, son respectivamente [3]:

$$\bar{h} = 0.27 \frac{k_f}{L} \left( \frac{g \times \left( 1 - \frac{T_\infty}{T_S} \right) \times R_S^3}{8\alpha} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

$$\bar{h}_m = 0.27 D_{AB} \times e^{\frac{1}{3}} \left( \frac{g \times \left( 1 - \frac{T_\infty}{T_s} \right) \times R_s^3}{8\alpha} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (6)$$

La variable que se decidió utilizar para describir la respuesta del sistema fue la tasa de transferencia de masa calculada según la ecuación 7. Para determinar esta variable a partir de los resultados de la simulación se requiere conocer el perfil de velocidades del fluido y el de proporciones máxicas en el área de exposición.

$$\dot{m} = \int_A [\rho \times Y_v(r) \times V_y(r)] \cdot dA \quad (7)$$

Las comparaciones entre los resultados de la simulación con los experimentales y analíticos se resumen en la tabla 1 en donde se destaca la similitud en la forma y en el valor de los resultados analíticos y numéricos. Los resultados experimentales suministrados [5] presentan baja similitud. Sin embargo, teniendo en cuenta la variabilidad de los modelos en geometría, material, rugosidad de la superficie [6] y cantidad de resistencia eléctrica, se recomienda realizar nuevos experimentos con modelos homogéneos en donde se disminuyan las posibles fuentes de error.

Tipo	Característica del plato			$\dot{m}$ (gr/min) Exper.	$\dot{m}$ (gr/min) Analit.	$\dot{m}$ (gr/min) Simul.	
	Forma	Diá A <sub>S</sub> (cm)	Diá A <sub>E</sub> (cm)				Prof (cm)
A	Cilínd	4	4.2	6	3.5	2.62	2.82
B	Plato	8.1	8.2	1.4	5.2	15.86	11.19
C	Jarrón	5	4.5	6.1	4.4	3.56	2.96
D	Balde	3.6	5	5.2	3.6	3.43	2.64

Tabla 1: Resultados experimentales, analíticos y numéricos para la tasa de evaporación de vapor de agua a 360 K

### 3.3 Curvas características de operación

Las curvas características de operación, describen el comportamiento del proceso de evaporación en su fase estable. Se consideran dos tipos de curvas:

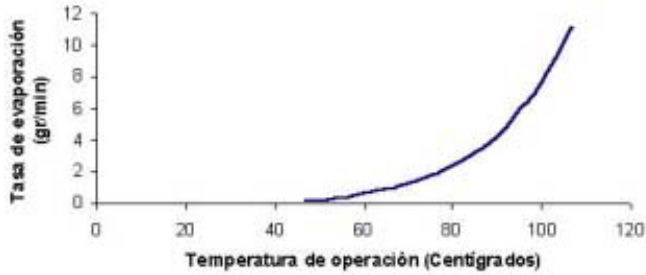


Figura 8: Tasa de evaporación vs. Temperatura de operación para la geometría Jarrón. Calculada según la ecuación 4.

En la primera, se selecciona una geometría del evaporador y se varía la temperatura de operación. De esta manera se observa cómo influye el estado de la sustancia sobre la tasa de transferencia de masa. Inicialmente se muestra en la Figura 8 el modelo analítico teniendo en cuenta únicamente el fenómeno de convección natural y luego se observa en la Figura 9 el resultado del análisis multifísico de la simulación numérica [7].

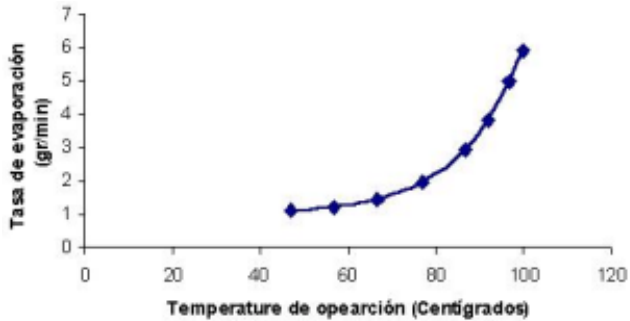


Figura 9: Tasa de evaporación (gr/min) vs. Temperatura (°C) para la geometría de Jarrón

La segunda es la más importante para los propósitos del presente trabajo. Se selecciona un estado o temperatura de operación de la sustancia y se mantiene constante el área de evaporación cambiando únicamente el área de exposición. De esta forma se construye la curva característica Tasa de evaporación vs. Relación de Área de exposición / Área de evaporación, con el fin de observar la influencia del cambio de esta característica sobre la respuesta del sistema en estado estable [7].

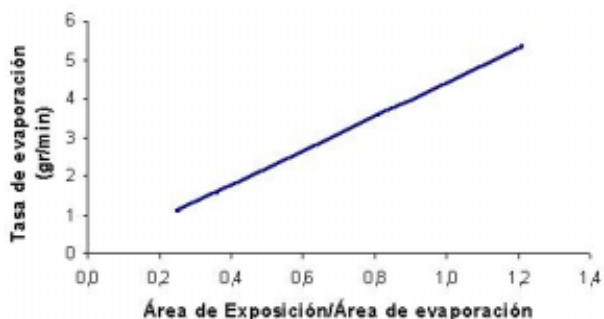


Figura 10: Tasa de evaporación vs. Relación de áreas. Calculada según la ecuación 4. Vapor de agua a 360K

La figura 10 ilustra los resultados a partir del modelo analítico. Sin embargo, el sentido común nos dice que esta relación debe tener una cota superior, ya que no puede aumentar indefinidamente la tasa de evaporación a medida que aumenta el área de exposición. La figura 11 muestra los resultados de la simulación numérica.

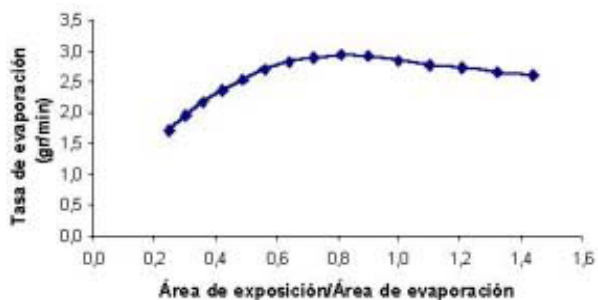


Figura 11. Tasa de transferencia de masa vs. Relación de áreas de Exposición y Evaporación ( $A_e/A_s$ ). Vapor de agua a 360 K [7].

Con el modelo numérico se observa que para una relación de áreas de 0.8 la curva presenta un máximo, lo cual se refleja en una más alta eficiencia para un consumo energético constante. Si es posible determinar una relación de áreas óptima, será posible diseñar modelos de evaporador con mejores eficiencias térmicas a partir de la manipulación geométrica.

La figura 12 ilustra la curva característica de interés construida para un modelo simplificado. Sin embargo para este caso se ha mantenido el área de evaporación de 5 cm usada en el modelo de la geometría jarrón y se ha cambiado la temperatura de operación a 340

K. Como se puede observar, la relación de áreas óptima que maximiza la tasa de evaporación es 0.9 [7].

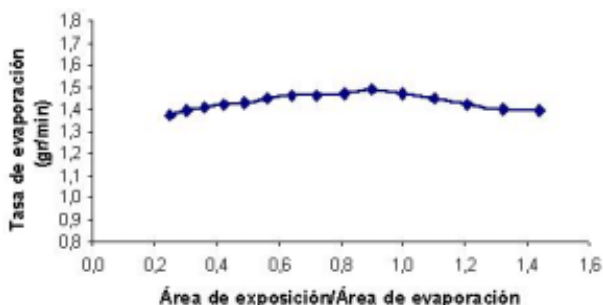


Figura 12. Tasa de transferencia de masa vs. Relación de áreas de Exposición y Evaporación ( $A_e/A_s$ ). Vapor de agua a 340 K y geometría simplificada [7].

Evidentemente, no hay una relación de áreas óptima generalizada. Sin embargo, es posible determinar para cada temperatura de operación y área de evaporación una relación de áreas óptima que defina la geometría del evaporador. En el desarrollo de un algoritmo de solución, utilizando el criterio geométrico de relación de áreas para la maximización de eficiencia térmica, se debe comenzar por definir la temperatura de operación y la tasa de transferencia de masa que se desean obtener. De éste modo se puede calcular una aproximación del área de evaporación a partir de cálculos analíticos. Finalmente el modelaje numérico permitiría determinar la relación de áreas óptima que minimice el gasto energético y por lo tanto maximice la eficiencia térmica [7].

#### 4 CONCLUSIONES

Con base a los análisis del modelo analítico para el fenómeno de convección natural de los procesos de Sublimación y Evaporación en estado estable y del modelaje numérico implementado en ANSYS/FLOTTRAN CFD, se puede concluir:

1) Los procesos de Sublimación y Evaporación son fenómenos multifísicos y se deben analizar integralmente. Durante la fase característica o periodo estable, cuando se alcanza la temperatura de operación, el fenómeno que gobierna principalmente el proceso es el de convección libre o natural, en donde las fuerzas de campo que generan el movimiento provienen de los gradientes de densidad. El fenómeno difusivo puede ignorarse para cálculos analíticos prácticos, pero es recomendable realizar el análisis integral.

2) La simplificación geométrica o de modelaje, permite la manipulación de variables en los procesos de optimización. Para los procesos de Sublimación y Evaporación, se observa una condición óptima de relación de Área de exposición / Área de evaporación, para la cual la

tasa de transferencia de masa es máxima. Sin embargo, esta relación es independiente para cada problema (Sustancia, Temperatura de operación, Área de evaporación, etc.) y se debe desarrollar un algoritmo robusto para un análisis generalizado.

## 5 REFERENCIAS

---

- [1] ASOCOLFLORES ([www.colombianflowers.com](http://www.colombianflowers.com))
- [2] Huertas J., Rodríguez J., "Rediseño de los sublimadores de azufre utilizados en los cultivos de rosas". Universidad de los Andes, Bogotá-Colombia. 2000.
- [3] Incropera F., and De Witt D., "Fundamentals of Heat and Mass Transfer" 4th Edition. Editorial John Wiley and Sons. New York 1996.
- [4] Shames I., "Mecánica de Fluidos" Tercera Edición. Editorial McGRAW-HILL Bogotá-Colombia. 1995.
- [5] López J., Huertas J., Determinación experimental de la geometría óptima de evaporadores expuestos a atmósfera abierta. Universidad de los Andes, Bogotá D.C. - Colombia 2002.
- [6] Passos J., Intensificacao dos processos evaporativos. Tecnologia da Refrigeracao. No. 10 pág. 31-34 2001
- [7] Caro J., Huertas J., Simulación numérica y análisis de los procesos de sublimación y evaporación a atmósfera abierta. Universidad de los Andes, Bogotá D.C. -Colombia 2002.