

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

José Ignacio Huertas*, Juan Manuel Caro*

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 menor al 0.1% y que el uso de estos sublimadores representa más del 50% de la energía eléctrica consumida en su producción. Estudios analíticos y experimentales se han llevado a cabo para determinar la temperatura de trabajo 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 en la eficiencia del sublimador.

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-fase y multi-especies se hizo necesario simular el proceso numéricamente. El software de simulación utilizado es 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.

PALABRAS CLAVE

- Sublimación, evaporación, • CFD (Computational Fluid Dynamic), • múltiples especies, • análisis multifísico.

1. INTRODUCCIÓN

Las flores colombianas son conocidas en el mercado mundial por su calidad, colorido, tamaño y variedad. Según el Departamento Ad-

ministrativo 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

* MSc. DSc., Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad de los Andes. jhuertas@uniandes.edu.co, Bogotá-Colombia.

** Estudiante de Ingeniería Mecánica. Universidad de los Andes, Bogotá-Colombia.

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 polvorosas de olor mohoso. La alternativa de control más común es el uso de polvos de azufre que se esparcen uniformemente sobre el cultivo utilizando un *sublimador de azufre* (nombre comercial con que se conocen estos dispositivos). Un sublimador de azufre es un recipiente dentro del cual se vaporiza el azufre sólido mediante la adición de calor proveniente de una resistencia eléctrica [2]. La figura 1 ilustra la disposición de un sublimador con forma cilíndrica que es la más común entre los sublimadores comerciales.

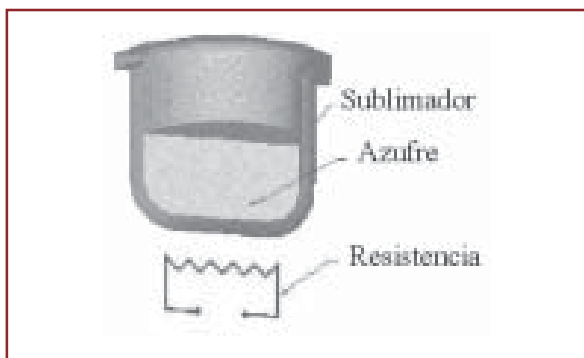


Figura 1. Disposición esquemática de un sublimador de azufre [2]

Estudios previos realizados por la Universidad de los Andes [2, 4] permitieron determinar:

- Un cultivo típico utiliza del orden de unos 150 a 200 sublimadores 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.
- Los sublimadores actualmente utilizados son altamente ineficientes desde el punto de vista energético (<0.1%) [2]. La eficiencia térmica del sublimador está definida por la ecuación 1

$$\eta = \frac{\dot{m} \times h_{fg}}{P_{elec}} \quad (1)$$

donde

- h Eficiencia térmica
- m Tasa de transferencia de masa
- h_{fg} Entalpía de evaporación. Propiedad de una sustancia y función de estado
- P_{elec} Energía eléctrica suministrada al sublimador

- Las ecuaciones 2 y 3 constituyen un modelo analítico que simula los fenómenos de transferencia de masa y calor por convección.

$$\dot{q}_{conv} = \bar{h} \times A_E \times (T_S - T_\infty) \quad (2)$$

$$\dot{m} = \bar{h}_m \times A_E \times M \times (C_S - C_\infty) \quad (3)$$

Donde

- h Coeficiente de convección térmico
- h_m coeficiente de convección másico
- A_e Área de exposición
- M Peso molecular de la sustancia
- C_s Concentración molar del vapor en la su perficie
- T_s Temperatura de la sustancia

Este modelo predice que la eficiencia térmica del sublimador aumenta con la temperatura hasta alcanzar la temperatura de ebullición y que esta es independiente del área de exposición.

- Los resultados experimentales obtenidos corroboran que la eficiencia térmica aumenta con la temperatura de trabajo. Sin embargo estos resultados experimentales también muestran que otros factores como el área de exposición afecta la eficiencia térmica de los sublimadores.

Estas observaciones inducen a pensar que existe un *área de exposición óptima* donde hay 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]. Sin embargo, para evaluar este aspecto se requiere de un modelo matemático más elaborado que incluya: fuerzas volumétricas (gravedad) y viscosas, múltiples especies, transferencia de masa por difusión y convección, transferencia de calor por conducción y convección. Típicamente estos modelos elaborados no poseen soluciones analíticas conocidas y se debe recurrir a soluciones numéricas.

En este trabajo se recurrió al software de simulación numérica ANSYS/FLOTAN CFD (Versión 5.5) para explorar el efecto del área de exposición en la eficiencia térmica de los sublimadores y evaporadores a atmósfera abierta.

2. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

Las figuras 2 y 3 muestran las condiciones de frontera y principales características del sistema a modelar mediante simulación numérica

- Se eligió como sustancia de trabajo agua por la disponibilidad de propiedades físico químicas y datos experimentales contra los cuales comparar.
- El sistema se analiza bajo condiciones de estado estable y flujo turbulento.
- Se consideran múltiples especies en interacción sin reacción química (agua-aire).
- Se incluye la gravedad.
- Se incluyen fenómenos multifísicos (transferencia de masa, calor y momentum).
- Modelos con simetría axial tridimensional como se ilustra en la figura 2.

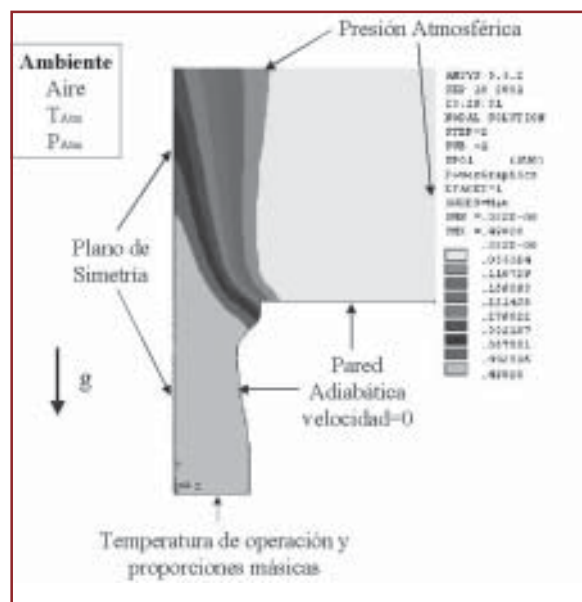
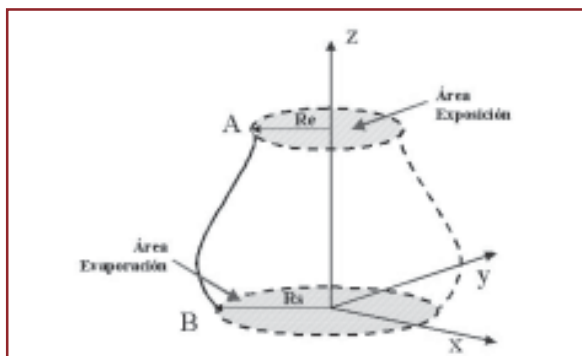


Figura 3. Esquema de la definición del problema para la simulación

- Área de evaporación como una fuente infinita de vapor a la temperatura de trabajo y presión parcial igual a la presión de saturación a la temperatura de trabajo. [3]
- Exteriores alejados del sublimador a condiciones estándar ($P=101$ KPa, $T=25^{\circ}\text{C}$, aire seco, ausencia de corrientes convectivas de aire.)
- Pared del evaporador bajo condiciones adiabáticas.

3. VALIDACIÓN DEL MODELO

La figura 4 muestra el resultado obtenido para la geometría de jarrón en donde se observa que la distribución de masa desarrolla la forma típica de una pluma de convección natural. Su ancho va aumentando con la distancia desde el área de evaporación y se va dissipando como resultado de los efectos viscosos y difusivos [3].

Figura 2. Geometría axisimétrica implementada para modelar numéricamente los fenómenos de transferencia de masa y calor que ocurren durante la sublimación y evaporación a atmósfera abierta.

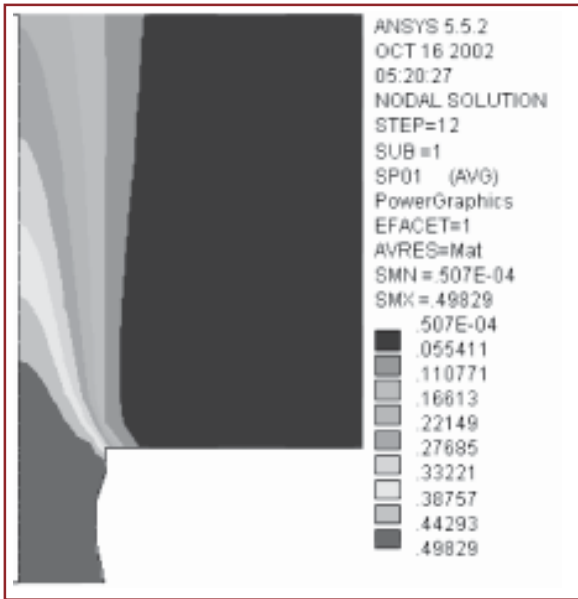


Figura 4. Simulación en estado estable con agua a 87°C. Distribución másica del vapor en geometría con forma de Jarrón (derecha).

La tasa de evaporación esta dada por siguiente ecuación

$$\dot{m} = \int_A [\rho \times Y_v(r) \times V_y(r)] \cdot dA \quad (4)$$

donde V_y es el perfil de velocidad vertical evaluada a la altura del área de exposición del sublimador.

La tabla 1 muestra los resultados obtenidos con la simulación numérica comparados con los datos experimentales y del modelo convectivo

Tabla 1. Resultados experimentales, analíticos y numéricos para la tasa de evaporación de vapor de agua a 87°C

Característica del sublimador			Rata de evaporación (gr/min)			
Forma	Diámetro (cm)		Prof (cm)	Exp	Conv	Simul
	Evap	Expo				
Cilindr	4.0	4.2	6	0.38	2.99	2.82
Plato	8.1	8.2	1.4	3.09	13.3	11.19
Jarrón	5.0	4.2	6.1	2.96	2.99	2.96
Balde	3.6	6.1	5.2	0.92	3.89	2.64

obtenidos en resultados previos [2,4]. Cualitativamente se observa concordancia entre los resultados experimentales y los provenientes de la simulación numérica. Las diferencias se deben a factores externos que influyen en los resultados experimentales, como la presencia de corrientes al interior del laboratorio, que no fueron tenidos en cuenta en la simulación numérica y el modelo convectivo.

4. RESULTADOS

La figura 5 muestra la rata de evaporación como función de la temperatura de trabajo para la geometría tipo Jarrón. Se observa que la rata de evaporación aumenta con la temperatura de trabajo hasta alcanzar la temperatura de ebullición. Se observa que el modelo convectivo y numérico discrepan cuantitativamente con los resultados experimentales. Esto es debido a las ineficiencias del sistema y a que los datos experimentales no fueron obtenidos a condiciones estándar. Los datos experimentales fueron obtenidos bajo las condiciones de Bogotá (2600 msnm y $T \sim 18^\circ\text{C}$).

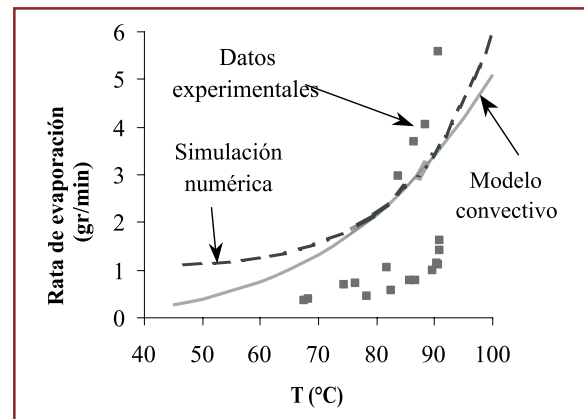


Figura 5. Rata de evaporación en función de la temperatura de trabajo para la geometría Jarrón.

Por otro lado la figura 6 muestra la rata de evaporación como función de la razón área de exposición a área de evaporación (A_e/A_s) para una temperatura de trabajo de 87°C. Se observa que el modelo convectivo simplificado predice un crecimiento constante con la relación de áreas, mientras que el modelo numérico

co predice la presencia de un máximo alrededor de $Ae/As = 0.8$. Este máximo es de $Ae/As = 0.9$ cuando la temperatura de trabajo es de 67°C . De lo anterior se puede concluir que la relación de áreas óptima de evaporación a atmósfera abierta depende de la temperatura de trabajo y de la sustancia de trabajo.

Actualmente se continua trabajando con el modelo de simulación numérica y resultados experimentales adicionales buscando encontrar una expresión generalizada que prediga la relación de áreas óptima. De esta forma se espera completar el algoritmo de diseño de los evaporadores a atmósfera abierta.

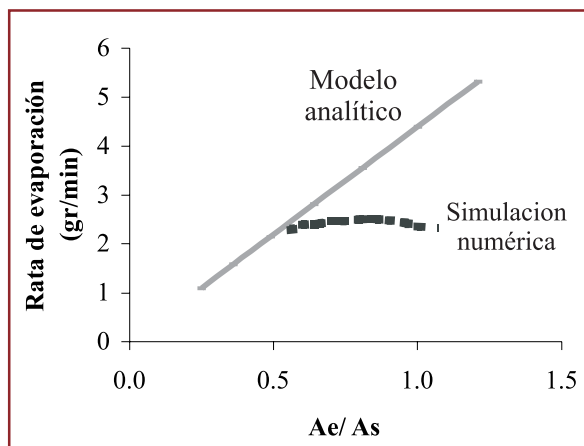


Figura 6. Rata de evaporación en función de la relación área de exposición a área de evaporación (Ae/As) para una temperatura de trabajo de 87°C .

CONCLUSIONES

Con el objeto de evaluar el efecto de la relación área de exposición a área de evaporación en la

eficiencia térmica de los evaporadores a atmósfera abierta se simuló numéricamente los fenómenos físicos en estado estable involucrados en este proceso. En el modelo se incluyeron las fuerzas volumétricas y viscosas. Se considero una geometría tridimensional para múltiples especies sin reacción química. Se incluyeron los fenómenos de transferencia de masa por difusión y convección y transferencia de calor por conducción y convección.

El modelo de simulación numérica fue validado cualitativamente comparando los resultados arrojados por el modelo contra resultados experimentales.

Se concluyó que efectivamente existe una relación de áreas óptima de evaporación a atmósfera abierta depende de la temperatura de trabajo y de la sustancia de trabajo.

REFERENCIAS

- 1 ASOCOLFLORES (www.colombianflowers.com)
- 2 Huertas, J. y Rodriguez, J. Optimization of sulfur sublimators used in the Colombian flower industry. Symposium on Thermodynamics and the Design, and Improvement of Energy Systems. International Mechanical Engineering Congress and Exposition. New York, USA. Noviembre 2001.
- 3 Incropera F., and De Witt D. «Fundamentals of Heat and Mass Transfer» 4th Edition. Editorial John Wiley and Sons. New York 1996.
- 4 López J. Huertas J. Determinación experimental de la geometría óptima de evaporadores expuestos a atmósfera abierta. Universidad de los Andes, Bogotá - Colombia 2002.