

MODELOS DE EVAPORACIÓN A ATMÓSFERA ABIERTA

FABRIZIO MORENO DIAZ

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ, 2003**

MODELOS DE EVAPORACIÓN A ATMÓSFERA ABIERTA

FABRIZIO MORENO DIAZ

**Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de
Ingeniero Mecánico**

ASESOR

JOSÉ IGNACIO HUERTAS ME, MSc, DSc.

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ, 2003**

Bogotá D.C. Enero de 2003

Doctor

ALVARO PINILLA

Director Departamento de Ingeniería Mecánica

Ciudad

Apreciado Doctor:

Someto a su consideración el proyecto de grado titulado MODELOS DE EVAPORACIÓN A ATMÓSFERA ABIERTA, que tiene por finalidad *la aplicación de modelos para encontrar las condiciones optimas de trabajo del proceso de evaporación a atmósfera abierta.*

Considero que este proyecto cumple con sus objetivos y lo presento como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Cordialmente,

FABRIZIO MORENO DIAZ

199714410

Bogotá D.C. Enero de 2003

Doctor

ALVARO PINILLA

Director Departamento de Ingeniería Mecánica

Ciudad

Apreciado Doctor:

Someto a su consideración el proyecto de grado titulado MODELOS DE EVAPORACIÓN A ATMÓSFERA ABIERTA, que tiene por finalidad *la aplicación de modelos para encontrar las condiciones optimas de trabajo del proceso de evaporación a atmósfera abierta.*

Certifico como asesor que el proyecto de grado cumple con los objetivos propuestos y que por lo tanto califica como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Mecánico.

Cordialmente,

José Ignacio Huertas ME, MSc, DSc.

Profesor Asesor

*A mis padres, Francisco y Ana;
a mi hermano Francisco Javier;
y a mi guía de siempre, Dios.*

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a José Ignacio Huertas, director de la investigación, por su ayuda en los meses que duro el proyecto. Su visión y sus aportes fueron fundamentales para poder llegar a este documento. Para el profesor Huertas mis más sinceros agradecimientos acompañados de mi respeto y admiración.

También quisiera agradecer a Juan Manuel Caro Medina, por su valiosa colaboración en el desarrollo y mejoramiento del modelo numérico.

Por ultimo quisiera agradecer a todas las personas que hicieron esto posible: a toda mi familia, a mis amigos: Gustavo, Yenni, Alejandra e Ivan, quines siempre estuvieron conmigo. A todos simplemente Gracias.

TABLA DE CONTENIDO

Pág.

<u>1. GENERALIDADES Y ANTECEDENTES</u>	<u>1</u>
1.1 IMPORTANCIA.	1
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO Y LIMITACIÓN DEL PROBLEMA.	2
1.3 TRABAJOS PREVIOS.	3
1.3.1 Temperatura de trabajo y tasa de evaporación.	5
1.3.2 Eficiencia térmica del evaporador.	6
1.3.3 Consideraciones de optimización	7
1.4 OBJETIVOS	8
<u>2. MODELOS MATEMATICOS</u>	<u>9</u>
2.1 MECANISMO DIFUSIVO	9
2.2 MODELO CONVECTIVO	12
2.2.1 Ecuaciones que caracterizan el fenómeno de convección natural	13
2.3 MECANISMO DE TRANSPORTE CON CAMBIO DE FASE	14
2.3.1 Ebullición de líquido saturado	15
2.3.2 Parámetros importantes de la ebullición nucleada	16
2.4 CONCLUSIONES DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS	18
2.4.1 Comparación de los modelos con los datos experimentales	19
<u>3. MODELO NUMÉRICO</u>	<u>21</u>
3.1 GENERALIDADES DE LA SIMULACIÓN	22
3.1.1 Consideraciones del problema de simulación	22
3.1.2 Simplificación Geométrica	23

3.1.3	Condiciones de la simulación	24
3.1.4	Condiciones de frontera	25
3.2	VALIDACIÓN DEL MODELO NUMERICO	27
3.2.1	Distribuciones y forma de la respuesta	27
3.2.2	Orden de magnitud de la respuesta	29
3.3	RESULTADOS DEL MODELO NUMERICO.	30
3.3.1	Temperatura de trabajo y presión atmosférica.	31
3.3.2	Geometría del evaporador.	33
3.4	CONSIDERACIONES FÍSICAS DE LOS RESULTADOS.	37
3.5	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS.	40
3.5.1	Análisis de la altura, el diámetro de evaporación y el diámetro de exposición.	40
3.5.2	Análisis de la altura y la relación de áreas.	41
3.5.3	Superficie de respuesta	41
3.6	CONCLUSIONES DEL MODELO NUMÉRICO	42
4.	<u>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</u>	43
	<u>REFERENCIAS</u>	65

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Características de los Sublimadores de Azufre [5].	4
Tabla 2. Calculo de las propiedades del vapor de agua y el aire, como parámetros de simulación.	22
Tabla 3. Resumen de las características de variabilidad para los parámetros geométricos.	36

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Plantaciones de flores bajo invernadero en la sabana de Bogotá [1].	1
Figura 2. Esquema de un Sublimador de Azufre típico y descripción de los procesos de evaporación.	2
Figura 3. Diagrama del balance de energía para un sublimador	7
Figura 4. Diagrama de transferencia de masa por mecanismo difusivo.	10
Figura 5. Evolución de la tasa de evaporación (izq.) y curva de eficiencia térmica (5) (der.) para el mecanismo de transferencia difusivo.	11
Figura 6. Comportamiento de la tasa de evaporación (7) (izq.) y Evolución de la eficiencia térmica (8) (der.) para el mecanismo de transferencia convectivo.	14
Figura 7. Curva típica de ebullición para agua saturada a 1 atmósfera de presión.	16
Figura 8. Comparación de los mecanismos de difusión y convección por la tasa de evaporación (izq.) y por eficiencia térmica (der.).	18
Figura 9. Curva de la tasa de evaporación del mecanismo convectivo y datos experimentales para la geometría de Jarrón con un convectivo ajustado de exponente igual a 0.25.	19
Figura 10. Curva de la tasa de evaporación del mecanismo convectivo y datos experimentales para la geometría de Balde con un convectivo ajustado de exponente igual a 0.27.	20
Figura 11. Esquema de la descripción del problema para la simulación numérica.	23
Figura 12. Proceso de simplificación de la geometría del evaporador. Esquema de evaporador inicial (Izq.). Esquema de la geométrica para la simulación numérica (Der.).	24
Figura 13. Condiciones de frontera dispuestas sobre la geometría de balde.	26
Figura 14. Dirección del flujo de convección libre en un medio extenso en reposo y formación de la pluma en una sustancia evaporándose [7].	28

	Pág.
Figura 15. Distribución de la fracción másica de vapor de agua en la geometría con forma de Jarrón (Izq.). Distribución de temperaturas en la geometría con forma de Balde (Der.). Tomadas a una temperatura de trabajo de 90°C.	28
Figura 16. Resultados de la simulación para la geometría de forma de Balde en el área de evaporación a 90°C. Perfil de fracciones másicas (Izq.) y perfil de velocidades (Der.)	29
Figura 17. Comparación entre los resultados de la simulación con los experimentales y analíticos, para las geometrías de forma de Balde (Izq.) y Jarrón (Der.)	30
Figura 18. Cambio de la Tasa de Evaporación por la Temperatura de Trabajo para una Altura =5,2cm y un diámetro de evaporación =5cm.	31
Figura 19. Cambio de la Tasa de Evaporación por la presión atmosférica. Curva de Temperatura de Trabajo geometría Balde (Izq.). Curva de Relación de Áreas, altura =5,2cm y diámetro de evaporación =5cm (Der.).	32
Figura 20. Geometría simplificada utilizada para el diseño experimental computacional. Geometría tipo Balde, $A_{exp}/A_{evap} = 1.96$ (Izq.) y geometría tipo Cono Truncado, $A_{exp}/A_{evap} = 0.49$ (Der.).	34
Figura 21. Curva Tasa de Evaporación versus Relación de Áreas. Diámetro Evaporación =5cm, Altura =5.2cm. Vapor de agua a 90°C.	34
Figura 22. Tasa de Transferencia de Masa por área de evaporación versus Relación de Áreas. Altura =5.2cm.(Izq.) y Altura =6.4cm (Der.).	35
Figura 23. Influencia del área de evaporación en la tasa de transferencia de masa. Diámetro de Exposición =3.5_cm. Varias alturas	36
Figura 24. Influencia de la altura en la tasa de evaporación. Diámetro de exposición =3.5_cm.	36
Figura 25. Tasa de Evaporación versus Altura para diferentes relaciones de área. Vapor de agua a 90°C.	37
Figura 26. Diagrama del cambio de relación de áreas y líneas de corriente. Diámetro de exposición variable (Izq.). Diámetro de evaporación para los puntos simulados: 3.6_cm , 5.0_cm y 6.4_cm (Der.).	38
Figura 27. Diagrama de cambio de la altura. $A_{exp}/A_{evap} = 0.49$ (Izq.) y $A_{exp}/A_{evap} = 1.69$. (Der.).	39

Figura 28. Angulo de la pared del evaporador versus Altura, para diferentes relaciones de área.	39
Figura 29. Superficie de respuesta para los factores Altura y Relación de Áreas	42
Figura 30. Superficie de respuesta para los factores área de evaporación y área de exposición.	42

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
Anexo A. Desarrollo del modelo analítico.	45
Anexo B. Tutorial simplificado para la simulación del proceso de evaporación de agua en estado estable a condiciones atmosféricas de Bogota.	53
Anexo C. Datos obtenidos por simulación numérica para la evaporación de agua.	59
Anexo D. Tablas y resultados del análisis estadístico.	62

RESUMEN

Los sublimadores de azufre (nombre comercial) o evaporadores 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 bajo invernadero. 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 la producción de rosas.

Estudios analíticos, experimentales y numéricos se han llevado a cabo para determinar las condiciones de operación y la geometría que maximizan la eficiencia térmica de los sublimadores y en general de cualquier dispositivo de evaporación a atmósfera abierta. Inicialmente se encontró por medio de un modelo analítico simplificado 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 sobre la eficiencia .

Por lo tanto, con el propósito de analizar los procesos de evaporación a atmósfera abierta, inicialmente se estudiaron los modelos matemáticos que rigen estos fenómenos. De la aplicación de los modelos de evaporación se encontró que el mecanismo de transferencia difusivo es importante cuando se manejan bajos gradientes de temperatura, mientras que a temperaturas cercanas a la de ebullición es explicado por la convección libre y tiempo después de que la ebullición se ha llevado a cabo es regido por la ebullición nucleada. Sin embargo estos modelos no permiten el análisis de la totalidad de los fenómenos involucrados, ni de la geometría del recipiente.

Consecuentemente, se hace necesario contar con un modelo más completo que tenga en cuenta todos los fenómenos involucrados y la geometría del evaporador. Dado que el proceso de evaporación a atmósfera abierta involucra los fenómenos de transferencia de masa y 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 analíticamente y experimentalmente. Posteriormente se simularon diferentes configuraciones geométricas para condiciones de experimentación constantes y se encontró que la geometría optima se encuentra para una relación entre el área de exposición y área de evaporación igual 0.49 y para una altura entre 0.06m y 0.08m.

1. GENERALIDADES Y ANTECEDENTES

1.1 IMPORTANCIA.

Las flores colombianas ocupan un lugar destacado dentro de las preferencias de los exigentes consumidores internacionales por su alta calidad, colorido y belleza. En el año 2001, la exportación de flores colombianas representaron \$US 610.3 millones lo que muestra un aumento del 4.9% respecto al registrado en el año anterior, siendo las rosas el principal producto de exportación con el 30 % del total de flores exportadas [1]. Los cultivos ocupan aproximadamente 5000 hectáreas y generan más de 130.000 empleos directos e indirectos. La Figura 1 muestra uno de estos cultivos.



Figura 1.

Plantaciones de flores bajo invernadero en la sabana de Bogotá [1].

Sin embargo, el trabajo necesario para cumplir con calidad la demanda del mercado es alto, y la industria de rosas colombiana tiene la necesidad de enfrentarse permanentemente a las enfermedades que atacan los cultivos de rosas bajo invernadero, tales como: El oidio, Mildiu, Roya, Antracnosis, entre otras. Dentro de estas enfermedades, el Oidio se considera como la más perjudicial y común. Este hongo (*Sphaerotheca Pannosa*) ataca las hojas, brotes y capullos en forma de manchas blanquecinas polvorientas de olor mohoso produciendo la caída de las hojas y haciendo que la rosa al abrirse quede raquílica [2]. La alternativa química de control más común es el uso de polvos de azufre, los cuales deben esparcirse permanente y uniformemente sobre el

cultivo. La aplicación de azufre se hace por medio de un evaporador de azufre o *sublimador de azufre* (nombre comercial), el cual es un elemento de evaporación industrial a atmósfera abierta.

Análisis anteriores realizados por la Universidad de los Andes [3] en fincas de cultivadores de rosas de la sabana de Bogota permitió precisar que los sublimadores utilizados son altamente ineficientes desde el punto de vista de uso de la energía. La eficiencia térmica de estos dispositivos se estima menor al 0.1%, sugiriendo deficiencias en su desarrollo tecnológico y calidad de fabricación.

Un cultivo típico utiliza del orden de unos 150 a 200 evaporadores por hectárea, lo que corresponde a 8 kw/hectárea, representando su servicio más del 50% del consumo energético global del cultivo de rosas. Por lo tanto, el desarrollo de un dispositivo de evaporación más eficiente desde la perspectiva de uso racional de la energía producirá un ahorro sustancial en los costos de operación de los cultivos.

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO Y LIMITACIÓN DEL PROBLEMA.

Un sublimador de azufre consta simplemente de un recipiente al cual se le suministra calor por medio de una resistencia eléctrica, la figura 2 ilustra la composición esquemática de un sublimador de azufre de forma cilíndrica (forma más común entre los sublimadores comerciales), dentro de este se calienta el azufre sólido hasta llegar a la temperatura que permita su evaporación. Posteriormente el azufre es vaporizado y transferido a la atmósfera abierta a presión atmosférica. Las corrientes convectivas generadas dentro del invernadero lo arrastran y depositan dentro de las flores formando una película protectora. Los procesos que se llevan a cabo para que esto suceda satisfactoriamente son: convección forzada entre el aire y el azufre en el área de exposición, convección natural y difusión entre el azufre en fase gaseosa en el área de evaporación y cambio de fase del azufre en estado líquido. La figura 2 indica tales procesos.

El objeto de estudio de la presente investigación es la región delimitada entre el área de exposición y el área de evaporación, para este caso la tasa de evaporación es controlada por al rata a la cual la masa es transferida a la atmósfera y no a la tasa a la cual el calor es suministrado, permitiendo analizar el fenómeno con el estudio de los mecanismos de transferencia de calor y masa, presentes en esta región.

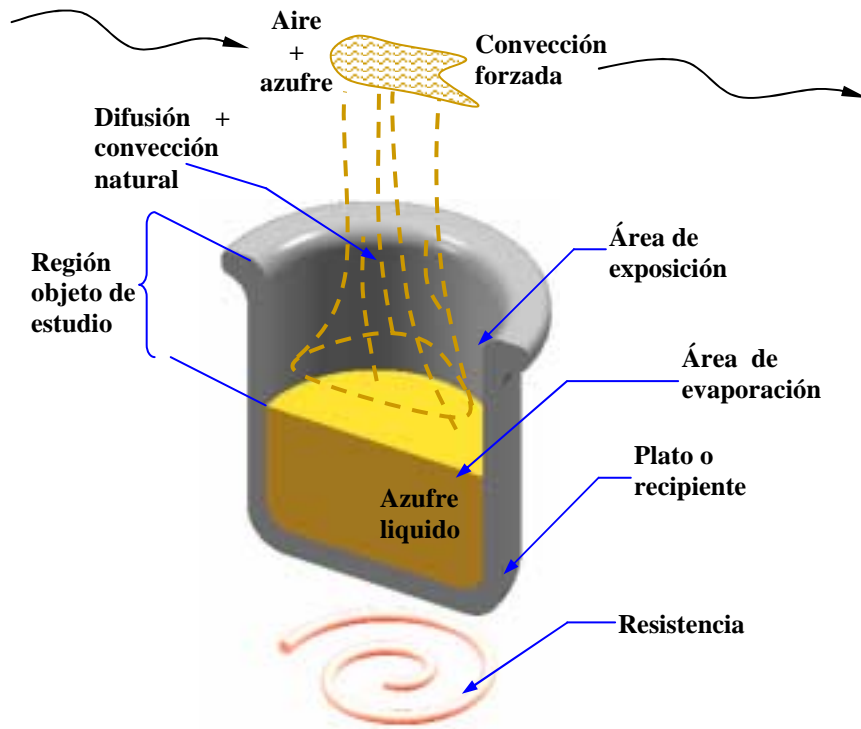


Figura 2.

Esquema de un Sublimador de Azufre típico y descripción de los procesos de evaporación.

1.3 TRABAJOS PREVIOS.

En vista de la importancia económica de este método de control de plagas dentro de los costos operativos en la producción de rosas, se ha venido desarrollando una serie de trabajos [4, 5, 6] que permiten comprender el fenómeno, proponer soluciones para optimizar los procesos de evaporización y contribuir al ahorro energético en las plantaciones de rosas.

El primero de estos trabajos [5], inicia con el estudio de las generalidades de los procesos evaporación y la experimentación con azufre en los sublimadores comerciales Ampex (Cilíndrico-Cerámico) y TW Terwengel (Plato) y los modelos construidos en la Universidad de los Andes de forma de jarrón y de balde ambos de aluminio, estos últimos fabricados según las conclusiones inducidas por la síntesis analítica de las ecuaciones que gobiernan los fenómenos. Este trabajo tuvo como objeto determinar la calidad de estos aparatos cuantificando su eficiencia energética. En la tabla 1 se muestra las características de la totalidad de sublimadores utilizados durante esta fase

experimental. Se observa que los modelos utilizados varían tanto en geometría, como en material, rugosidad de la superficie y cantidad de la resistencia eléctrica utilizada.

Tabla 1.
Características de los Sublimadores de Azufre [5]

Marca	Característica del plato						Resistencia (Ω)
	Forma Geométrica	Diámetro Área Evap. (cm)	Diámetro Área Exp. (cm)	Profundidad (cm)	Material	Superficie	
Ampex Manco ref: AJ-110	Cilíndrico	4.0	4.2	6.0	Cerámico	Lisa	948
Tw Tervergel	Plato	8.1	8.2	1.4	Aluminio	Rugosa	275
Uniandes	Jarrón	4.2	4.5	6.1	Aluminio	Lisa	200
Uniandes	Balde	3.6	6.1	5.2	Aluminio	Lisa	200

Las conclusiones extraídas de la experimentación y el modelo analítico difusivo para este trabajo, fueron [5]:

- Las pérdidas de energía por transferencia de calor por convección, aumentan con el área de exposición a la atmósfera y el gradiente de temperaturas; y la tasa de transferencia de masa por difusión, aumenta igualmente con el área de exposición a la atmósfera.

Un segundo trabajo [6] busco obtener experimentalmente usando como sustancia de trabajo agua, la relación área de exposición / área de evaporación, que maximiza la eficiencia de los evaporadores a atmósfera abierta como función de la temperatura y una ecuación adimensional del modelo difusivo que se pueda generalizar a cualquier sustancia. Para el tratamiento de los datos experimentales se utilizó como herramienta un programa estadístico y de los resultados obtenidos se pudo concluir que la eficiencia de los evaporadores no esta muy ligada a la geometría, pero aunque no fue la variable de interés se observo que si dependía del tipo de material y de otro tipo de variables como disposición de resistencia y conversión de energía eléctrica en calor.

El ultimo trabajo referenciado [4] es la simulación numérica de los procesos de evaporación a atmósfera abierta, en donde el objetivo fue determinar la geometría optima por medio de un modelaje computacional, teniendo en cuenta la multiplicidad de fenómenos involucrados en el proceso de evaporación. Los resultados obtenidos muestran una condición optima de relación Área de exposición / Área de evaporación para la cual la transferencia de masa es máxima, sin embargo, esta relación es independiente para cada problema (sustancia, temperatura de operación, área de evaporación etc). En este trabajo la simulación se realizo a condiciones estándar y por lo tanto los valores numéricos logrados no se pudieron comparar directamente con los datos experimentales obtenidos a las condiciones de Bogotá. El modelo analítico tomado en este análisis fue el de convección libre.

A continuación se presenta una síntesis de los aspectos más importantes del trabajo previo que sirvieron como base para la realización de este trabajo de investigación.

1.3.1 Temperatura de trabajo y tasa de evaporación.

En la referencia [5] se aplico una serie de experimentos en los cuáles se estableció curvas de temperatura en el tiempo, en donde en su fase inicial hay un incremento de la temperatura a diferentes tasas según el voltaje suministrado, que le permite al azufre pasar del estado sólido al líquido. Enseguida el proceso entra en una fase estable en donde la *temperatura de trabajo (ó temperatura de operación¹) se mantiene constante*, toda la energía suministrada en esta fase estable se consume en la evaporación de la sustancia.

Otra variable obtenida de la experimentación [5] fue la tasa de evaporación que corresponde a la masa de sustancia que es evaporada en función del tiempo. Durante la experimentación realizada, se pesó la masa a intervalos de tiempo definidos y se graficó el porcentaje del peso de azufre evaporado versus el tiempo, esta grafica se caracteriza por tener una fase inicial no uniforme y una fase característica, en esta ultima la pendiente de la curva permanece negativa y constante, es decir, existe una *tasa de evaporación constante* [5].

¹ A lo largo del documento se utilizaran indistintamente los términos temperatura de trabajo o temperatura de operación para indicar la temperatura al la cual opera el evaporador a un voltaje determinado.

1.3.2 Eficiencia térmica del evaporador.

La eficiencia térmica del sublimador en estado estable esta definida por la ecuación (1), que es la razón entre la energía de evaporización y la necesaria para producir dicho fenómeno.

$$\eta = \frac{\dot{m}h_{fg}}{P_e} \quad (1)$$

Donde

$\eta =$ Eficiencia térmica

$\dot{m} =$ Tasa de transferencia de masa (tasa de evaporación)

$h_{fg} =$ Entalpía de evaporación. Propiedad de una sustancia y función de estado (T y p)

$P_e = V \times I \times f =$ Potencia eléctrica suministrada al sublimador donde V es voltaje suministrado, I corriente y f factor de potencia.

Inicialmente podría pensarse que la eficiencia térmica, para condiciones experimentales homogéneas con respecto a material del sublimador y resistencia eléctrica, depende básicamente del estado de la sustancia (T y p) y de la tasa de evaporación. Sin embargo, la potencia eléctrica requerida puede verse afectada por las condiciones mismas de la transferencia de calor y masa [4].

Para determinar la potencia eléctrica se realizó un balance de energía al volumen de control descrito en la figura 3, de este análisis se tiene que la potencia eléctrica suministrada al evaporador debe ser igual a un calor de pérdidas mas un calor latente derivado del cambio de fase; este calor de pérdidas es debido a las pérdidas de calor por conducción y por convección, cada uno de estos se puede despreciar o no, dependiendo de la naturaleza del estudio. Las ecuaciones que se derivan de este análisis son las siguientes:

$$P_e = \dot{m}h_{fg} + q_p \quad \wedge \quad q_p = q_{cond} + q_{conv} \quad (2)$$

Donde

$q_p =$ Calor de pérdidas.

$q_{cond} =$ Calor perdido por conducción.

$q_{conv} =$ Calor perdido por convección.

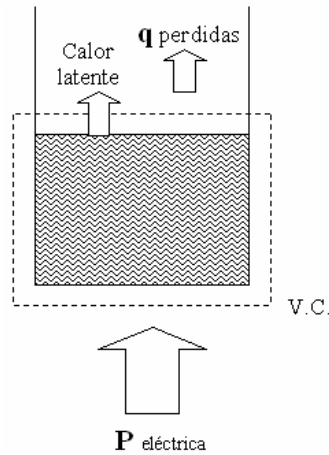


Figura 3

Diagrama del balance de energía para un sublimador.

1.3.3 Consideraciones de optimización

Como se indicó anteriormente, la tasa evaporación aumenta proporcionalmente con el área de exposición al igual que las pérdidas de energía. De esta observación se concluye que el *área de exposición óptima* debe ser un balance entre un área grande para aumentar la tasa de evaporación y un área mínima para reducir las pérdidas de calor [4]. Adicionalmente, la temperatura de operación aumenta exponencialmente la tasa de evaporación encontrando su máximo a la temperatura de ebullición. Es de anotar que las pérdidas de calor también son proporcionales a la temperatura de trabajo, sin embargo, las curvas de eficiencia encontradas sugieren que estas pérdidas no son tan significantes en comparación al aumento en la tasa de evaporación, lo cual indica una *temperatura de operación óptima* igual a la temperatura de ebullición de la sustancia.

En conclusión, como la temperatura de operación es una variable función de la presión a la que se evapora la sustancia y 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.

1.4 OBJETIVOS

A partir del escenario anterior se establece el objetivo principal del presente trabajo de investigación cuyo fin es el de *aplicar modelos existentes al proceso de evaporación a atmósfera abierta, a través de la caracterización analítica y simulación numérica, de los mecanismo de transporte de calor y de masa presentes en el fenómeno, que permitan determinar las condiciones de operación que minimicen el consumo energético*. Para cumplir satisfactoriamente con el objetivo propuesto se adelantaron los siguientes objetivos específicos:

- Analizar los modelos analíticos de trabajos anteriores y desarrollar un modelo teórico de evaporación a atmósfera abierta más ajustado a los datos experimentales.
- Realizar el modelo numérico del proceso de evaporación, reproduciendo las condiciones de experimentación por medio de ANSYS/FLOTTRAN CFD (Computational Fluid Dynamics).
- Verificar los resultados preliminares arrojados por la simulación numérica y compararlos con los valores obtenidos para las diferentes geometrías experimentales.
- Realizar un diseño experimental, teniendo como herramienta el “seudo experimentador” que proporciona el modelo numérico.
- Sintetizar los resultados para determinar el diseño final y las condiciones de operación.

El desarrollo del presente trabajo se organiza de la siguiente manera: el capítulo 2, presenta los modelos matemáticos de los procesos de evaporación a atmósfera abierta mostrando el principio físico, supuestos, resultados y conclusiones de cada modelo; el capítulo 3, en donde se presenta el modelo numérico, mostrando la metodología, validación y resultados de la simulación; el capítulo 4, en donde se presenta un análisis final y se enuncian las conclusiones y recomendaciones obtenidas de la investigación.

Adicionalmente, se incluyen varios anexos: el anexo A que describe el desarrollo físico y matemático de los modelos analíticos, el anexo B que presenta los comandos y su explicación para la implementación de las simulaciones realizadas y el anexo C y D que presentan una descripción detallada del diseño experimental y su análisis estadístico, respectivamente; todo esto, con el fin de asegurar la transferencia del conocimiento adquirido para que pueda ser aplicado en otros tipos de análisis similares.

2. MODELOS MATEMATICOS

Se analiza la evaporación a atmósfera abierta desde la dimensión de integración de fenómenos multifísicos, en donde se encuentran presentes de forma simultánea tanto la transferencia de masa como la de calor, por medio del análisis de los tres mecanismos de transporte predominantes, el transporte difusivo, el convectivo y con cambio de fase; siendo el primero principalmente debido a la actividad aleatoria atómica o molecular y el segundo motivado por el movimiento global o macroscópico del fluido [7].

En esta vía de análisis primero se ataca el problema realizando la simplificación que a bajas temperaturas el fenómeno está regido por el proceso difusivo y posteriormente dado las limitaciones de este modelo, se emplea un modelo para temperaturas cercanas a la de ebullición en donde el modo de transporte dominante es el convectivo y por último se mostrará el mecanismo con cambio de fase que es predominante tiempo después que la ebullición está presente. Es de anotar que el rango de temperaturas de interés en el caso de los sublimadores de azufre es inferior al de ebullición, pues anterior a este se presenta reacción espontánea por combustión (autoignición) [5], pero se indica el mecanismo de ebullición con el fin de dar un modelo analítico completo.

2.1 MECANISMO DIFUSIVO

Consideremos un recipiente de área transversal constante con agua líquida en su interior, como el ilustrado en la figura 4. Si la concentración de vapor de agua en la tapa del recipiente es menor que la concentración de vapor de agua en la interfase líquido-vapor, existirá una transferencia de masa de vapor de la interfase a la parte final del recipiente, dicho problema es conocido en la literatura como Flujo de Stefan. Para esta situación se establecen varios supuestos (ver Anexo A.1), los más importantes se enuncian a continuación: se asume estado estable, flujo laminar, que no ocurren reacciones químicas, que la temperatura y la presión permanecen constantes y que la fase líquida no es permeable al aire.

En el desarrollo del problema se utiliza la conservación de masa y la conservación de especies, como se aprecia en la deducción descrita en el anexo A.1.

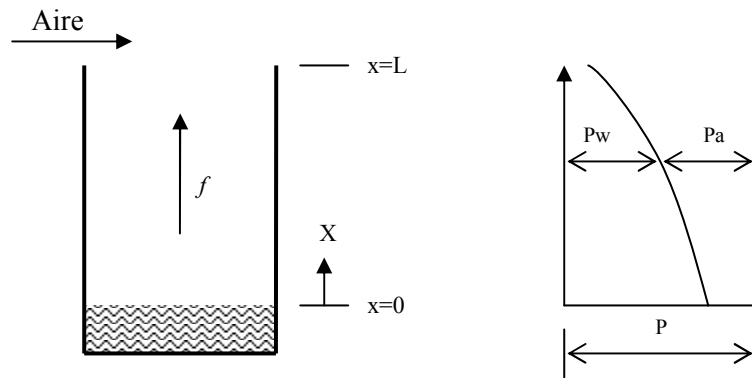


Figura 4

Diagrama de transferencia de masa por mecanismo difusivo

Tomando como condiciones de frontera que el vapor está saturado a la temperatura de trabajo en $x = 0$; se obtiene que la transferencia de masa está descrita por la ecuación (3).

$$\dot{m} = A \frac{\rho D_{AB}}{L} \ln \left(\frac{1 - Y_{w,L}}{1 - Y_{w,0}} \right) \quad (3)$$

Donde:

\dot{m} = tasa de evaporación.

A = área de evaporación a la atmósfera.

ρ = densidad de la mezcla.

D_{AB} = coeficiente de difusión binaria.

L = profundidad del plato

$Y_{w,0}$ = fracción másica de vapor de agua en $x = 0$

$Y_{w,L}$ = fracción másica de vapor de agua en $x = L$

La figura 6 (izq.) ilustra la tasa de evaporación para un diámetro y altura de 5 cm, extendida más allá de los límites de aplicación del modelo, el cual aplica para pequeños gradientes de temperatura² (ver supuestos del modelo). Esta curva se incrementa con la temperatura de trabajo y alcanza su máximo valor cuando esta corresponde a la temperatura de ebullición ($\approx 91 - 94^\circ\text{C}$ a una presión de 75 kpa, presión atmosférica aproximada de Bogota).

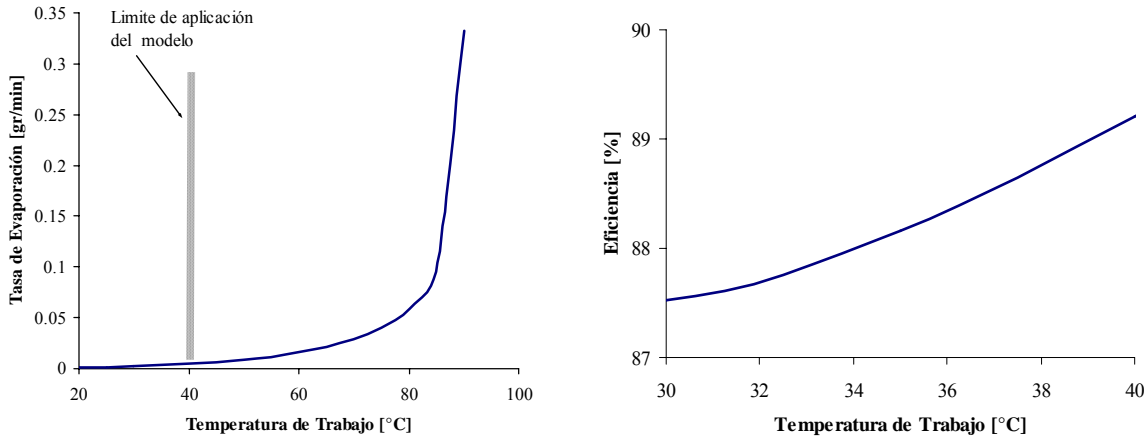


Figura 5

Evolución de la tasa de evaporación (izq.) y curva de eficiencia térmica (5) (der.) para el mecanismo de transferencia difusivo.

Para realizar la figura 5 (izq.) se empleó la ecuación (3), en donde para el cálculo de D_{AB} se utilizó la teoría cinética de la colisión [8] y para el cálculo de ρ y Y_w las relaciones existentes para mezcla de gases ideales (ver relaciones A.E.4).

Por otro lado, aplicando la ecuación de conservación de energía, como se indica en la deducción presente en el anexo A.1.2 se obtiene una relación para el calor de pérdidas por conducción dado en la ecuación (4).

$$q_{cond} = \frac{f C_p A (T_L - T_0)}{\exp\left(\frac{f C_p L}{K}\right) - 1} \quad (4)$$

² Aproximadamente diferencias de temperaturas menores a 20°C

Donde:

q_{cond} = calor por conducción

C_p = calor específico de la mezcla

K = coeficiente de conductividad térmica de la mezcla

Los resultados anteriores permiten calcular la eficiencia térmica. La expresión obtenida se ilustra en la ecuación (5), esta muestra que la eficiencia térmica para un modelo de transferencia difusivo es dependiente del estado de la sustancia e independiente de la geometría del plato. Al mismo tiempo se observa en la figura 5 (der.), que la eficiencia se incrementa con la temperatura de trabajo.

$$\eta = \frac{1}{1 + \left\{ \frac{C_p(T_L - T_0)}{h_{fg}} \cdot \frac{1}{\left[\left(\frac{1 - Y_{w,L}}{1 - Y_{w,0}} \right)^{\frac{\rho DC_p}{K}} \right] - 1} \right\}} \quad (5)$$

2.2 MODELO CONVECTIVO

Si se considera la situación en la que no hay velocidad forzada (velocidad en la tapa del evaporador despreciable) y en las que sin embargo hay corrientes de convección dentro del fluido se esta definiendo la convección libre o natural. Esta se origina cuando una *fuerza de cuerpo* actúa sobre el fluido en el cual existen *gradientes de densidad*. El efecto neto es una *fuerza de flotación* que induce corrientes de convección libre. En la mayoría de los casos, el gradiente de densidad es debido a *gradientes de temperatura* y la fuerza de cuerpo debida al *campo gravitacional* [7]. Estas son las características más importantes en el caso del evaporador analizado por proceso de transferencia convectivo en estado estable.

2.2.1 Ecuaciones que caracterizan el fenómeno de convección natural

Las ecuaciones que describen la transferencia de momentum y energía en convección natural se originan en los principios de conservación y ecuaciones de continuidad (Véase Anexo A.2). Las ecuaciones para la transferencia de calor y de masa son respectivamente:

$$q_{conv} = \bar{h} \times A_{evap} \times (T_0 - T_\infty) \quad (6)$$

$$\dot{m} = \bar{h}_m \times A_{evap} \times M \times (C_0 - C_\infty) \quad (7)$$

Donde

\bar{h} = *Coficiente de convección térmico (Véase anexo A.2.3.)*

\bar{h}_m = *Coficiente de convección másico (Véase anexo A.2.3.)*

A_{evap} = *Área de evaporación*

M = *Peso molecular de la sustancia*

C_0 = *Concentración molar del vapor en la superficie*

T_0 = *Temperatura de la sustancia en la superficie*

El anexo A.2.3, presenta la deducción de los coeficientes de convección libre de calor y masa. Es importante notar que en estos cálculos se desprecia el efecto difusivo y el de transferencia entre especies y se utiliza la analogía entre los números adimensionales de Nusselt (Número adimensional para el gradiente de temperatura en una superficie, Nu), Prandtl (Relación entre momentum y difusividad térmica, Pr), Sherwood (Número adimensional para el gradiente de concentración en una superficie, Sh) y Schmidt (Relación entre momentum y difusividad másica, Sc) para calcular el coeficiente de convección másico a partir del coeficiente de convección térmico.

La figura 6 (izq.) muestra un aumento exponencial de la tasa de evaporación con la temperatura de trabajo similar al obtenido en el mecanismo de transferencia difusivo pero con magnitudes de evaporación mayores, para la misma geometría.

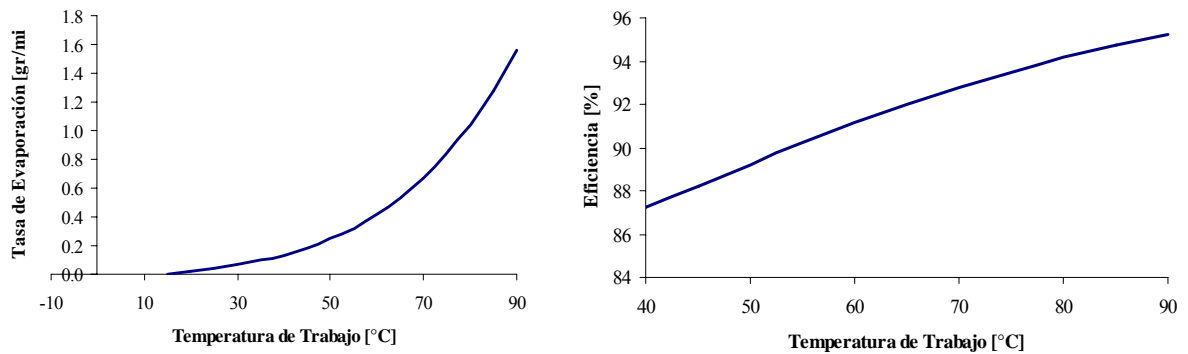


Figura 6

Comportamiento de la tasa de evaporación (7) (izq.) y Evolución de la eficiencia térmica (8) (der.) para el mecanismo de transferencia convectivo..

La ecuación que establece la eficiencia térmica para el modelo analítico de transferencia por mecanismo convectivo es la expresión (8), donde el calor de pérdidas por convección y la tasa de evaporación son calculados por las ecuaciones (6) y (7), respectivamente.

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{q_{conv}}{\dot{m}h_{fg}}} \quad (8)$$

La figura 6 (der.) ilustra la evolución de la eficiencia térmica para el mecanismo convectivo, donde se aprecia un aumento de la eficiencia con la temperatura de operación, llegando a un punto de estabilidad máximo cuando la temperatura corresponde a la de ebullición.

2.3 MECANISMO DE TRANSPORTE CON CAMBIO DE FASE

Los procesos de transmisión de calor acompañados por un cambio de fase son más complejos que el simple intercambio de calor entre fluidos. Un cambio de fase implica la adición y sustracción de cantidades considerables de energía calorífica a temperatura constante o casi constante. La velocidad de cambio de fase puede estar regida por la velocidad de transmisión de calor, pero más frecuentemente, esta gobernada por la velocidad de nucleación de burbujas, gotas o cristales y por el comportamiento de la nueva fase una vez formada [13]. Es de anotar, que la región de estudio para este caso es la limitada entre la superficie inferior del recipiente y el área de evaporación (ver figura 2) y por lo tanto esta fuera de la región de estudio de la presente investigación (véase 1.2

Descripción del proceso y limitación del problema), sin embargo se presenta este mecanismo de transferencia con la intención de explicar el aumento significativo en la tasa de transferencia de masa evidenciado en los datos experimentales tomados a temperaturas muy cercanas a la de ebullición.

2.3.1 Ebullición de líquido saturado

A la situación en que el vapor formado esta en equilibrio con el liquido a su temperatura de ebullición se le denomina y conoce en la literatura como *ebullición de liquido saturado* [13]. La figura 7 muestra la curva de ebullición para agua saturada a presión atmosférica estándar sobre una placa horizontal. Esta curva experimental describe el flujo de calor por unidad de área (q [W/m²]), y la diferencia de temperatura entre la superficie y el liquido hirviente (ΔT_e [°C]), representadas en coordenadas logarítmicas.

La curva de ebullición ha sido dividida en 4 etapas [7]:

- La primera de ellas correspondiente a pequeñas caídas de temperatura ($\Delta T_e \leq 5^\circ\text{C}$), llamado *ebullición de convección libre*. En este regímenes hay insuficiente vapor en contacto con la fase liquida para ocasionar ebullición a la temperatura de saturación. Como el exceso de temperatura aumenta, finalmente ocurrirá el inicio de burbujeo, pero por debajo del punto A (denominado inicio de la ebullición nucleada, ONB por sus siglas en ingles), el movimiento se determina principalmente por los efectos de la convección libre.
- La siguiente etapa llamada *ebullición nucleada*, corresponde a un rango de temperaturas ($5^\circ\text{C} \leq \Delta T_e \leq 30^\circ\text{C}$). En este intervalo se pueden distinguir dos regímenes de flujo diferentes: en la región A-B, se forman burbujas aisladas y el intercambio de calor es principalmente a través de la superficie liquido, en cambio en la región B-C se forman chorros y columnas de burbujas que aumentan el movimiento de fluido sobre la superficie, aumentando el flujo de calor hasta el punto de flujo máximo (punto C), que normalmente se denomina *flujo critico de calor*.
- En el otro régimen ($\Delta T_{e,C} \leq \Delta T_e \leq \Delta T_{e,D}$), denominado ebullición de transición, la formación de burbujas es ahora tan rápida que una película de vapor se comienza a formar sobre la superficie. Esta película aumenta de espesor al aumentar la diferencia de temperaturas y como la conductividad del vapor es mucho menor que la del líquido, h y q , deben disminuir al aumentar ΔT_e .
- Por ultimo cerca al punto D, denominado punto de Leidenfrost, el mecanismo de transferencia de calor predominante es el conducción a través de la capa de vapor y a medida que aumenta la

diferencia de temperaturas aumenta el flujo de calor al hacerse apreciable el flujo de calor por radiación, esta etapa se conoce como *ebullición de película*.

Pool boiling curve for water

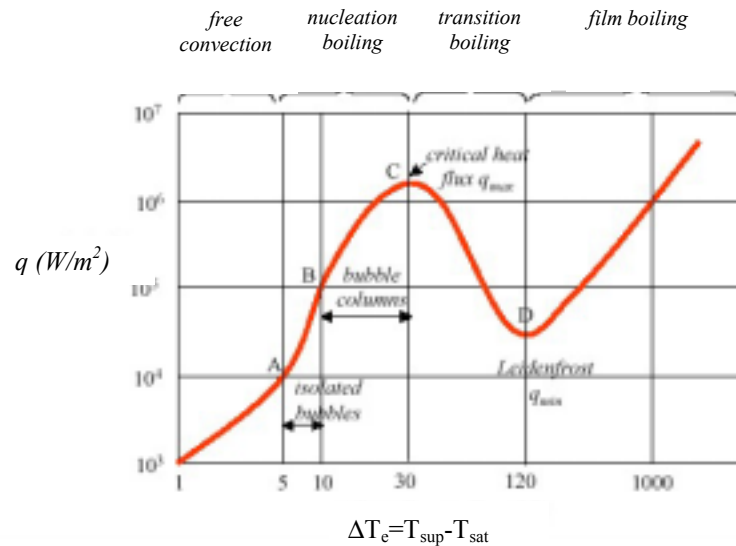


Figura 7

Curva típica de ebullición para agua saturada a 1 atmósfera de presión [7].

2.3.2 Parámetros importantes de la ebullición nucleada

Generalmente es deseable la ebullición nucleada en un aparato de evaporación comercial dado que se encuentran los más altos aumentos de transferencia de calor al fluido. La elevada velocidad de transmisión de calor que se obtiene en la ebullición nucleada se debe principalmente a la turbulencia que se genera en el líquido debido a la acción dinámica de las burbujas. La capa de líquido próxima a la superficie se recalienta debido al contacto con la pared del calentador. El líquido sobrecalentado tiende a formar espontáneamente vapor y de esta forma suprimir el sobrecalentamiento. Esta tendencia del líquido a sufrir vaporización súbita o flash es lo que proporciona el ímpetu característico de la ebullición.

El coeficiente correspondiente a la ebullición nucleada depende de numerosas variables, tales como, naturaleza del fluido, tipo y condición de la superficie, presencia o ausencia de agitación, así como presión y temperatura [13]. A continuación se describen los fenómenos donde están involucradas algunas de ellas:

- La eficacia de la ebullición nucleada depende de la facilidad con la que se forman y liberan por si mismas las burbujas de la superficie de calentamiento, el factor que controla la velocidad de desprendimiento de las burbujas es la *tensión interfacial entre el liquido y la superficie de calentamiento*, si la tensión interfacial es grande la burbuja tiende a extenderse sobre la superficie y a recubrir el área de transmisión de calor, en vez de abandonarla y dejar el sitio para otras burbujas. Esta tensión interfacial depende de la combinación fluido-superficie y de la *tensión superficial* del liquido.
- Las *condiciones de la superficie sólida* es otro parámetro importante en la ebullición nucleada, una superficie rugosa proporciona mas y mayores lugares de crecimiento de burbujas aumentando la transferencia de calor, al igual que una *superficie aumentada* o arreglos de esta generan fuentes estables de vapor atrapado.
- Otra variable importante es la *diferencia de densidades* entre las dos fases, esta diferencia induce una fuerza de empuje en presencia de un campo gravitacional que es proporcional a $g(\rho_l - \rho_v)$.

La correlación mas útil para la ebullición nucleada es la que desarrollo Rohsenow [7], esta se presenta en la siguiente ecuación:

$$q = \mu_l h_{fg} \left[\frac{g(\rho_l - \rho_v)}{\sigma} \right]^{1/2} \left(\frac{C_{p,l} \Delta T_e}{C_{s,f} h_{fg} \text{Pr}_l^n} \right)^3 \quad (9)$$

Donde:

$l =$ subíndices liquido saturado

$v =$ subíndices vapor saturado

$\sigma =$ tensión superficial

$\text{Pr}_l =$ número de Prandtl para el liquido saturado

$C_{s,f} =$ constante que depende de la combinación superficie liquido

$n =$ constante que depende de la combinación superficie liquido

La correlación de Rohsenow se aplica solo para superficies limpias. Cuando se utiliza para estimar el flujo de calor los errores pueden ascender al $\pm 80\%$, pero para estimar ΔT_e a partir del conocimiento de q el error se reduce por un factor de 3.

2.4 CONCLUSIONES DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS

En la búsqueda de un modelo analítico que comprendiera la multiplicidad de fenómenos físicos involucrados en los procesos de evaporación de sustancias a atmósfera abierta y se ajustara a los datos obtenidos de la práctica experimental, y con el fin de determinar bases de selección de parámetros de optimización se estudiaron 3 mecanismos de transporte, el mecanismo difusivo, el mecanismo convectivo y el mecanismo de transporte con cambio de fase, cada uno de los cuales tiene sus propias limitaciones y campos de acción propios de la naturaleza del mecanismo.

Comparando cuantitativamente la tasa de evaporación de los mecanismos difusivo y convectivo, se observa en la figura 8 (izq.) que para una misma geometría se presenta mayores tasas de evaporación en el segundo mecanismo, causadas por el aumento de transferencia de masa al existir corrientes convectivas.

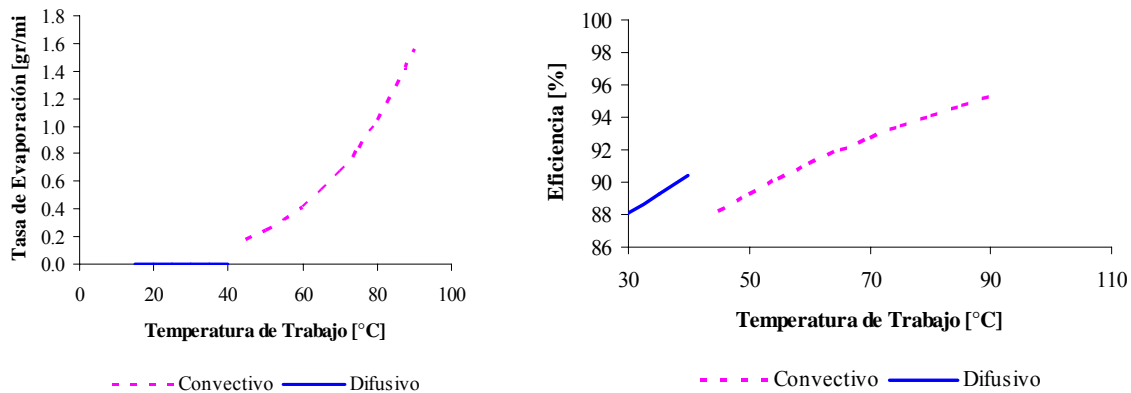


Figura 8.

Comparación de los mecanismos de difusión y convección por la tasa de evaporación (izq.) y por eficiencia térmica (der.).

Así mismo en la figura 8 (der.) se observa que al mismo tiempo que el modelo convectivo predice mayores tasas de evaporación también sugiere menores eficiencias dado las pérdidas de calor por el movimiento general del fluido, lo cual es más cercano a la realidad experimental.

2.4.1 Comparación de los modelos con los datos experimentales

Para someter la validez de cada uno de los mecanismos de transferencia presentados se compararon con los resultados experimentales obtenidos de trabajos anteriores [6]. La figura 9 y 10 muestran el resultado logrado al comparar los datos obtenidos para las geometrías de jarrón y balde, respectivamente.

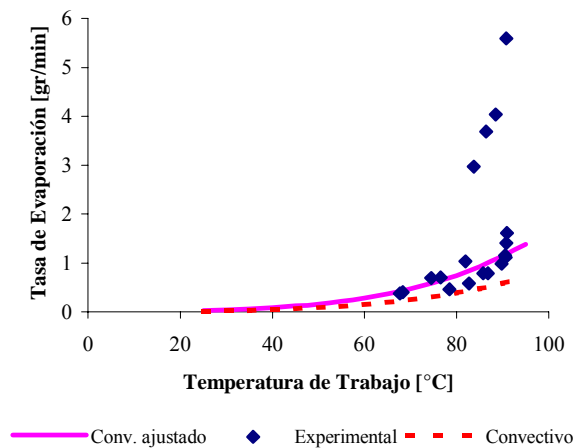


Figura 9.

Curva de la tasa de evaporación del mecanismo convectivo y datos experimentales para la geometría de Jarrón con un convectivo ajustado de exponente igual a 0.25

En cada gráfica se indica la curva obtenida con el modelo convectivo y el “convectivo ajustado”, este ultimo representa un cambio en el exponente de la correlación para el coeficiente de transferencia de calor en el número de Rayleigh. Este cambio se hizo teniendo en cuenta las limitaciones que tiene la obtención del coeficiente de transferencia masico con analogía al de calor, que impide su predicción si existe transferencia entre especies (ver anexo A.2.2), además de la naturaleza experimental de la correlación obtenida en un fenómeno donde solo existe transferencia de calor; por lo tanto debido a que el problema de evaporación a atmósfera abierta incluye la transferencia de calor y masa al tiempo y la interacción entre especies, se puede pensar en la formación de una correlación ajustada cambiando dicho exponente, obteniendo como resultado una curva analítica mas ajustada a los datos experimentales.

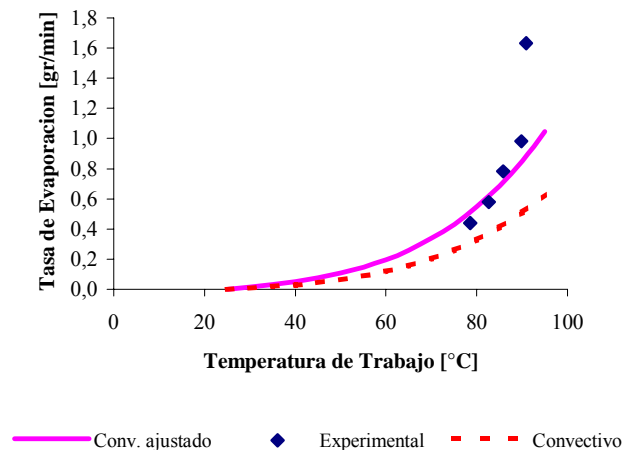


Figura 10

Curva de la tasa de evaporación del mecanismo convectivo y datos experimentales para la geometría de Balde con un convectivo ajustado de exponente igual a 0.27.

Para las dos geometrías experimentales se puede observar que el mecanismo convectivo ajustado se aproxima bastante bien a los datos experimentales en la zona anterior a la temperatura de ebullición ($\approx 90-94^{\circ}\text{C}$). En esta zona hay un gran salto en la tasa de evaporación que puede ser atribuido al aumento del flujo de calor a causa del inicio de la ebullición nucleada.

Los anteriores resultados permiten determinar las siguientes conclusiones del modelo analítico que gobierna el fenómeno:

- El tipo de modelo analítico que rige el fenómeno de evaporación a atmósfera abierta está determinado por la temperatura de trabajo, a baja temperatura está gobernado por el mecanismo difusivo, a una temperatura inferior a la de evaporación está regido por el modelo de convección libre y finalmente a la temperatura de evaporación está regido por la evaporación nucleada, al existir un cambio de fase.

3. MODELO NUMÉRICO

Hasta el momento se ha desarrollado el modelo analítico de los procesos de evaporación de sustancias a atmósfera abierta, encontrando que el mecanismo de transferencia predominante a temperaturas inferiores a la de ebullición es el convectivo, siendo este también dominante en la ebullición cuando la diferencia de temperaturas entre la superficie de calentamiento y la sustancia no es mayor a 5°C, sin embargo, este modelo no permite la adicción de la totalidad de los fenómenos involucrados, ni una evaluación de la geométrica total del recipiente de sublimación, incluyendo únicamente su área de evaporación.

Por lo tanto, se hace necesario utilizar un modelo numérico ya que este permite tener en cuenta la multiplicidad de fenómenos, incluida la interacción entre especies y simular las condiciones de experimentación. De esta forma utilizando técnicas matemáticas de aproximación para resolver las ecuaciones de continuidad y conservación de energía y partiendo de las observaciones de optimización (Véase 1.4.3 Consideraciones de optimización), se investiga la influencia de los parámetros: altura del evaporador, área de evaporación y área de exposición. El modelo numérico asume condiciones uniformes para las otras variables involucradas en el proceso, como son material del evaporador, cantidad de sustancia en el recipiente, cantidad y distribución de resistencia eléctrica, transferencia de calor, potencia consumida etc. Por esta razón, se considera que el uso de la tasa de transferencia de masa como criterio de evaluación es aceptable y el denominador de la ecuación (1), potencia eléctrica se puede considerar constante para los análisis en donde solo se varía factores geométricos. Sin embargo es un parámetro importante que limita la predicción del modelo, y que crea la necesidad de su investigación en futuros trabajos. No obstante, si es posible determinar una configuración geometría óptima, será posible diseñar evaporadores con mejores eficiencias térmicas a partir de la manipulación de estos parámetros. Este capítulo se presenta en seis partes:

- ◆ Generalidades de la simulación.
- ◆ Validación del modelo numérico.
- ◆ Resultados del modelo numérico.
- ◆ Consideraciones físicas de los resultados

- ◆ Análisis estadístico de los resultados
- ◆ Conclusiones del modelo numérico

3.1 GENERALIDADES DE LA SIMULACIÓN

Se simuló bajo condiciones de estado estable los procesos de evaporación a atmósfera abierta, analizando los fenómenos involucrados desde el área de evaporación, en el interior del recipiente, a la zona superior del mismo (área de exposición) y medio ambiente. Se utilizó para esto ANSYS/FLOTTRAN CFD como software de simulación y como sustancia de trabajo se empleó agua debido a la posibilidad de encontrar en la literatura los valores de las diferentes propiedades de esta sustancia. Es de resaltar, que en general la metodología empleada en el desarrollo de la presente simulación fue la utilizada en la referencia [4], pero se adicionó la posibilidad de reproducir las condiciones atmosféricas de Bogotá.

3.1.1 Consideraciones del problema de simulación

A continuación se enuncian algunas consideraciones importantes desarrolladas en la referencia [4] y que sirven de base al presente proyecto:

- Aprovechando la existencia de la fase característica en los procesos evaporación en donde la temperatura de trabajo y tasa de evaporación permanecen constantes (Véase 1.4.1 Temperatura de trabajo y tasa de evaporación), se decide utilizar éstas como las principales características del análisis, en donde:
 - La temperatura de trabajo se utiliza para describir 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.
 - La tasa de evaporación se utiliza para describir la respuesta del sistema, de tal forma que considerando condiciones uniformes (material del evaporador, potencia eléctrica suministrada, transferencia de calor, aislamiento térmico, etc.), se convierte en el indicador principal para evaluar la eficiencia del evaporador. Sin embargo, cabe anotar, que definiendo la eficiencia térmica como la ecuación (8) se observa que esta aumenta con la tasa de evaporación, pero también disminuye con el calor perdido por convección natural. Un análisis intuitivo sugiere que si no se altera la temperatura de trabajo y demás aspectos de la experimentación y el consumo energético, la eficiencia del evaporador se podría aumentar con solamente incrementar la tasa de evaporación.

- Las principales características del problema que se desea analizar mediante simulación numérica se ilustran en la figura 11. Estos aspectos son:
 - Área de evaporación con capa de vapor de agua a temperatura de saturación. Para el análisis de estado estable, se considera una fuente infinita.
 - Condiciones de atmósfera abierta promedio de Bogotá. Presión atmosférica de 75 kpa, temperatura ambiente de 15°C, aire seco, aceleración gravitacional y ausencia de corrientes convectivas de aire.
 - Pared del evaporador adiabática.
- Se ignoran los procesos previos al estado estable, como la transferencia de calor desde la resistencia eléctrica y el fenómeno de cambio de estado de la sustancia.

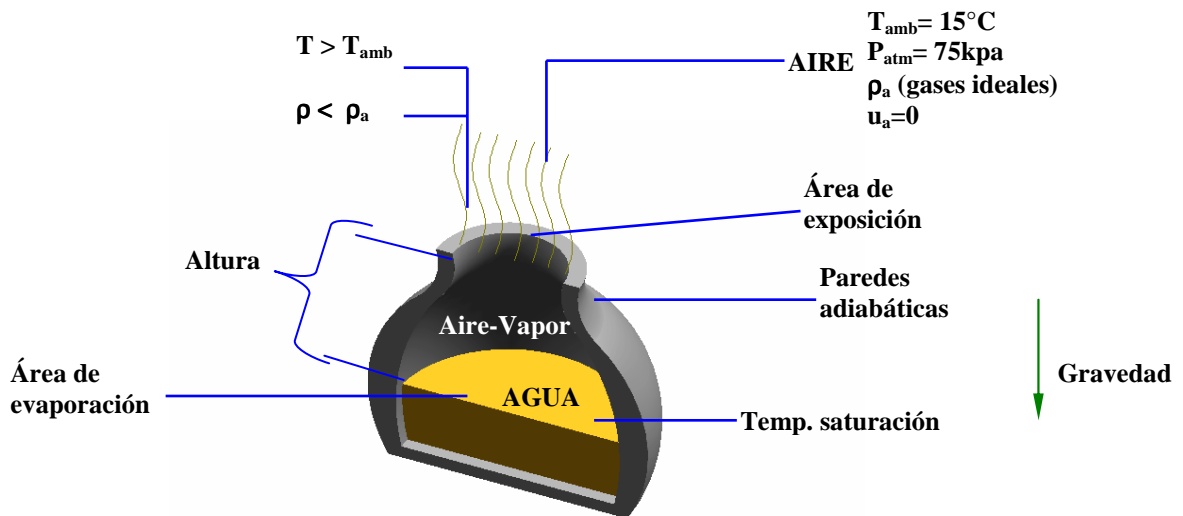


Figura 11.

Esquema de la descripción del problema para la simulación numérica.

3.1.2 Simplificación Geométrica

A partir del diagrama simplificado mostrado anteriormente, se construyó un modelo con simetría axial y tridimensional. La figura 12 muestra el proceso de simplificación de la geometría del evaporador, que representa el corte transversal de la sección superior de él (desde el área de evaporación a la área de exposición a la atmósfera), mas un cilindro en la parte superior que representa la atmósfera abierta. Las especies que interactúan en este modelo son: aire y vapor de agua.

3.1.3 Condiciones de la simulación

A continuación se presenta un resumen de las condiciones de programación más importantes establecidas durante el desarrollo de los diferentes modelos [4].

- El tipo de elemento seleccionado fue FLUID 141 2-D, que permite el manejo de modelos axisimétricos, múltiples especies y el análisis de fenómenos multifísicos incluido el fenómeno de convección natural [14].
- La construcción de la malla que conforma los elementos se realizó según las recomendaciones que sugiere la referencia [15], de forma que las zonas de mayor interés, entre el área de evaporación y la de exposición, tienen una malla más densa (ver figura 13) y las fronteras se ubican lo suficientemente lejos de las zonas de interés para que no afecten el resultado.

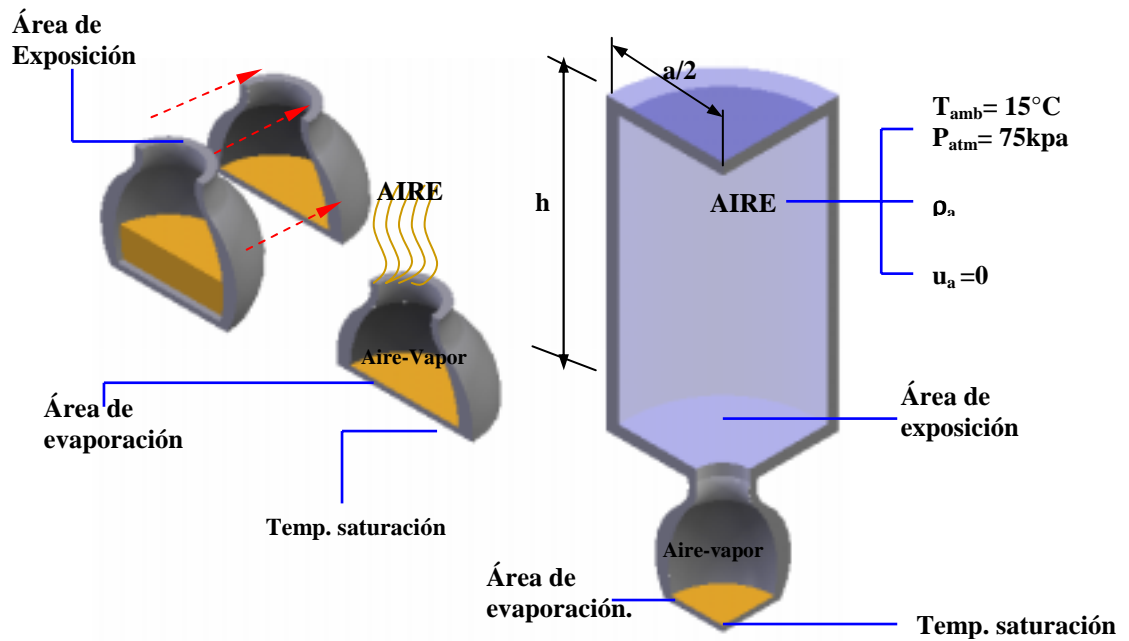


Figura 12.

*Proceso de simplificación de la geometría del evaporador. Esquema de evaporador inicial (Izq.).
Esquema de la geométrica para la simulación numérica (Der.).*

- El número de iteraciones de la simulación se determina según la relación aproximada *Número de nodos/10* usada para el análisis de estos fenómenos. Por lo tanto el número de iteraciones debió cambiarse para cada modelo en la medida que la malla necesitó cambios de forma.
- Dentro de las estrategias de solución para el fenómeno de convección libre a las condiciones de experimentación, se definió el estado inicial de la sustancia estableciendo varias propiedades

básicas de sus especies, en la tabla 2 se muestra un resumen de como se procedió para el calculo de estos parámetros de entrada, el nivel de variabilidad y el modo de calculo empleado por la simulación.

- Todas las propiedades del fluido se calcularon de acuerdo a la ley de mezclas para gases ideales, para esto se activo la opción *cmix* de las propiedades del fluido.
- Se realizaron las simulaciones en estado estable. Sin embargo, para lograr convergencia en la solución, el modelo se simuló durante las primeras (5-10) iteraciones sin realizar el análisis térmico. Después de estas primeras iteraciones se colocó la *carga de temperatura*³ logrando una solución convergente. Por otro lado, el modelo se simula como flujo compresible y laminar, ya que el Número de Grashof, usando valores de las propiedades del vapor, es del orden de 10^5 [7].

Tabla 2.

Calculo de las propiedades del vapor de agua y el aire, como parámetros de simulación.

Sustancia	Propiedad Parámetro	Fuente de información para el calculo del parámetro de entrada	Grado de libertad	Calculo Simulación
Vapor de Agua	<i>Densidad</i>	Gases ideales y presión de saturación a la temperatura de trabajo.	Variable	Gases ideales
	<i>Viscosidad</i>	Tabla de propiedades a la temp. de trabajo.	Constante	N.A
	<i>Conductividad</i>	Tabla de propiedades a la temp. de trabajo.	Constante	N.A
	<i>Calor Especifico</i>	Tabla de propiedades a la temp. de trabajo.	Constante	N.A
Aire	<i>Densidad</i>	Gases ideales, presión atmosférica y temperatura ambiente.	Variable	Gases ideales
	<i>Viscosidad</i>	Tabla de propiedades a la temp. ambiente.	Constante	N.A
	<i>Conductividad</i>	Tabla de propiedades a la temp. ambiente.	Constante	N.A
	<i>Calor Especifico</i>	Tabla de propiedades a la temp. ambiente.	Constante	N.A
	<i>Difusividad Másica</i>	Teoría cinética de la colisión [8]	Constante	N.A

3.1.4 Condiciones de frontera

Para calcular la composición de especies en el área de evaporación se define la proporción másica de vapor de agua según la ecuación (10).

³ Condición de Frontera

$$Y_V = \frac{P_{sat@To} \times M_w}{P_{sat@To} \times M_w + (P_{atm} - P_{sat@To}) \times M_a} \quad (\text{Ec.10})$$

Donde

- $Y_w =$ Porcentaje másico de vapor de agua ⁴
- $P_{sat@To} =$ Presión de saturación de vapor de agua a la temperatura de trabajo
- $P_{atm} =$ Presión atmosférica
- $M =$ Peso molecular del vapor (w) y aire (a)

La altura de la pseudo-atmósfera en los diferentes modelos desarrollados (Distancia "h" figura 12) varió entre 0.7 y 1 m, lo que equivale a más de 15 veces la altura de los evaporadores; el ancho de esta (Distancia "a/2" figura 12) varió entre 0.2 y 0.35 m. Esto garantizó que la cercanía de las fronteras de la atmósfera abiertas estuviesen lo suficientemente lejos de la zona de interés y no afectara su respuesta significativamente. En la Figura 13 se indican las condiciones de frontera de los modelos desarrollados. Es importante desatacar que todos los límites del modelo deben tener por lo menos un grado de libertad fijo, o sea una condición de frontera definida [4].

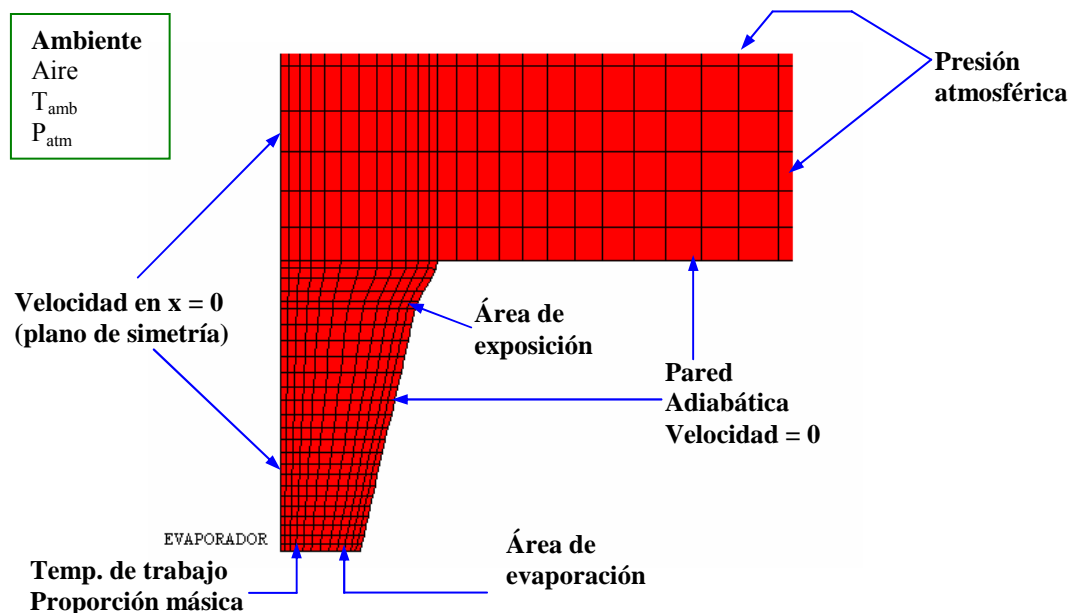


Figura 13.

Condiciones de frontera dispuestas sobre la geometría de balde.

⁴ El porcentaje másico de aire Y_A , se calcula como $(1-Y_V)$.

La atmósfera abierta tiene como condición de frontera: presión parcial cero, es decir, que esta frontera esta a presión atmosférica. La pared del evaporador y la zona inferior de la atmósfera se consideraron adiabáticas con velocidad cero en todos los sentidos. El eje de simetría alrededor del cual se genera el sólido de revolución para el análisis axisimétrico, tiene como condición de frontera: velocidad perpendicular al eje igual a cero. El área de evaporación tiene como condición de frontera: temperatura de trabajo y proporciones másicas de vapor (Y_w) y aire (Y_a), de forma que $(Y_w + Y_a) = 1$.

3.2 VALIDACIÓN DEL MODELO NUMERICO

Antes de poder realizar alguna inferencia sobre la respuesta de la simulación, los resultados deben ser validados de alguna forma. La metodología empleada es la comparación con los resultados del modelo analítico de convección natural y los datos experimentales reportados en la referencia [6]. Los criterios más importantes para la validación son la forma de la respuesta con respecto a su distribución de temperaturas, perfiles de velocidad, distribución de proporciones másicas, etc., y el orden de magnitud de los diferentes resultados.

3.2.1 Distribuciones y forma de la respuesta

La existencia de gradientes de densidad inducidos por las diferencias de temperaturas producen corrientes de convección libre dentro del evaporador en presencia de un campo gravitacional (Véase 2.2 Modelo Convectivo). En ausencia de una superficie en la dirección de la corriente, las fronteras libres del flujo pueden formar una *pluma o chorro ascendente*. Esta se representa en la figura 14. Aunque el ancho de la pluma inicialmente aumenta con la distancia desde el área de exposición, esta progresivamente se disipará por si misma como resultado de los efectos viscosos y la reducción de la fuerza de flotación causada por el enfriamiento del fluido [7].

Por lo tanto se espera que las distribuciones de masa y temperatura se concentren en el interior de la pluma. La figura 15 muestra los resultados de la simulación para la distribución de la fracción másica de vapor de agua en la geometría con forma de jarrón (izq.) y la distribución de temperaturas para la geometría en forma de balde (der.). En las dos distribuciones se observa que se desarrolla la

forma de la pluma; su ancho va aumentando con la distancia y se va enfriando, tal y como es lo esperado.

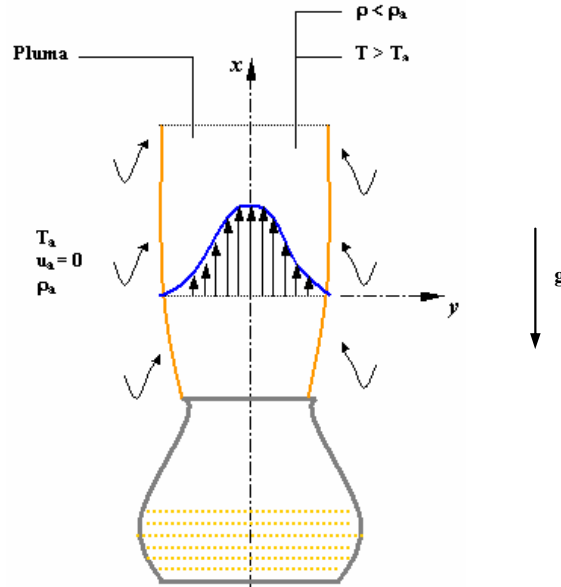


Figura 14.

Dirección del flujo de convección libre en un medio extenso en reposo y formación de la pluma en una sustancia evaporándose [7].

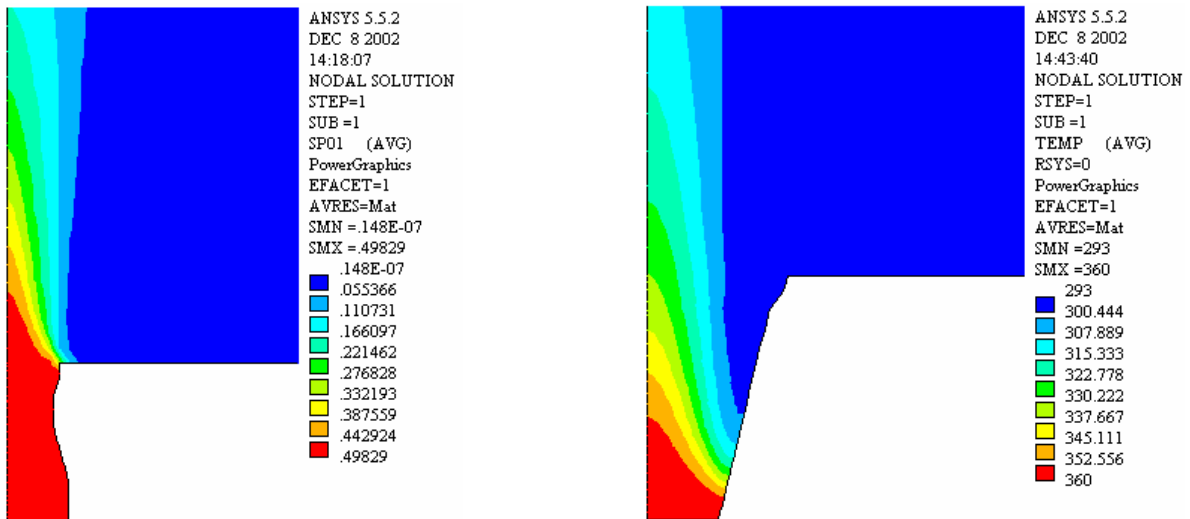


Figura 15.

Distribución de la fracción másica de vapor de agua en la geometría con forma de Jarrón (Izq.).
Distribución de temperaturas en la geometría con forma de Balde (Der.). Tomadas a una temperatura de trabajo de 90°C

3.2.2 Orden de magnitud de la respuesta

La variable que se decidió utilizar para definir la respuesta del sistema fue la tasa evaporación (Véase 3.1.1 Consideraciones del problema de simulación). Para calcular esta variable a partir de los resultados de la simulación se siguió el procedimiento desarrollado en la referencia [4]. Este se resume a continuación:

Se definió la tasa de evaporación de acuerdo a la ecuación (10), para esto se requiere conocer el perfil de velocidades del fluido y el de fracciones másicas en el área de exposición y finalmente calcular la integral de área discretizando el dominio por anillos de acuerdo a la definición básica de la integral [16].

$$\dot{m} = \int_A [\rho \times Y_w(r) \times V_y(r)] \cdot dA \quad (10)$$

En la figura 16 se pueden observar los perfiles mencionados graficados a la altura del área de exposición desde del eje de simetría hasta la pared del evaporador. Como es de esperarse los perfiles tienen forma cóncava, con un máximo en el eje de simetría y un mínimo en la pared..

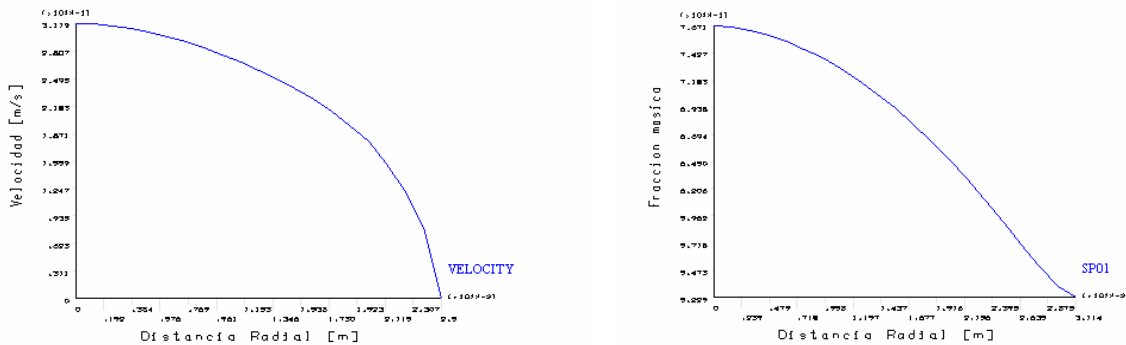


Figura 16.

Resultados de la simulación para la geometría de forma de Balde en el área de evaporación a 90°C. Perfil de fracciones másicas (Izq.) y perfil de velocidades (Der.)

La comparación de los valores experimentales de la tasa de evaporación, disponibles en la referencia [6], para las geometrías de forma de balde y jarrón, contra los resultados numéricos obtenidos de la simulación para diferentes temperaturas de trabajo se muestran en la figura 17, adicionalmente se grafico la curva analítica del modelo convectivo ajustado (véase 2.4.1

Comparación de los modelos con los datos experimentales). En estas, se observa la similitud en la forma y en la magnitud de la variable respuesta para las dos geometrías evaluadas, sin embargo, los datos obtenidos de la simulación para la geometría de balde se aproximan más a los datos experimentales, que en el caso de la geometría en forma de jarrón, posiblemente debido a la complejidad geométrica de esta última geometría con respecto a la balde [6].

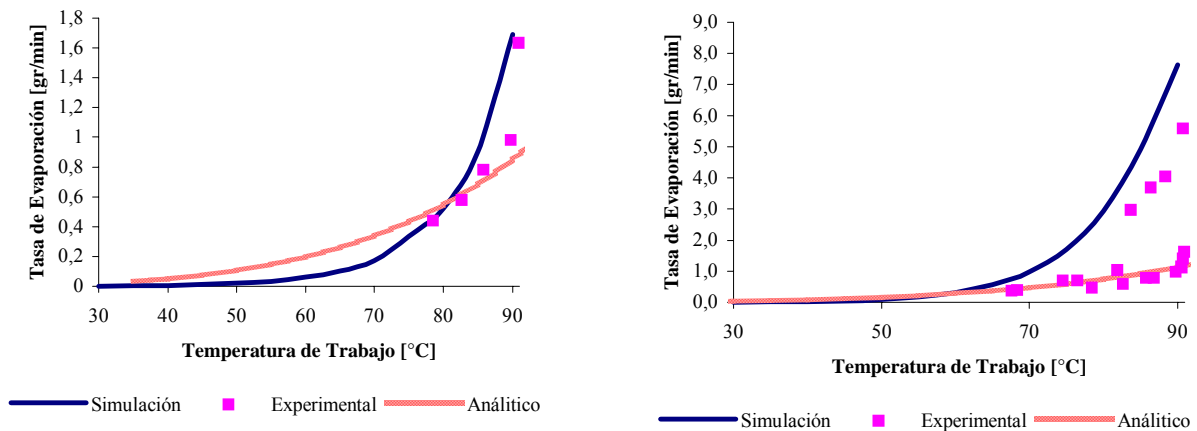


Figura 17.

Comparación entre los resultados de la simulación con los experimentales y analíticos, para las geometrías de forma de Balde (Izq.) y Jarrón (Der.)

Hasta momento se puede afirmar que el modelo numérico, aunque tiene diferencias cuantitativas con los datos experimentales y cálculos analíticos, tiene un comportamiento similar en forma y magnitud y por lo tanto la simulación numérica se puede usar para encontrar la geometría teniendo presente criterios importantes como: 1. la relación de forma de los elementos (que cambia al modificar algún parámetro geométrico), 2. el tamaño de la malla (número de nodos) y por lo tanto 3. el número de iteraciones de la simulación [15].

3.3 RESULTADOS DEL MODELO NUMERICO.

Se busca determinar la geometría óptima para el recipiente de evaporación que maximice la transferencia de masa variando solamente parámetros geométricos. Inicialmente se podría pensar que teniendo una herramienta computacional previamente validada, se podría aprovechar más su potencial no solo evaluando la inferencia de las variables geométricas en la eficiencia térmica de los procesos de evaporación, si no además analizando el efecto de los factores que establecen el estado inicial de la sustancia como la temperatura de trabajo y las condiciones atmosféricas. Teniendo esta inquietud en mente, se procedió a estudiar someramente el efecto de la temperatura de trabajo y el

cambio de las condiciones atmosféricas de Bogota a las condiciones atmosféricas estándar en el punto de relación de áreas de máxima transferencia de masa. Este ultimo cambio (condiciones estándar) altera la programación de la simulación principalmente en la determinación de las propiedades de estado para el aire (Véase 3.1.3 Condiciones de simulación).

Es de resaltar que no se busca concluir sobre el efecto de estos factores, si no mostrar intuitivamente y con resultados la influencia de estos en la tasa de evaporación, esto sirve de punto de partida para posteriores trabajos que profundicen más sobre los fenómenos de evaporación a atmósfera abierta y para el aislamiento del efecto de las variables geométricas, punto de interés del presente trabajo.

3.3.1 Temperatura de trabajo y presión atmosférica.

De acuerdo a criterios analíticos y experimentales, encontrados en investigaciones previas [5] y enunciados en el presente trabajo (Véase 1.4.3 Consideraciones de optimización), se establece que se debe tratar de operar a una temperatura cercana a la temperatura de ebullición de la sustancia. La figura 18 muestra el comportamiento de la curva *Tasa de Evaporación versus Relación de Áreas*⁵ para diferentes temperaturas de trabajo, en esta se observa que para una misma geometría y condiciones uniformes de experimentación, se obtiene una mayor tasa de transferencia de masa al aumentar la temperatura de trabajo, tal como se había enunciado de análisis anteriores.

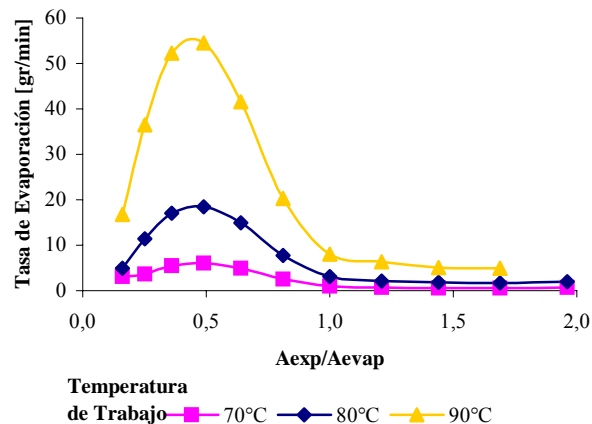


Figura 18.

Cambio de la Tasa de Evaporación por la Temperatura de Trabajo para una Altura =5,2cm y un diámetro de evaporación =5cm.

⁵ Relación de Áreas = Área de exposición / Área de evaporación = (Aexp/Aevap).

La presión atmosférica es un factor experimental fijo que depende del lugar en el cual ocurra el fenómeno de evaporación y por lo tanto, hace parte de las características del problema y afectan la respuesta del sistema y la magnitud de ciertos parámetros experimentales como la temperatura de ebullición. Se analizó el efecto que tiene esta condición experimental en la tasa de transferencia de masa con el fin de aislarlo como variable a modificar dentro del modelo numérico. Esto se hace por medio de la construcción de las curvas características de temperatura de trabajo y relación de áreas que se muestra en la figura 19. En estas se ilustra dicho efecto, destacándose la disminución de la tasa de evaporación para temperaturas menores a la de ebullición cuando las condiciones atmosféricas se establecen estándar, pero esta aumenta en mayor proporción cuando se alcanza los 100°C (temperatura de ebullición a condiciones estándar). Adicionalmente, la magnitud de la variable respuesta para la curva de relación de áreas, es menor a las condiciones atmosféricas estándar que a las condiciones de Bogotá, conservándose la forma de la respuesta.

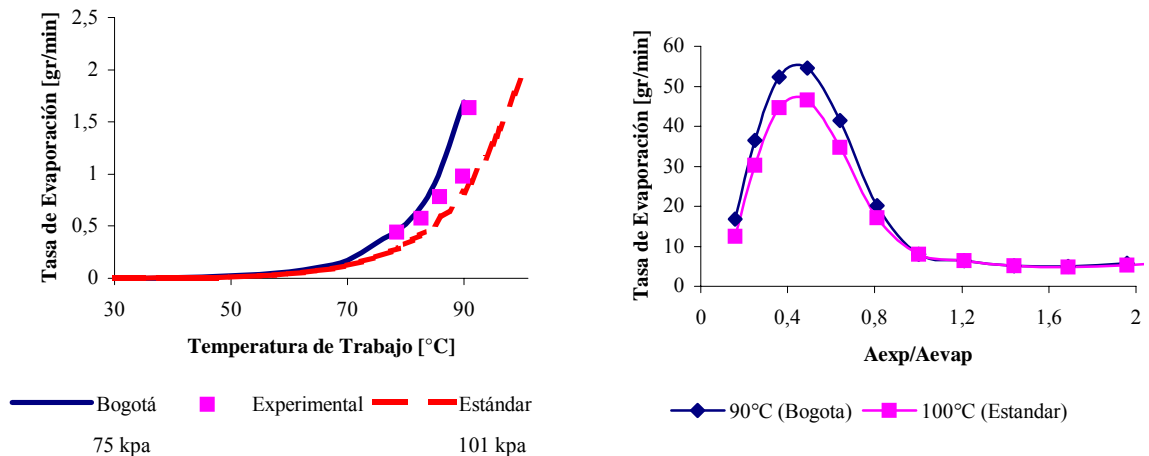


Figura 19.

Cambio de la Tasa de Evaporación por la presión atmosférica. Curva de Temperatura de Trabajo geometría Balde (Izq.). Curva de Relación de Áreas, altura =5,2cm y diámetro de evaporación =5cm (Der.).

Por lo tanto, aunque los factores temperatura de trabajo y presión atmosférica influyen en la magnitud de la tasa de evaporación, es posible decir que forma de la respuesta no se altera fuertemente con los cambios de estos factores y que se puede aislarlos y estudiar el efecto de los parámetros geométricos sobre la tasa de transferencia de masa.

3.3.2 Geometría del evaporador.

Para determinar la geometría que maximiza la tasa de transferencia de masa se variaron tres parámetros geométricos, estos son: altura del evaporador, diámetro de evaporación y diámetro de exposición. En total se utilizaron tres valores de altura, un mismo número de valores para el diámetro de evaporación y nueve para el diámetro de exposición, como se resume en la tabla 3. Con estos datos se concluyó sobre una relación de áreas que maximiza la variable respuesta y el efecto de cada uno de los factores geométricos en la misma.

Tabla 3.

Resumen de las características de variabilidad para los parámetros geométricos.

VARIABLE GEOMÉTRICA	NIVELES	
	Numero	Valores [m]
<i>Altura</i>	3	0.04, 0.052, 0.064
<i>Diámetro de Evaporación</i>	3	0.036, 0.05, 0.064.
<i>Diámetro de Exposición</i>	9	0.02, 0.025, ..., 0.06

Se debe tener en cuenta que estas conclusiones se basan en condiciones uniformes de experimentación y que la geometría empleada para la obtención de estos datos por simulación numérica se simplificó para que los efectos de forma del elemento, tamaño y densidad de malla afectaran mínimamente la convergencia y el desarrollo de la simulación. La figura 20 ilustra esta geometría simplificada.

La metodología empleada para el análisis de las variables geométricas se basó inicialmente en un examen específico de los datos, en el cual para aislar el efecto de cada variable en la respuesta del sistema, se varió un factor a la vez y se mantuvieron los demás constantes y progresivamente se desarrollaron curvas que describieran de forma más general el efecto de cada parámetro. Posteriormente se realizó un análisis físico de los resultados y finalmente se efectuó un análisis estadístico de la información obtenida.

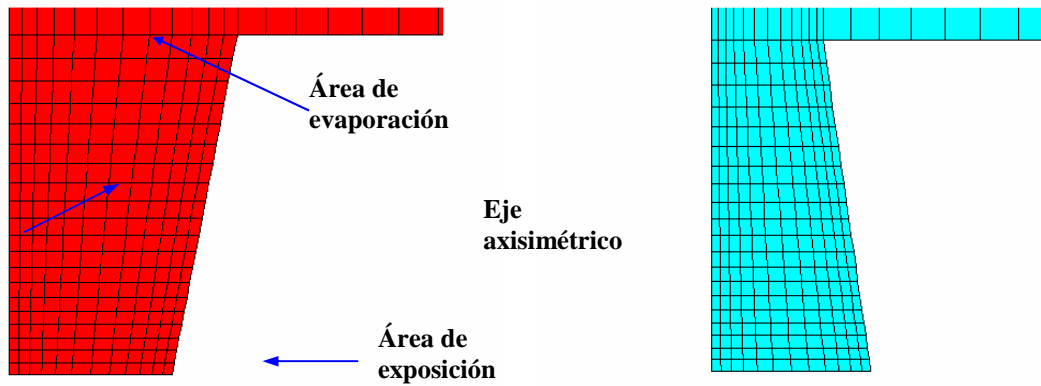


Figura 20.

Geometría simplificada utilizada para el diseño experimental computacional. Geometría tipo Balde, $A_{exp}/A_{evap} = 1.96$ (Izq.) y geometría tipo Cono Truncado, $A_{exp}/A_{evap} = 0.49$ (Der.).

Para determinar la conexión de la relación de áreas sobre la variable respuesta, se selecciono un estado o temperatura de trabajo de la sustancia y se mantuvo constante el área de evaporación cambiando únicamente el área de exposición. De esta forma se construye la curva tasa de evaporación versus relación de áreas. La figura 21 ilustra esta curva típica del sistema en estado estable, en esta se observa que para una relación de áreas igual a 0.49, la tasa de evaporación alcanza su punto máximo.

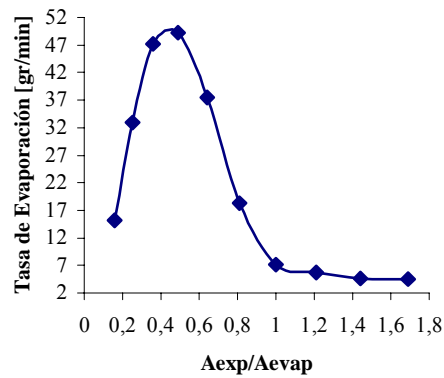


Figura 21.

Curva Tasa de Evaporación versus Relación de Áreas. Diámetro Evaporación = 5cm, Altura = 5.2cm. Vapor de agua a 90°C.

Del mismo modo se construyeron otras ocho curvas para una altura y área de evaporación diferente encontrando un comportamiento similar en forma y donde el punto de máxima de transferencia de

masa para todas las curvas existe cuando la relación de áreas se hace aproximadamente igual a 0.49. Es de anotar que el eje de las abscisas se definió como la relación de áreas para poder comparar las diferentes configuraciones geométricas y tener la posibilidad de encontrar un punto común que maximizara la variable respuesta, sin embargo es claro que la variable que se modifica en estas curvas es el diámetro de exposición mientras los otros parámetros permanecen constantes.

La figura 22 ilustra las curvas tasa de transferencia de masa por área de evaporación para diferentes diámetros, en esta se puede observar que si se mantiene la altura y la relación de áreas constante, la tasa de transferencia de masa por unidad de área de evaporación permanecerá invariable sin importar el valor del área de evaporación, y el valor máximo aparecerá cuando la relación A_{exp}/A_{evap} sea cercana a 0.49. También se construyeron curvas similares para otras alturas (4 y 6.4 cm) encontrando que las curvas se comportan de manera equivalente, no obstante al incrementar la altura se aumenta la tasa de evaporación por unidad de área, como se observa en la figura 22 al comparar las gráficas.

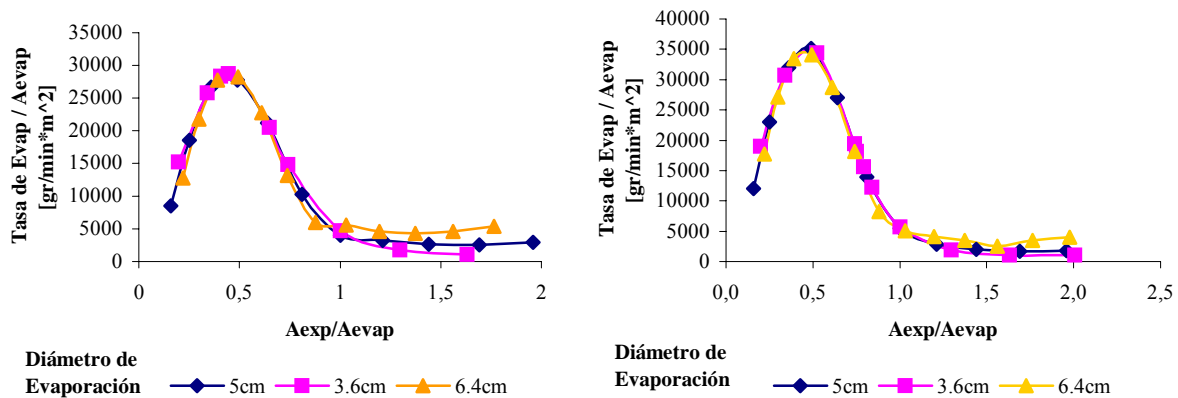


Figura 22.

*Tasa de Transferencia de Masa por área de evaporación versus Relación de Áreas.
 Altura =5.2cm. (Izq.) y Altura =6.4cm (Der.)*

Con base en los anteriores resultados se grafico la tasa de transferencia de masa por unidad de área contra el área de evaporación para un diámetro de exposición igual a 3.5 cm (ver figura 23), esta curva confirma el efecto observado del área de evaporación sobre la variable respuesta. Al aumentar el área de evaporación aumenta progresivamente la respuesta hasta cuando el área es igual a 0.002_m^2, posteriormente comienza a disminuir la tasa al aumentar el área. Si se calcula la

relación de áreas perteneciente a este máximo, encontramos que corresponde aproximadamente a 0.49, punto de máxima transferencia de masa descubierto anteriormente.

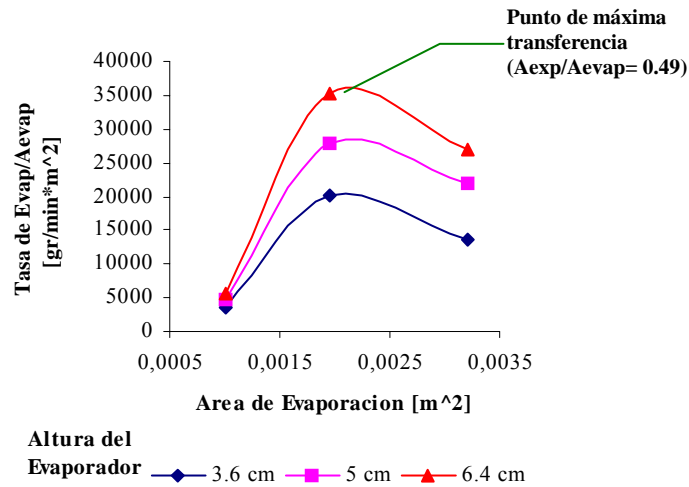


Figura 23.

Influencia del área de evaporación en la tasa de transferencia de masa. Diámetro de Exposición =3.5_cm. Varias alturas.

Al realizar un análisis adicional a la figura 23 se observa que para diferentes alturas, en el punto de máxima transferencia, la tasa de evaporación aumenta al incrementar la altura, pero las curvas no son paralelas, lo que muestra que el efecto de la altura depende de la relación de áreas, por ejemplo, cuando la relación de áreas es aproximadamente 1 ($A_{evap} \approx 0.001 \text{ m}^2$), la influencia de la altura es casi nula, pero cuando la relación es cercana a 0.3 ($A_{evap} \approx 0.0032 \text{ m}^2$) aunque el efecto de la altura es directamente proporcional a la tasa de evaporación, este factor no afecta en proporciones iguales a las tres curvas.

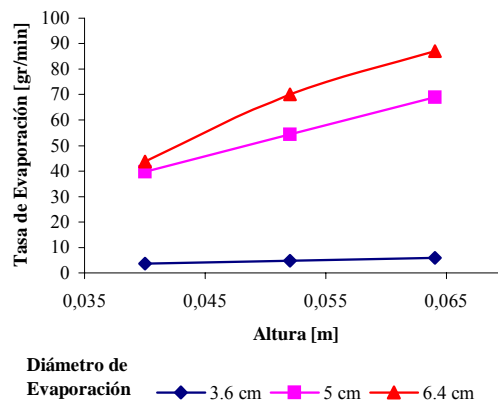


Figura 24.

Influencia de la altura en la tasa de evaporación. Diámetro de exposición =3.5_cm

Para determinar el efecto de la altura y teniendo en cuenta los anteriores resultados, se procedió a graficar la tasa de transferencia de masa contra la altura del evaporador para diferentes diámetros de evaporación. Un análisis preliminar sugiere que a mayor altura se aumenta la tasa de evaporación (ver figura 22) pero como se observa en las figuras 23 y 24 este aumento no es el mismo para cada uno de los diámetros de evaporación. En esta última figura nuevamente el efecto del incremento de la altura es despreciable cuando la relación de áreas es igual a 1 y es significativo para relaciones menores. Hasta ahora se ha encontrado que el efecto de la altura depende de la relación de áreas, pero no se ha establecido claramente como es esta relación, para determinar esto se utilizó nuevamente la herramienta computacional ya desarrollada para generar puntos adicionales donde se varía la altura manteniendo la relación de áreas constante, los resultados para tres relaciones de áreas diferentes se muestran en la figura 25. Esto permite concluir que para geometría en forma de *cono truncado* la altura es directamente proporcional a la tasa de transferencia de masa, no obstante la altura es inversamente proporcional si la geometría tiene una forma de *balde*, y al parecer no tiene una fuerte relación cuando el evaporador tiene una forma *cilíndrica*; mas adelante se retomara estas configuraciones geométricas para su análisis.

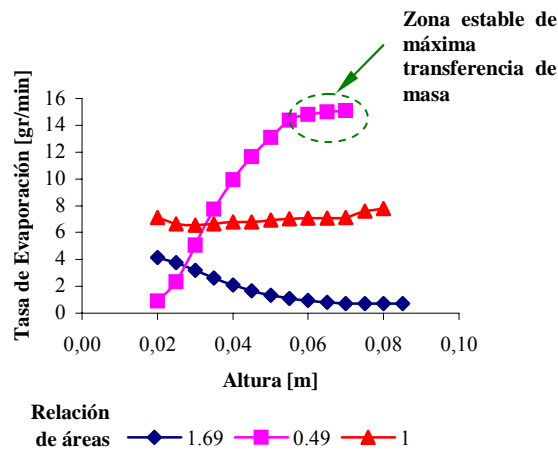


Figura 25

Tasa de Evaporación versus Altura para diferentes relaciones de área. Vapor de agua a 90°C.

3.4 CONSIDERACIONES FÍSICAS DE LOS RESULTADOS.

Determinar las causas físicas del efecto de los factores geométricos en la tasa de transferencia de masa es tan importante como los mismo resultados, ya que esto permite tener parámetros de acercamiento al estudio de los fenómenos de evaporación de sustancias a atmósfera abierta. En esta

sección se dará algunas explicaciones de la razón a la que se puede atribuir la acción de los ciertos valores geométricos sobre la variable respuesta.

En la figura 26 se indica esquemáticamente el efecto de la modificación del diámetro de evaporación (der.) y diámetro de exposición (izq.) manteniendo la altura constante para los dos casos, ilustrando la relación entre los valores numéricos simulados y la configuración geométrica obtenida. De la figura se reconoce la semejanza entre la forma (pluma) de las líneas de corriente que ocurren en ausencia de una frontera contigua (Véase 3.2.1 Distribución y forma de la respuesta) y la geometría que maximiza la tasa de transferencia de masa obtenida del análisis anterior (forma cono truncado, $A_{exp}/A_{evap}=0.49$), por lo tanto es posible pensar que esta geometría disminuye la oposición al flujo, al conducirlo de forma “natural” a través del recipiente, maximizando la variable respuesta.

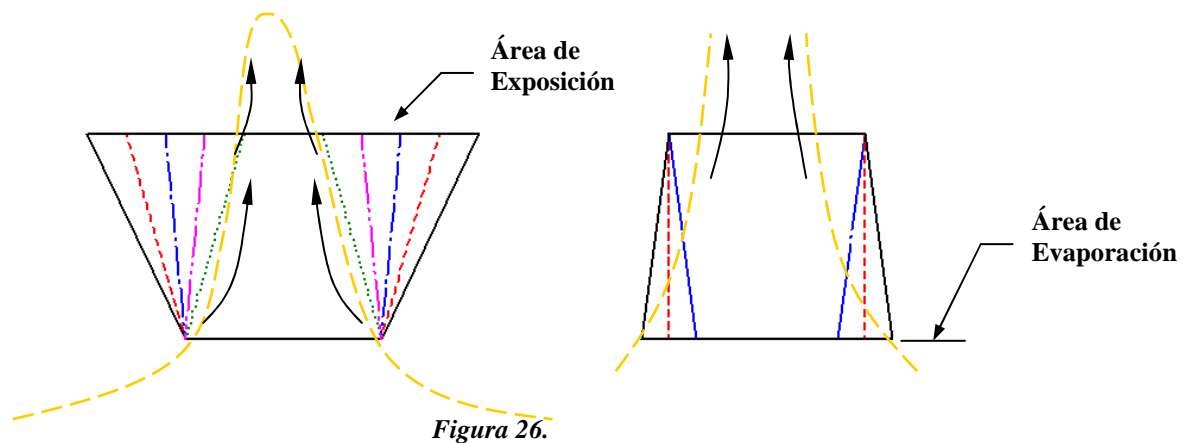


Figura 26.

Diagrama del cambio de relación de áreas y líneas de corriente. Diámetro de exposición variable (Izq.). Diámetro de evaporación para los puntos simulados: 3.6 cm , 5.0 cm y 6.4 cm (Der.).

La figura 27 describe el proceso geométrico que involucra el aumento de la altura para dos relaciones de áreas definidas; sus resultados computacionales se graficaron en la figura 29. Se observa que cuando la relación de áreas es igual a 0.49 (punto de máxima transferencia) al incrementar la altura, el ángulo entre la pared del evaporador y su base también aumenta, sin embargo este aumento se atenúa a medida que se incrementa la altura similarmente como ocurrió en la curva *Tasa de Evaporación vs. Altura* ilustrada en la figura 25, donde la respuesta no depende fuertemente de la altura cuando esta ha crecido apreciablemente (altura entre 0.06 m y 0.08 m). Caso contrario sucede cuando la relación de áreas es igual a 1.69 (punto de baja transferencia), en donde el ángulo disminuye al aumentar la altura y esta reducción también se atenúa a un gran incremento de la altura.

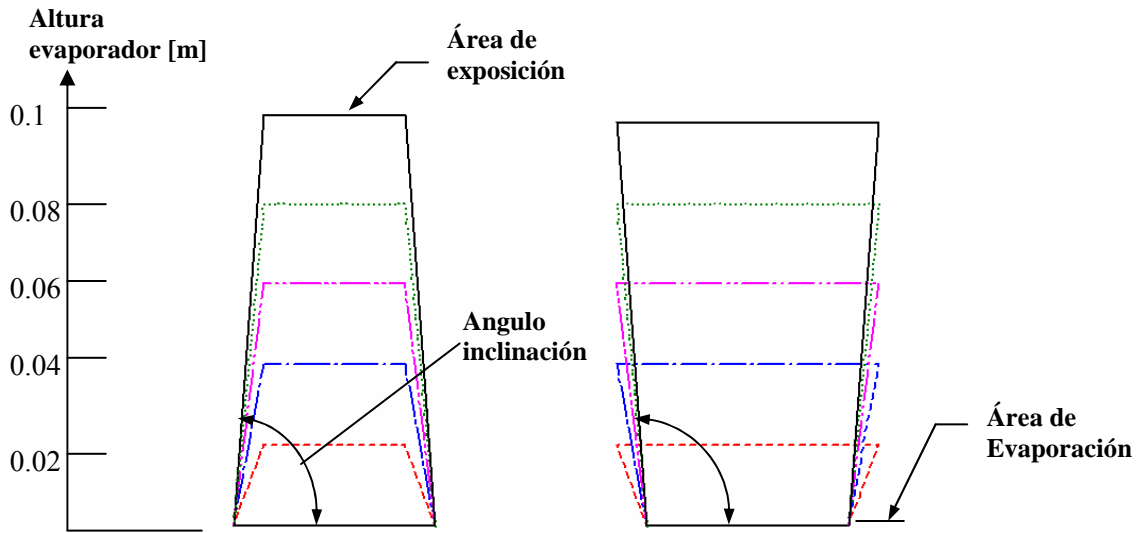


Figura 27.

Diagrama de cambio de la altura. $A_{exp}/A_{evap} = 0.49$ (Izq.) y $A_{exp}/A_{evap} = 1.69$. (Der.).

En la figura 28 se gráfica numéricamente el diagrama de cambio del ángulo con la altura, en esta se observa claramente que para una relación de áreas definida existe un vínculo entre las curvas: *Angulo versus Altura* y la mostrada en la figura 25: *Tasa de Evaporación versus Altura*. Por lo tanto se puede concluir que existe un comportamiento similar entre una variable geométrica (ángulo) y la respuesta del sistema (tasa de evaporación) para un mismo cambio en el parámetro altura.

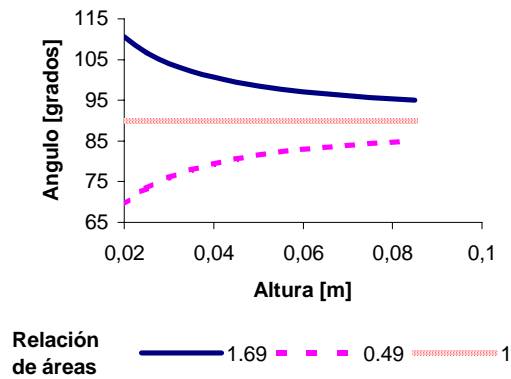


Figura 28.

Angulo de la pared del evaporador versus Altura, para diferentes relaciones de área.

3.5 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LOS RESULTADOS.

Debido a la dificultad para evaluar en su totalidad la inferencia de cada una de las variables geométricas y sus interacciones, se decidió adicionalmente realizar un análisis estadístico a los datos obtenidos por la experimentación computacional. El procedimiento que se siguió fue el determinar el grado del polinomio en que cada factor y sus interacciones afectan la variable respuesta y realizar las correspondientes curvas de superficie. Las conclusiones obtenidas confirman las ya encontradas, adicionalmente de mostrar otras características importantes entre la variable respuesta y los factores geométricos como son: una mayor influencia de la relación de áreas sobre la tasa de evaporación en comparación con la altura y un vínculo mas complejo entre las variables y la respuesta que el que se asumido previamente para facilitar su estudio.

Los datos obtenidos para esta matriz experimental principal se muestran en el anexo C.1. Para realizar el análisis estadístico se utilizo un programa de análisis de experimentos disponible en la Universidad de los Andes (MINITAB 13). Ahora se muestra los resultados con la metodología utilizada para la obtención de cada uno de ellos.

3.5.1 Análisis de la altura, el diámetro de evaporación y el diámetro de exposición.

Se realizo un análisis de varianza (ANOVA) para los tres factores de interés. Dado la limitante de ser un experimento factorial no replicado por que la naturaleza de la simulación reproduce los mismos valores para cada tratamiento (observación), la suma de los cuadrados de los tratamientos (SS_{T_r}) son iguales a la suma de los cuadrados totales (SS_T) y por lo tanto, no existe un valor explicito para el error. Para solucionar esto se agrupó la interacción de más alto grado (interacción triple) para conformar el error experimental, siguiendo las recomendaciones para el tratamiento del error [17]. Los resultados del ANOVA se muestran en el anexo D.1, en este se observa que los tres factores y las interacciones: Altura-diámetro de evaporación y diámetro de evaporación-diámetro de exposición, son significativos a un nivel de confianza del 95%.

Para estos efectos principales se realizó la descomposición ortogonal de sus polinomios con el fin de determinar el grado dependencia (lineal, cuadrático, etc) de cada uno de los factores e interacciones en la variable respuesta. El resultado de esta descomposición ortogonal se muestra en el anexo D.3. Con los polinomios significativos arrojados de la anterior descomposición se realiza un análisis de regresión para obtener una curva que se ajuste a la variable respuesta, obteniendo un

coeficiente de determinación (r^2) igual a 0.877, el resultado de esta regresión se muestra en el anexo D.2. Se puede decir con base en los anteriores análisis que los tres factores geométricos explican la tasa de transferencia de masa, adicionalmente los resultados muestran que la altura influye principalmente de manera lineal, mientras el diámetro de evaporación actúa de forma lineal y cuadrática y el diámetro de exposición afecta básicamente de manera cuadrática, por lo tanto se predice una influencia predominante del área representada por el término cuadrático del diámetro.

3.5.2 Análisis de la altura y la relación de áreas.

Con base en el anterior análisis se realizó el ANOVA para los factores Altura y Relación de Áreas, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones estadísticas:

- Es un experimento factorial no replicado, por lo tanto no existe un valor explícito para el error y consecuentemente se agrupa la interacción de más alto grado (interacción doble) para obtener una estimación del error experimental.
- El diseño experimental es balanceado para efectos fijos por lo tanto se selecciono solo un tercio de los datos de la matriz experimental principal con un diámetro de evaporación constante igual a 5 cm. Los datos se muestran en el anexo C.5.

Similarmente a la metodología empleada anteriormente se realizó el ANOVA para estos factores el cual se muestra en el anexo D.4, en este se observa que aunque ambos factores son significativos a un nivel de confianza del 95%, la suma de los cuadrados para la relación de áreas es aproximadamente 8 veces la de la altura, mostrando la predominante influencia de la relación de áreas sobre la variable respuesta. La descomposición ortogonal y el análisis de regresión se indican en los anexos D.5 y D.6, respectivamente, de estos se puede deducir que los factores relación de áreas y altura explican muy bien la variable la respuesta al obtenerse un coeficiente de determinación del 93.2%, superior al obtenido al incluir todos los parámetros geométricos de forma aislada.

3.5.3 Superficie de respuesta

La figura 29 muestra el efecto de los factores altura y relación de áreas sobre la tasa de transferencia de masa, como lo muestra la ecuación para la regresión de estos factores (Véase anexo D.6) es una superficie de un grado polinomial múltiple. En esta figura se observa claramente la zona de máxima transferencia de masa cercana a una relación de áreas de 0.49 y el bajo efecto cuantitativo de la altura sobre la variable respuesta.

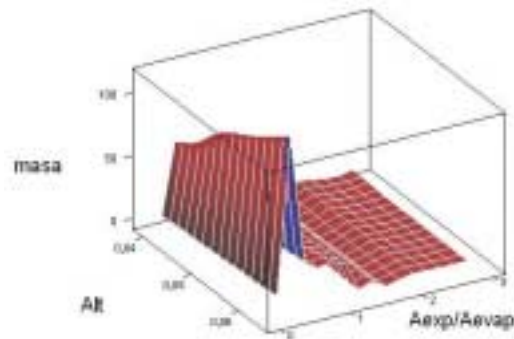


Figura 29.

Superficie de respuesta para los factores Altura y Relación de Áreas.

En la figura 30 se ilustra el efecto de la área de evaporación y la área de exposición sobre la tasa de transferencia de masa. Indicando la complejidad de la superficie de respuesta cuando se trata de analizar estos factores separadamente.

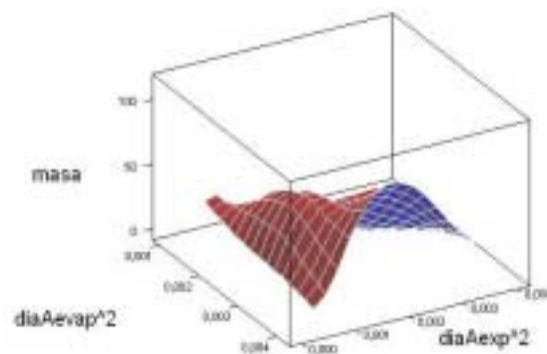


Figura 30.

Superficie de respuesta para los factores área de evaporación y área de exposición.

3.6 CONCLUSIONES DEL MODELO NUMÉRICO

Es evidente que hay una relación de áreas óptima generalizada ($A_{exp}/A_{evap} = 0.49$), para la cual el incremento de la altura tiene un efecto positivo en la tasa de transferencia de masa, alcanzando un punto de estabilidad máximo en la zona donde la altura tiene un valor entre 0.6 m y 0.8 m. Esto manteniendo condiciones de experimentación constantes en los parámetros ya mencionados como son: potencia eléctrica consumida y material del evaporador.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La industria floricultora colombiana usa los sublimadores de azufre como método de control del oidio, considerado como 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 inferior al 0.1% y que sus uso representa más del 50% de la energía eléctrica consumida. Estudios analíticos, experimentales y numéricos se han llevando a cabo para determinar las condiciones de operación y la geometría que maximizan la eficiencia térmica de los sublimadores y en general de cualquier dispositivo de evaporación a atmósfera abierta, por lo tanto con base en los análisis de los modelos matemáticos, del modelo numérico implementado en ANSYS/FLOTRAN CFD y de los datos experimentales disponibles [6], se puede concluir:

- ▲ El modelo analítico que comprende los procesos de evaporación esta determinado por la temperatura de trabajo de la sustancia e incluye tres mecanismos de transferencia diferentes, cada uno de los cuales tiene sus propias limitaciones y campos de acción propios de su origen físico. A temperaturas cercanas a la del ambiente esta gobernado por el mecanismo difusivo. El mecanismo de transferencia dominante a temperaturas inferiores a la de ebullición es el convectivo, siendo este también aplicable en la ebullición cuando la diferencia de temperaturas entre la superficie de calentamiento y la sustancia no es mayor a 5°C. Finalmente a la temperatura de ebullición, cuando la diferencia de temperaturas entre la superficie y la sustancia es superior a 5°C, esta gobernado por la ebullición nucleada, al existir un cambio de fase.
- ▲ La temperatura de operación optima se encuentra a temperaturas cercanas a la temperatura de ebullición de la sustancia.
- ▲ Los procesos de evaporación son fenómenos multifísicos y se deben analizar como tal integralmente, sin embargo el modelo analítico no permite la adicción de la totalidad de los fenómenos involucrados, ni una evaluación de la geométrica total del recipiente de sublimación, incluyendo únicamente su área de evaporación.
- ▲ La simulación numérica ofrece la posibilidad de analizar integralmente la fase característica de los procesos de evaporación. Sin embargo se debe prestar especial atención a las técnicas de

modelaje que garanticen un conjunto de geometría, enmallado, condiciones de frontera, número de iteraciones, etc., que asegure una respuesta confiable en estado estable.

- ▲ Existe una relación de áreas óptima para la evaporación de agua a 90°C y a las condiciones atmosféricas de Bogota cercana a 0.49, para la cual el incremento de la altura del evaporador tiene un efecto positivo en la tasa de transferencia de masa, encontrando un punto de estabilidad máximo para esta relación de áreas, cuando la altura alcanza valores entre 0.06 m y 0.08 m, sin embargo se mostró que en general el efecto de la altura depende de la relación de áreas. Se debe tener en cuenta que todo esto asumiendo condiciones de experimentación homogéneas.

Por último se presentan las sugerencias para dar continuidad al estudio y optimización de los procesos de evaporación de sustancias a atmósfera abierta:

- Realizar un análisis analítico adimensional con el objetivo de obtener modelos generalizados.
- Implementar una metodología de experimentación para evaporadores homogéneos en material, rugosidad, altura, cantidad y disposición de la resistencia y volumen que contiene la sustancia que no se ha evaporado. De esta forma se pueden obtener modelos donde solo se varía los parámetros geométricos y/o investigar el efecto de otros parámetros que hasta el momento se han asumidos constantes, como la rugosidad del material y la potencia eléctrica consumida.
- Realizar un análisis adicional con el propósito de determinar que repercusiones tienen algunos parámetros característicos del fenómeno de evaporación sobre la configuración geométrica óptima, como son un aumento de la presión de vapor dentro del recipiente, que ayuden a obtener otros criterios de optimización del proceso.
- Desarrollar un algoritmo numérico robusto para un análisis más generalizado a otras sustancias y condiciones de operación.

ANEXO A. DESARROLLO DEL MODELO ANALÍTICO

A.1. MODELO DIFUSIVO

Dado la multiplicidad de fenómenos involucrados (transporte de masa y de calor) su estudio se divide en dos partes; en la primera se realiza un balance de masa para obtener una relación conocida en literatura como ley de Stefan [8, 10, 11] y posteriormente un balance de energía aplicando las ecuaciones conservativas pertinentes [11, 12] para obtener las pérdidas de calor por difusión.

A.1.1 Balance de Masa

A continuación se enumeran las simplificaciones asumidas en la solución del problema, estas son las limitaciones que permiten hacer el manejo físico y algebraico de las ecuaciones conservativas, de ahí que sea primordial su estudio y entendimiento:

- Supuestos:
 1. Estado estable (SSSF).
 2. Condiciones de estancamiento (capa de aire dentro del recipiente, capa de agua dentro del recipiente).
 3. Líquido impermeable al agua.
 4. Temperatura y presión constantes. (Propiedades Físicas constantes)
 5. Líquido y vapor en equilibrio en la interfase (condiciones de vapor saturado)
 6. Aire y vapor de agua son gases ideales.
 7. Unidimensional 1-D.
 8. No hay fuerzas volumétricas, no existe campo gravitatorio.
 9. No hay transferencia de calor por radiación.
 10. No hay calentamiento por esfuerzos viscosos.
 11. Ligero movimiento de aire sobre la tapa del tanque pero no crea turbulencia

- Continuidad

La ecuación de conservación de masa en su forma general esta definida por la ecuación:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \bar{v} = 0$$

Realizando las simplificaciones necesarias se tiene si $\bar{v} = v\hat{i} + 0\hat{j} + 0\hat{k} \wedge \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ (SSSF)

$$\frac{d}{dx}(\rho v) = 0 \quad \Rightarrow \quad \rho v = f = cte = f_a + f_w$$

donde :

ρ = densidad de la mezcla

v = velocidad de la mezcla

f = flujo masico por unidad de área

$_a$ = subindice para el aire

$_w$ = subindice para vapor de agua

Nota: Se observa que al ser f constate, la tasa de evaporación también debe serlo, dadas las condiciones de estado estable y tratamiento unidimensional (área transversal uniforme).

- Conservación de Especies

La ecuación de conservación de especies en su forma general esta dada por la ecuación.

$$\underbrace{\frac{\partial \rho_i}{\partial t}}_{\text{Rata de acumulación de la especie } i} + \underbrace{\bar{v} \cdot \nabla \rho_i}_{\text{Flujo de masico de } i \text{ por convección}} = \underbrace{\bar{\nabla} \cdot (D_{AB} \cdot \nabla \rho_i)}_{\text{Flujo masico de } i \text{ por conducción}} + w_i$$

$$\Rightarrow \text{si } Y_i = \frac{\rho_i}{\rho} \Rightarrow$$

$$\frac{\partial Y_i}{\partial t} + \bar{v} \cdot \nabla Y_i = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (\rho D_{AB} \cdot \nabla Y_i) + \frac{w_i}{\rho}$$

si $\frac{\partial Y_i}{\partial t} = 0$ (SSSF) $\wedge w_i = 0$ (no hay combustión) \Rightarrow Para el aire tenemos :

$$\Rightarrow \rho v \cdot \frac{dY_a}{dx} - \frac{d}{dx} \left(\rho D_{AB} \cdot \frac{Y_a}{dx} \right) = 0 \quad \text{si } \rho v = cte = f \wedge \rho D_{AB} = cte (T \text{ y } P \text{ cte})$$

$$\frac{f}{\rho D} \cdot \frac{\partial Y_a}{\partial x} - \frac{\partial^2 Y_a}{\partial x^2} = 0 \quad (\text{A.E.1})$$

donde:

Y_i = Fracción másica de la sustancia i

D_{AB} = Coeficiente de difusión binaria

w_i = Rata másica de Destrucción – Formación de la sustancia i por unidad de volumen.

Para resolver ecuación diferencial (A.E.1) se hace el cambio de variable: $z = \frac{\partial Y_a}{\partial x}$ obteniendo:

$$\frac{f}{\rho D_{AB}} \cdot z = \frac{dz}{dx} \quad \text{resolviendo} \quad \int_0^x \frac{f}{\rho D_{AB}} dx = \int_{z_0}^z \frac{dz}{z}$$

$$\exp\left(\frac{f}{\rho D_{AB}} x\right) = \frac{z}{z_0} \cdot \exp(c) \quad \text{si } Z_0 = \frac{\exp(c)}{z_0} \Rightarrow z = Z_0 \exp\left(\frac{f}{\rho D_{AB}} x\right)$$

$$\Rightarrow \frac{dY_a}{dx} = Z_0 \exp\left(\frac{f}{\rho D_{AB}} x\right) \quad \text{nuevamente resolviendo tenemos:}$$

$$Y_{a,x} - Y_{a,0} = Z_0 \frac{\rho D_{AB}}{f} \left[\exp\left(\frac{f}{\rho D_{AB}} x\right) - 1 \right] \quad \text{calculando } Z_0 \text{ en las condiciones de frontera se obtiene:}$$

$$Y_{a,x} = Y_{a,0} + \frac{Y_{a,L} - Y_{a,0}}{\exp\left(\frac{f}{\rho D_{AB}} L\right) - 1} \left[\exp\left(\frac{f}{\rho D_{AB}} x\right) - 1 \right] \quad (\text{A.E.2})$$

Se observa que las incógnitas de la última ecuación son: $f = \text{fn}(T_0)$ y $Y_{a,0} = \text{fn}(T_0, P)$, por lo tanto es necesario su cálculo. Ahora partiendo nuevamente de la ecuación de conservación de especies para calcular f , se tiene para el aire:

$$\rho v \cdot \frac{dY_a}{dx} - \frac{d}{dx} \left(\rho D_{AB} \cdot \frac{Y_a}{dx} \right) = 0 \quad \text{si } \rho v = \text{cte} = f \quad \wedge \quad \rho D_{AB} = \text{cte} (T \text{ y } P \text{ cte})$$

$$\Rightarrow \frac{d}{dx} \left(\frac{f}{\rho D_{AB}} \cdot Y_a - \frac{dY_a}{dx} \right) = 0$$

$$\frac{f}{\rho D_{AB}} \cdot Y_a - \frac{dY_a}{dx} = \text{cte} = \frac{f}{\rho D_{AB}} \quad \text{Entonces si en } x = 0 \quad f_{\text{aire}} = 0$$

$$f = \frac{\rho D_{AB}}{Y_a} \cdot \frac{dY_a}{dx} \Rightarrow \quad \text{Separando variables e integrando se tiene:}$$

$$f = \frac{\rho D_{AB}}{L} \ln\left(\frac{Y_{a,L}}{Y_{a,0}}\right)$$

$$\text{dado que } Y_a = 1 - Y_w$$

Se obtiene una relación para f en función de la fracción másica de vapor de agua, conocida en la literatura como la Ley de Stefan.

$$f = \frac{\rho D}{L} \ln \left(\frac{1 - Y_{w,L}}{1 - Y_{w,0}} \right) \quad (\text{A.E.3})$$

Para obtener f en función de las presiones parciales basta recordar:

$$\begin{aligned} Y_{w,0} &= \frac{P_{w,0} M_w}{PM_{mix}} & P_{w,0} &= P_{sat@T_0} & M_{mix} &= \sum \frac{P_i}{P} M_i \\ Y_{w,L} &= \frac{P_{w,L} M_w}{PM_{mix}} & P_{w,L} &= \phi P_{sat@T_{amb}} \end{aligned} \quad (\text{A.E.4})$$

donde:

- P = presión total de la mezcla M_{mix} = masa molecular de la mezcla
- $P_{i,x}$ = Presión parcial de la sustancia i en x M_i = masa molecular de la sustancia i
- ϕ = Humedad específica del aire.

A.1.2 Balance de Energía

Se asumen los mismos supuestos dados en el balance de masa pero existe un gradiente de temperaturas, que permite la transferencia de calor.

- Conservación de Energía

$$\underbrace{\rho \frac{\partial e}{\partial t}}_{\text{Rata de incremento de energía}} = \underbrace{-\rho \bar{v} \cdot \nabla e}_{\text{Convección de energía}} - \underbrace{\nabla q}_{\text{Flujo de Energía por conducción}} \quad \text{donde } e \text{ representa energía}$$

$$\text{Si } \frac{\partial e}{\partial t} = 0 \text{ (SSSF)} \quad \Rightarrow \quad 0 = -f C_p \frac{dT}{dx} + k \frac{d^2 T}{dx^2}$$

donde:

- C_p = calor específico K = coeficiente de conductividad térmica

La ecuación anterior tiene la misma forma que la ecuación obtenida de conservación de especies (A.E.1), por lo tanto, la forma de la respuesta será la ya deducida para $Y_{a,x}$ (A.E.2).

Dado que las siguientes condiciones de frontera se cumplen: $x=0 \rightarrow T=T_0$ y $x=L \rightarrow T=T_{amb}$.

La respuesta para la temperatura es :

$$T_x = T_0 + \frac{T_L - T_0}{\exp\left(\frac{f C_p L}{k}\right) - 1} \left[\exp\left(\frac{f C_p}{k} x\right) - 1 \right]$$

$$\Rightarrow \text{si } q_{cond\ x=0} = KA \frac{dT}{dx}_{x=0} \quad \wedge \quad \text{si } \frac{dT}{dx}_{x=0} \neq 0 \quad (\text{para que ocurra el fenómeno de transcalor})$$

$$\Rightarrow q_{cond} = \frac{f C_p A (T_L - T_0)}{\exp\left(\frac{f C_p L}{K}\right) - 1} \quad (\text{A.E.5})$$

Recordando la naturaleza del análisis se desprecian las perdidas de calor por convección (ver ecuaciones 1-3), por lo tanto, la ecuación de eficiencia es la siguiente:

$$\eta = \frac{\dot{m} h_{fg}}{\dot{m} h_{fg} + q_{cond}} \quad \Rightarrow \quad \eta = \frac{1}{1 + \frac{q_{cond}}{\dot{m} h_{fg}}} \quad (\text{A.E.6})$$

Adicionando la ecuación (A.E.5) a la (A.E.6) se obtiene la siguiente relación para eficiencia térmica del mecanismo de transferencia difusivo:

$$\eta = \frac{1}{1 + \left\{ \frac{C_p (T_L - T_0)}{h_{fg}} \cdot \frac{1}{\left[\left(\frac{1 - Y_{w,L}}{1 - Y_{w,0}} \right)^{\frac{\rho D C_p}{K}} \right] - 1} \right\}} \quad (\text{A.E.6})$$

A.2 MODELO CONVECTIVO

Las ecuaciones que describen la transferencia de momentum y energía en convección natural se originan en los principios de conservación y ecuaciones de continuidad. Las ecuaciones que gobiernan la convección natural son [4]:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = g\beta(T - T_\infty) + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}$$

$$u \frac{\partial C_s}{\partial x} + v \frac{\partial C_s}{\partial y} = D_{AB} \frac{\partial^2 C_s}{\partial y^2}$$

donde

u = velocidad en la dirección x

v = velocidad en la dirección y

g = gravedad en sentido negativo en el eje y

β = Coeficiente de expansión térmico volumétrico. En gases ideales es $1/T$

T = Temperatura de la sustancia

T_∞ = Temperatura del medio

ν = Viscosidad cinemática

α = Coeficiente de difusividad térmica

C_s = Concentración molar de la sustancia que se evapora

D_{AB} = Coeficiente de Difusión entre A y B

Las dos primeras ecuaciones se refieren a la conservación de momentum en la dirección x , la tercera ecuación a la conservación de energía y la última es la ecuación de continuidad de especies. Haciendo un análisis dimensional de las tres primeras ecuaciones se obtiene el *número de Grashof* Gr_L (A.E.7) que cumple el mismo rol en convección natural que el *número de Reynolds* en convección forzada, a diferencia que el número de Grashof provee la relación de las fuerzas de flotación con las fuerzas viscosas que actúan sobre el fluido.

$$Gr_L = \frac{g\beta(T_0 - T_L)L^3}{\nu^2} \quad \text{donde } L = \text{longitud característica} \quad (\text{A.E.7})$$

A.2.1. Números Adimensionales [7]

- *Números adimensionales para la transferencia de calor*

$$Nu = \frac{hL}{K_f} = \frac{\partial T}{\partial y}_{y=0}$$

(Número de Nusel). Gradiente de temperatura adimensional en la superficie y proporciona una medida de la transferencia de calor por convección que ocurre en la superficie.

$Pr = \frac{C_p \mu}{K} = \frac{\nu}{\alpha}$	(Número de Prandtl). Razón de la difusividad de momento ν a la difusividad térmica α .
• <i>Números adimensionales para la transferencia de masa</i>	
$Sh = \frac{h_m L}{D_{AB}}$	(Número de Sherwood). Gradiente de concentración adimensional en la superficie.
$Sc = \frac{\nu}{D_{AB}}$	(Número de Schmidt). Razón de la difusividad de momento ν a la difusividad másica.
$Ra_L = Gr Pr$	(Número de Rayleigh). Magnitud relativa de las fuerzas de empuje y viscosas en el fluido.
• <i>Número adimensional para la transferencia de calor y masa</i>	
$Le = \frac{\alpha}{D_{AB}} = \frac{Sc}{Pr}$	(Número de Lewis). Razón de la difusividad térmica y de masa.

A.2.2. Analogía entre transferencia de masa y calor

Existe una fuerte analogía entre la naturaleza de los fenómenos de transferencia de masa y de calor por la similitud de las ecuaciones adimensionales que los gobiernan, esto a causa de que en las ecuaciones conservativas involucradas en el proceso (conservación de especies y energía) poseen términos de difusión y convección de la misma forma. En consecuencia, las relaciones de transferencia de calor y masa para una geometría particular son intercambiables y los coeficientes de convección se relacionan por medio de la siguiente ecuación:

$$\frac{\overline{Nu}}{Pr^n} = \frac{\overline{Sh}}{Sc^n} \Rightarrow \frac{\overline{h}}{h_m} = \frac{K}{D_{AB} Le^n} = \rho C_p (Le)^{1-n} \quad \text{donde } n = \frac{1}{3} \quad (\text{A.E.8})$$

La aplicación de esta relación tiene las siguientes limitaciones que se resumen a continuación [9]:

- Las condiciones de flujo y geometría debe ser iguales.
- Se desprecia el efecto de transferencia entre especies.
- Ausencia de reacción química
- Las condiciones de frontera también deben ser análogas

A.2.3 Coeficientes de transferencia de masa y calor

Buscando en la literatura [8] las correlaciones para la geometría y las condiciones de flujo y frontera, se encuentra para placas horizontales de sección circular la siguiente correlación:

$$\overline{Nu}_D = 0.82 Ra_D^{1/5} Pr^{0.034} \quad \text{donde } D = \text{Diámetro} \quad (\text{A.E.9})$$

$$\Rightarrow \text{si } \overline{Nu}_D = \frac{\bar{h}d}{K} \Rightarrow \bar{h} = \frac{\overline{Nu}_D K}{d} = 0.82 Ra_D^{1/5} Pr^{0.034} \frac{K}{d}$$

Reemplazando las ecuaciones anteriores y realizando las simplificaciones algebraicas necesarias tenemos:

$$\bar{h} = 0.82 \frac{K}{d} \left[\frac{g \frac{1}{T_{prom}} (T_0 - T_L) \cdot d^3}{\nu \alpha} \right]^{1/5} \left(\frac{\nu}{\alpha} \right)^{0.034} \quad \text{donde } T_{prom} = \frac{T_0 + T_L}{2}$$

$$\bar{h} = \frac{0.94}{d^{0.4}} \cdot \frac{K}{\alpha^{0.234} \nu^{0.166}} \left[\frac{g(T_0 - T_L)}{(T_0 + T_L)} \right]^{0.2} \quad (\text{A.E.10})$$

Partiendo de la relación entre los coeficientes de masa y calor (A.E.8), obtenida de la analogía entre los fenómenos se sabe:

$$\bar{h}_m = \frac{\bar{h}}{K_f} D_{AB}^{2/3} \alpha^{1/3}$$

Nuevamente realizando manipulación algebraica y reemplazando, se obtiene una relación para el coeficiente de convección másico:

$$\bar{h}_m = \frac{0.94}{d^{0.4}} \left[\frac{g(T_0 - T_L)}{(T_0 + T_L)} \right]^{0.2} \frac{D_{AB}^{2/3} \alpha^{0.1}}{\nu^{0.166}} \quad (\text{A.E.11})$$

ANEXO B. TUTORIAL SIMPLIFICADO PARA LA SIMULACIÓN DEL PROCESO DE EVAPORACIÓN EN ESTADO ESTABLE DE AGUA A CONDICIONES ATMOSFÉRICAS DE BOGOTA.

A continuación se presenta la lista de comandos con su explicación correspondiente para la implementación de un archivo de texto de extensión .lgw o .log. Este puede ser leído como entrada en el programa ANSYS 5.5.

```

/BATCH
/FILNAM,Evaporador
/TITLE,Evaporador
/NOPR
/PMETH,OFF
KEYW,PR_SET,1
KEYW,PR_STRUC,0
KEYW,PR_THERM,0
KEYW,PR_FLUID,0
KEYW,PR_ELMAG,0
KEYW,MAGNOD,0
KEYW,MAGEDG,0
KEYW,MAGHFE,0
KEYW,MAGELC,0
KEYW,PR_MULTI,0
KEYW,PR_CFD,1
/GO
! /COM,Preferences for GUI filtering have been set to display:
! /COM, FLOTRAN CFD
/PREP7

```

!!!*ANALISIS PRELIMINAR

```
ET,1,FLUID141!!!*Definición del tipo de elemento
```

!!!*Define multiples especies y análisis axisimétrico.

```
KEYOPT,1,1,2
KEYOPT,1,3,1
KEYOPT,1,4
```

!!!*Para trabajar en SI y visualizar mejor los resultados
wpstyle,0.0005,0.0001,-1,1,0.00005,0,2,,5

!!!*Caraterización del Problema

```
FLDATA1,SOLU,TRAN,0 !!!Estado Estable
FLDATA1,SOLU,FLOW,1 !!!Estado Estable
FLDATA1,SOLU,TEMP,1 !!!Análisis Térmico
FLDATA1,SOLU,TURB,1 !!!Flujo Turbulento
FLDATA1,SOLU,COMP,0 !!!Incompresible
FLDATA1,SOLU,SWRL,1 !!!Modelo axisimétrico. Calcula Vz
FLDATA1,SOLU,SPEC,1 !!!Múltiples Especies
```

IM-2002-II-23

```
!!! Primeras iteraciones para evitar no convergencia en la solución
FLDATA2,ITER,EXEC,7,
FLDATA2,ITER,OVER,7,
FLDATA2,ITER,APPE,0,
FLDATA3,TERM,VX,0.01,
FLDATA3,TERM,VY,0.01,
FLDATA3,TERM,VZ,0.01,
FLDATA3,TERM,PRES,1e-008,
FLDATA3,TERM,TEMP,1e-008,
FLDATA3,TERM,ENKE,0.01,
FLDATA3,TERM,ENDS,0.01,
FLDATA5,OUTP,SUMF,7,
```

```
!!!*ESTADO DE LAS SUSTANCIAS y PROPIEDADES
```

```
!!!Sustancia 1: vapor de agua
temp1=363
psat1=70139
dens1=0.4187
visc1=1.16e-5
cond1=2.40e-2
calo1=1.99293e3
Dab=4.894e-5
shml=visc1/(dens1*Dab)
!!!Sustancia 2: aire seco
temp2=288
psat2=75000
dens2=9.07e-1
visc2=1.788e-5
cond2=2.53e-2
calo2=1.006e3
shm2=visc2/(dens2*Dab)
pmass=0.9          !fracción masica de vapor de agua
```

```
!!!Definiendo propiedades fluido en general
```

```
FLDATA12,PROP,DENS,15
FLDATA13,VARY,DENS,1
FLDATA12,PROP,VISC,15
FLDATA13,VARY,VISC,1
FLDATA12,PROP,COND,15
FLDATA13,VARY,COND,0
FLDATA12,PROP,SPHT,15
FLDATA13,VARY,SPHT,0
FLDATA7,PROT,DENS,CMIX
FLDATA8,NOMI,DENS,-1
FLDATA9,COF1,DENS,0
FLDATA10,COF2,DENS,0
FLDATA11,COF3,DENS,0
FLDATA7,PROT,VISC,CMIX
FLDATA8,NOMI,VISC,-1
FLDATA9,COF1,VISC,0
FLDATA10,COF2,VISC,0
FLDATA11,COF3,VISC,0
FLDATA12,PROP,IVIS
FLDATA7,PROT,COND,CMIX
FLDATA8,NOMI,COND,-1
FLDATA9,COF1,COND,0
FLDATA10,COF2,COND,0
FLDATA11,COF3,COND,0
FLDATA7,PROT,SPHT,CMIX
```

IM-2002-II-23

```

FLDATA8,NOMI,SPHT,-1
FLDATA9,COF1,SPHT,0
FLDATA10,COF2,SPHT,0
FLDATA11,COF3,SPHT,0

KEYOPT,1,1,2,      !!!*Define múltiples especies
MSDATA,1,8314.29, !!!*Define constante universal de los gases

!!!Definiendo propiedades de la especie 1
MSSPEC,1,SP01,18.2,shm1,      !propiedades generales
MSQUAD,1,0,0,
MSNOMF,1,0,      !fracción másica inicial de vapor de agua
MSPROP,1,DENS,GAS,dens1,temp1,psat1
MSVARY,1,DENS,1
MSPROP,1,VISC,CONSTANT,visc1,temp1,0,0,
MSVARY,1,VISC,1
MSPROP,1,COND,CONSTANT,cond1,temp1,0,0,
MSVARY,1,COND,1
MSPROP,1,SPHT,CONSTANT,calo1,
MSPROP,1,MDIF,CONSTANT,Dab,0,0,0,
MSVARY,1,MDIF,0

!!!Definiendo propiedades especie 2
MSSPEC,2,SP02,29,shm2,      !propiedades generales
MSQUAD,2,0,0,
MSNOMF,2,1,      !fracción másica inicial de aire
MSPROP,2,DENS,GAS,dens2,temp2,psat2,0,
MSVARY,2,DENS,1
MSPROP,2,VISC,CONSTANT,visc2,temp2,0,0,
MSVARY,2,VISC,1
MSPROP,2,COND,CONSTANT,cond2,temp2,0,0,
MSVARY,2,COND,1
MSPROP,2,SPHT,CONSTANT,calo2,
MSPROP,2,MDIF,CONSTANT,Dab,0,0,0,
MSVARY,2,MDIF,0

!!!* Aceleración de la gravedad
ACEL,0,9.81,0,

!!!* Tipo de solución para los cálculos de presión
FLDATA18,METH,PRES,1
FLDATA19,TDMA,PRES,100,
KEYOPT,1,1,2,
MSDATA,1,8314.29,

!!!*CONSTRUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA SIMPLIFICADA Y ENMALLADO

!!!*Parámetros geométricos
ancho=0.12+0.15
techo=1
boca=0.035/2 !diámetro área exposición
base=0.05/2  !diámetro área evaporación
alto=0.052

!!!*Generación de los puntos para la geometría simplificada
K,1,0,0,0,
K,2,base,0,0,
K,3,0,alto,0,
K,4,boca,alto,0,
K,5,boca+ancho,alto,0,
K,6,0,alto+techo,0,

```

IM-2002-II-23

K,7,boca,alto+techo,0,
K,8,boca+ancho,alto+techo,0,

```
!!!*Generación de las líneas
L,1,2 !LINEA 1 evaporación
L,1,3 !LINEA 2 eje axisimétrico
L,2,4 !LINEA 3 pared
L,3,4 !LINEA 4 exposición
L,4,5 !LINEA 5 pared inferior atmósfera
L,3,6 !LINEA 6 eje axisimétrico
L,4,7 !LINEA 7 línea auxiliar para enmallado
L,5,8 !LINEA 8 pared lateral atmósfera
L,6,7 !LINEA 9 pared superior atmósfera
L,7,8 !LINEA 10 pared superior atmósfera
```

!!!*Generación de áreas

```
FLST,2,4,3
FITEM,2,1
FITEM,2,3
FITEM,2,4
FITEM,2,2
A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,3
FITEM,2,6
FITEM,2,7
FITEM,2,4
A,P51X
FLST,2,4,3
FITEM,2,4
FITEM,2,7
FITEM,2,8
FITEM,2,5
A,P51X
```

!!!Dividiendo líneas para malla

```
FLST,5,3,4,ORDE,3
FITEM,5,1
FITEM,5,4
FITEM,5,9
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL, ,_Y
LESIZE,_Y1, , ,12,-2,
CMDEL, _Y
CMDEL, _Y1
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,2
FITEM,5,-3
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL, ,_Y
LESIZE,_Y1, , ,20,2,
CMDEL, _Y
CMDEL, _Y1
FLST,5,3,4,ORDE,2
FITEM,5,6
FITEM,5,-8
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
```

IM-2002-II-23

```

CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1,,35,10,
CMDEL,_Y
CMDEL,_Y1
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,5
FITEM,5,10
CM,_Y,LINE
LSEL,, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
LESIZE,_Y1,,25,5,
CMDEL,_Y
CMDEL,_Y1

```

```

!!!Enmallando
MSHAPE,0,2D
MSHKEY,1
FLST,5,4,5,ORDE,2
FITEM,5,1
FITEM,5,-4
CM,_Y,AREA
ASEL,, , ,P51X
CM,_Y1,AREA
CHKMSH,'AREA'
CMSEL,S,_Y
AMESH,_Y1
CMDEL,_Y
CMDEL,_Y1
CMDEL,_Y2

```

!!!*CONSIDERACIONES DE SIMULACIÓN

!!!Condiciones de Frontera iniciales

```

FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,3
FITEM,5,5
CM,_Y,LINE
LSEL,R, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,S,_Y
CMDEL,_Y
DL,_Y1,,VX,0,1          !!!Velocidad nula en la pared y flujo externo
DL,_Y1,,VY,0,1
DL,_Y1,,VZ,0,1
CMDEL,_Y1
FLST,5,2,4,ORDE,2
FITEM,5,2
FITEM,5,6
CM,_Y,LINE
LSEL,R, , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,S,_Y
CMDEL,_Y
DL,_Y1,,VX,0,1          !!!Velocidad en x=0 para el eje de asimetría
CMDEL,_Y1
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,1
CM,_Y,LINE
LSEL,R, , ,P51X

```


IM-2002-II-23

```

CM,_Y1,LINE
CMSEL,S,_Y
CMDEL,_Y
DL,_Y1, ,SP01,pmass,1      !!!Fracciones másicas en la área de evaporación
DL,_Y1, ,SP02,1-pmass,1
CMDEL,_Y1
FLST,2,3,4,ORDE,2
FITEM,2,8
FITEM,2,-10
DL,P51X, ,PRES,0,1      !!!Presión atmosférica en las fronteras del "cuarto"

!!!Solución
SOLVE
FINISH

/SOLU
!!! Iteraciones para lograr convergencia con análisis térmico
! /COM,,Steady State Analysis,0
FLDATA2,ITER,EXEC,200,      !Numero de iteraciones, de acuerdo la formula #nodos/10
FLDATA2,ITER,OVER,200,
FLDATA2,ITER,APPE,0,
FLDATA3,TERM,VX,0.01,
FLDATA3,TERM,VY,0.01,
FLDATA3,TERM,VZ,0.01,
FLDATA3,TERM,PRES,1e-008,
FLDATA3,TERM,TEMP,1e-008,
FLDATA3,TERM,ENKE,0.01,
FLDATA3,TERM,ENDS,0.01,
FLDATA5,OUTP,SUMF,30,

!!!Temperatura
FLST,2,1,4,ORDE,1
FITEM,2,1
DL,P51X, ,TEMP,temp1,0
!!!Solución final
SOLVE
FINISH

!!!*RESULTADOS CALCULO TASA DE TRANSFERENCIA DE MASA

!!!*Visualización de resultados
FLST,2,2,1
FITEM,2,19      !Puntos de medición de los perfiles de velocidad y fracciones másica
FITEM,2,51
/POST1
SET,LAST
PATH,sp01,2,30,20,
PPATH,P51X,1
PDEF,STAT
!!!* Perfil de velocidades
PDEF,velocity,V,Y,AVG
!!!* Perfil de fracciones másicas
PDEF,sp01,SP01, ,AVG

```

ANEXO C. DATOS OBTENIDOS POR SIMULACIÓN NUMÉRICA PARA LA EVAPORACIÓN DE AGUA.

C.1 DATOS PARA 90°C Y LAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS DE BOGOTA.

Cada observación se produjo de acuerdo a los parámetros y niveles de la tabla 3 para la geometría simplificada.

Altura	diaAevap	diaAexp	mpunto
[m]	[m]	[m]	[gr/min]
0,04	0,036	0,02	19,94
0,04	0,036	0,025	20,40
0,04	0,036	0,03	9,77
0,04	0,036	0,035	3,63
0,04	0,036	0,04	1,98
0,04	0,036	0,045	1,67
0,04	0,036	0,05	1,88
0,04	0,036	0,055	2,44
0,04	0,036	0,06	3,16
0,04	0,05	0,02	6,71
0,04	0,05	0,025	23,33
0,04	0,05	0,03	38,53
0,04	0,05	0,035	39,70
0,04	0,05	0,04	26,74
0,04	0,05	0,045	12,15
0,04	0,05	0,05	8,81
0,04	0,05	0,055	7,36
0,04	0,05	0,06	7,14
0,04	0,064	0,02	5,14
0,04	0,064	0,025	5,74
0,04	0,064	0,03	14,54
0,04	0,064	0,035	43,85
0,04	0,064	0,04	63,83
0,04	0,064	0,045	65,05
0,04	0,064	0,05	50,17
0,04	0,064	0,055	29,30
0,04	0,064	0,06	19,52
0,052	0,036	0,02	26,24
0,052	0,036	0,025	29,19
0,052	0,036	0,03	20,89
0,052	0,036	0,035	4,83
0,052	0,036	0,04	1,80
0,052	0,036	0,045	1,14
0,052	0,036	0,05	1,18
0,052	0,036	0,055	1,40
0,052	0,036	0,06	1,69
0,052	0,05	0,02	16,78
0,052	0,05	0,025	36,44
0,052	0,05	0,03	52,28
0,052	0,05	0,035	54,52
0,052	0,05	0,04	41,49
0,052	0,05	0,045	20,24
0,052	0,05	0,05	7,97
0,052	0,05	0,055	6,36
0,052	0,05	0,06	5,11
0,052	0,064	0,02	7,76
0,052	0,064	0,025	13,72
0,052	0,064	0,03	40,97
0,052	0,064	0,035	70,13
0,052	0,064	0,04	89,26
0,052	0,064	0,045	90,83
0,052	0,064	0,05	73,26
0,052	0,064	0,055	42,35
0,052	0,064	0,06	19,09
0,064	0,036	0,02	31,26
0,064	0,036	0,025	35,06
0,064	0,036	0,03	19,77
0,064	0,036	0,035	5,81
0,064	0,036	0,04	1,98
0,064	0,036	0,045	1,04
0,064	0,036	0,05	1,08
0,064	0,036	0,055	1,17
0,064	0,036	0,06	1,31
0,064	0,05	0,02	23,62
0,064	0,05	0,025	45,09
0,064	0,05	0,03	62,70
0,064	0,05	0,035	69,03
0,064	0,05	0,04	53,05
0,064	0,05	0,045	27,37
0,064	0,05	0,05	10,82
0,064	0,05	0,055	5,55
0,064	0,05	0,06	3,94
0,064	0,064	0,02	10,92
0,064	0,064	0,025	28,65
0,064	0,064	0,03	56,92
0,064	0,064	0,035	87,12
0,064	0,064	0,04	107,54
0,064	0,064	0,045	109,52
0,064	0,064	0,05	92,49
0,064	0,064	0,055	58,30
0,064	0,064	0,06	26,40

C.2 DATOS PARA CAMBIO DE LA TEMPERATURA A LAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS DE BOGOTA.

Estas observaciones se produjeron para la geometría simplificada y los siguientes parámetros geométricos: Altura =5.2_cm, diámetro de evaporación =5_cm y diámetro de exposición =5_cm.

Temperatura [°C]	mpunto [gr/min]	Temperatura [°C]	mpunto [gr/min]
80	4,87	70	3,16
	11,42		3,67
	17,00		5,56
	18,43		6,07
	14,88		4,89
	7,70		2,53
	3,06		1,03
	2,10		0,66
	1,77		0,60
	1,70		0,59
	1,95		0,68
	2,36		0,82

C.3 DATOS PARA EL CAMBIO DE LA PRESIÓN ATMOSFERICA.

Estas observaciones se obtuvieron para la geometrías indicadas y las dimensiones geométricas establecidas en la tabla 1. Las condiciones atmosféricas de Bogota se asumieron a una presión igual a 75_kpa y una temperatura de 15_°C.

Condiciones atmosféricas de Bogota			Condiciones atmosféricas Estándar	
Temperatura de Trabajo	Geometría		Temperatura de Trabajo	Geometría
	Balde	Jarrón		Balde
	mpunto	mpunto		mpunto
[°C]	[gr/min]	[gr/min]	[°C]	[gr/min]
30	0,00134	0,0052	30	0,0005
35	0,00300	0,0117	35	0,0015
40	0,00548	0,0246	40	0,0034
45	0,01185	0,0487	45	0,0068
50	0,02176	0,0922	50	0,0130
55	0,03403	0,1717	55	0,0238
60	0,06032	0,3119	60	0,0419
65	0,10283	0,5573	65	0,0722
70	0,17143	0,9792	70	0,1216
75	0,33430	1,7027	75	0,2009
80	0,52165	2,9277	80	0,3255
85	0,90801	4,9292	85	0,5227
90	1,68985	7,6353	90	0,8248
			95	1,2856
			100	1,9339

C.4 DATOS PARA EL CAMBIO DE LA ALTURA DEL EVAPORADOR A LAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS DE BOGOTA.

Estas observaciones se lograron para la geometría simplificada, un diámetro de evaporación =5_cm y una temperatura de trabajo igual a 90°C.

Altura	diaAexp	mpunto
[m]	[m]	[gr/min]
0,020	0,05	7,10
0,025	0,05	6,66
0,030	0,05	6,53
0,035	0,05	6,62
0,040	0,05	6,77
0,045	0,05	6,76
0,050	0,05	6,93
0,055	0,05	7,02
0,060	0,05	7,06
0,065	0,05	7,07
0,070	0,05	7,12
0,075	0,05	7,60
0,080	0,05	7,80

Altura	diaAexp	mpunto
[m]	[m]	[gr/min]
0,020	0,035	0,89
0,025	0,035	2,32
0,030	0,035	5,05
0,035	0,035	7,74
0,040	0,035	9,92
0,045	0,035	11,65
0,050	0,035	13,10
0,055	0,035	14,37
0,060	0,035	14,80
0,065	0,035	15,00
0,070	0,035	15,10

Altura	diaAexp	mpunto
[m]	[m]	[gr/min]
0,020	0,065	4,14
0,025	0,065	3,79
0,030	0,065	3,22
0,035	0,065	2,62
0,040	0,065	2,09
0,045	0,065	1,65
0,050	0,065	1,33
0,055	0,065	1,11
0,060	0,065	0,94
0,065	0,065	0,81
0,070	0,065	0,72
0,075	0,065	0,69
0,080	0,065	0,70
0,085	0,065	0,71

C.5 DATOS ALTURA Y RELACIÓN DE ÁREAS A 90°C Y A LAS CONDICIONES ATMOSFÉRICAS DE BOGOTA.

Cada observación se produjo para la geometría simplificada y un diámetro de evaporación constante igual a 5 cm.

Altura	Aexp/Aevap	mpunto
[m]	[m]	[gr/min]
0,04	0,16	6,71
0,04	0,25	23,33
0,04	0,36	38,53
0,04	0,49	39,70
0,04	0,64	26,74
0,04	0,81	12,15
0,04	1	8,81
0,04	1,21	7,36
0,04	1,44	7,14

Altura	Aexp/Aevap	mpunto
[m]	[m]	[gr/min]
0,052	0,16	16,78
0,052	0,25	36,44
0,052	0,36	52,28
0,052	0,49	54,52
0,052	0,64	41,49
0,052	0,81	20,24
0,052	1	7,97
0,052	1,21	6,36
0,052	1,44	5,11

Altura	Aexp/Aevap	mpunto
[m]	[m]	[gr/min]
0,064	0,16	23,62
0,064	0,25	45,09
0,064	0,36	62,70
0,064	0,49	69,03
0,064	0,64	53,05
0,064	0,81	27,37
0,064	1	10,82
0,064	1,21	5,55
0,064	1,44	3,94

ANEXO D. TABLAS Y RESULTADOS DEL ANÁLISIS ESTADÍSTICO.

D.1 ANOVA PARA LOS FACTORES: ALTURA, DIÁMETRO DE EVAPORACIÓN Y DIÁMETRO DE EXPOSICIÓN.

Factor	Type	Levels	Values
Alt	fixed	3	0,040 0,052 0,064
diaAevap	fixed	3	0,036 0,050 0,064
diaAexp	fixed	9	0,020 0,025 0,030 0,035 0,040 0,045 0,050 0,055 0,060

Analysis of Variance for masa

Source	DF	SS	MS	F	P
Alt	2	3679,5	1839,7	58,30	0,000 (*)
diaAevap	2	21364,0	10682,0	338,50	0,000 (*)
diaAexp	8	10233,7	1279,2	40,54	0,000 (*)
Alt*diaAevap	4	1722,9	430,7	13,65	0,000 (*)
Alt*diaAexp	16	894,2	55,9	1,77	0,083
diaAevap*diaAexp	16	24237,4	1514,8	48,00	0,000 (*)
Error	32	1009,8	31,6		
Total	80	63141,5			

D.2 AJUSTE DE LA CURVA RESPUESTA POR MEDIO DE UN ANÁLISIS DE REGRESIÓN

The regression equation is

$$\begin{aligned} \text{masa} = & -110 - 1356 \text{ Alt} + 14864 \text{ diaAevap} - 279238 \text{ diaAevap}^2 + 96638 \text{ diaAexp}^2 \\ & + 40858 \text{ Alt L*diaAevap L} - 461356 \text{ diaAevap L*diaAexp L} \\ & + 837268 \text{ diaAevap L*diaAexp Q} + 10869435 \text{ diaAevap Q*diaAexp L} \\ & - 80103453 \text{ diaAevap Q*diaAexp Q} \end{aligned}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-109,56	65,60	-1,67	0,099
Alt	-1356,1	532,0	-2,55	0,013
diaAevap	14864	2821	5,27	0,000
diaAevap	-279238	33080	-8,44	0,000
diaAexp^	96638	28993	3,33	0,001
Alt L*di	40858	10372	3,94	0,000
diaAevap	-461356	66988	-6,89	0,000
diaAevap	837268	1461601	0,57	0,569
diaAevap	10869435	1197239	9,08	0,000
diaAevap	-80103453	18987886	-4,22	0,000

S = 10,46 R-Sq = 87,7% R-Sq(adj) = 86,1%

D.3 DESCOMPOSICIÓN ORTOGONAL DE LOS FACTORES E INTERACCIONES PRINCIPALES.

Se indica la tabla ANOVA para la descomposición y adicionalmente se muestra una tabla del F teórico. El signo * representa que el efecto es significativo a un nivel de confianza del 95% (1- α).

Fuente de Variación	SS	GL	MS	Fo
Alt	3679,40	2	1839,70	46,38
Alt L	3667,52	1	3667,52	92,46 *
Alt Q	11,88	1	11,88	0,30
diaAevap	21364,01	2	10682,00	269,29
diaAevap L	20127,84	1	20127,84	507,42 *
diaAevap Q	1236,17	1	1236,17	31,16 *
diaAexp	10233,61	8	1279,20	32,25
diaAexp L	159,46	1	159,46	4,02
diaAexp Q	9860,97	1	9860,97	248,59 *
diaAexp C	128,34	1	128,34	3,24
diaAexp Q1	71,99	1	71,99	1,81
diaAexp Q2	0,54	1	0,54	0,01
Alt*diaAevap	1723,15	4	430,79	10,86
Alt L*diaAevap L	1696,44	1	1696,44	42,77 *
Alt L*diaAevap Q	25,92	1	25,92	0,65
Alt Q*diaAevap L	0,37	1	0,37	0,01
Alt*diaAevap Q	0,41	1	0,41	0,01
diaAevap*diaAexp	24237,51	16	1514,84	38,19
diaAevap L*diaAexp L	4756,78	1	4756,78	119,92 *
diaAevap L*diaAexp Q	6621,87	1	6621,87	166,94 *
diaAevap *diaAexp C	96,54	1	96,54	2,43
DiaAevap L*diaAexp Q1	48,02	1	48,02	1,21
DiaAevap L*diaAexp Q2	1,08	1	1,08	0,03
diaAevap Q*diaAexp L	4156,26	1	4156,26	104,78 *
diaAevap Q*diaAexp Q	8462,19	1	8462,19	213,33 *
diaAevap Q*diaAexp C	56,45	1	56,45	1,42
DiaAevap Q*diaAexp Q1	16,92	1	16,92	0,43
DiaAevap Q*diaAexp Q2	386,04	1	386,04	9,73
Error	1904,02	48	39,67	
Total	63141,70	80		

F teórico			
Grados de Libertad		α	
v1	v2	0,05	0,01
80	48	1,56	1,88
16	48	1,86	2,40
8	48	2,14	2,91
4	48	2,57	3,74
2	48	3,19	5,08
1	48	4,04	7,19

L=Lineal
 Q= Cuadrático
 C= Cúbico
 Q1= Cuartico
 Q2= Quíntico

D.4 ANOVA PARA LOS FACTORES: ALTURA Y RELACIÓN DE ÁREAS.

Factor	Type	Levels	Values
Alt	fixed	3	0,040 0,052 0,064
Aexp/Aev	fixed	9	0,16 0,25 0,36 0,49 0,64 0,81 1,00 1,21 1,44

Analysis of Variance for masa

Source	DF	SS	MS	F	P
Alt	2	951,16	475,58	12,03	0,001
Aexp/Aev	8	8882,55	1110,32	28,08	0,000
Error	16	632,66	39,54		
Total	26	10466,37			

D.5 DESCOMPOSICIÓN ORTOGONAL PARA LOS FACTORES: ALTURA Y RELACIÓN DE ÁREAS.

Fuente de Variación	SS	GL	MS	Fo	F teórico			
Tratamientos	10466,44	26	402,56	10,18	Grados de Libertad		α	
Alt	951,24	2	475,62	12,03	v1	v2	0,05	0,01
Alt L	949,09	1	949,09	24,01 *	26	16	2,22	3,15
Alt Q	2,15	1	2,15	0,05	8	16	2,59	3,89
Aexp/Aevap	8882,65	8	1110,33	28,09	2	16	3,63	6,23
Aexp/Aevap L	3007,47	1	3007,47	76,07 *	1	16	4,49	8,53
Aexp/Aevap Q	3035,56	1	3035,56	76,78 *				
Aexp/Aevap C	2517,93	1	2517,93	63,69 *				
Aexp/Aevap Q1	37,98	1	37,98	0,96				
Aexp/Aevap Q2	271,20	1	271,20	6,86 *				
Error	632,55	16	39,53					
Total	10466,44	26						

L=Lineal
Q= Cuadrático
C= Cúbico
Q1= Cuartico
Q2= Quintico

D.6 ANÁLISIS DE REGRESIÓN

The regression equation is

$$\text{masa} = -99,5 + 605 \text{ Alt} + 696 \text{ Aexp/Aevap} - 1266 \text{ Aexp/Aevap}^2 + 719 \text{ Aexp/Aevap}^3 - 73,0 \text{ Aexp/Aevap}^5$$

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	-99,48	13,18	-7,55	0,000
Alt	605,1	114,5	5,28	0,000
Aexp/Aev	696,09	84,05	8,28	0,000
Aexp/Aev	-1265,6	177,7	-7,12	0,000
Aexp/Aev	719,2	123,0	5,85	0,000
Aexp/Aev	-72,99	17,70	-4,12	0,000

S = 5,832

R-Sq = 93,2%

R-Sq(adj) = 91,6%

REFERENCIAS

- ¹ ASOCOLFLORES/ mercados (<http://www.colombianflowers.com>)
- ² DOMINGUEZ GARCIA, Francisco. *Plagas y Enfermedades de las Plantas Cultivadas*. Octava Edición. Mundi Prensa. Madrid. 1989.
- ³ UNIVERSIDAD DE LOS ANDES. Centro de Investigaciones de la Facultad de Ingeniería CIFI – Asocolflores. *Implementación del Sistema de Registro de Índices de Consumo Energético FASE IIA: Ajustes Iniciales*. Santa fe de Bogota D.C. Julio 22 de 1998.
- ⁴ CARO, Juan Manuel. *Simulación numérica y análisis de los procesos de sublimación y evaporación de sustancias a atmósfera abierta*. Universidad de los Andes, Bogotá-Colombia. 2002
- ⁵ RODRÍGUEZ, Julián. “*Optimización de los sublimadores de azufre usados en los cultivos de rosas bajo invernadero*”. Universidad de los Andes, Bogota-Colombia. 2001.
- ⁶ LOPEZ Juliana “Determinación experimental de la geometría óptima de evaporadores expuestos a atmósfera abierta”. Universidad de los Andes, Bogota-Colombia. 2002.
- ⁷ INCROPERA, Frank P. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 4th Edition. Editorial John Wiley and Sons. New York 1996.(1)
- ⁸ LIENHARD IV John H. and LIENHARD V John H. *A Heat Transfer Textbook*. 3th Edition. Phlogiston Press. Cambridge M.A. 2001. (2)
- ⁹ TREYBAL, Robert E. *Operaciones de Transferencia de Masa*. Segunda Edición. McGraw-Hill Mexico. 1997. (3)
- ¹⁰ HOLMAN, Jack Phillip. *Heat Transfer*. 7th Edition. McGraw-Hill. London. 1992. (4)
- ¹¹ TURNS, Stephen R. *An introduction to combustion: concepts and applications*. 2nd Edition. McGraw-Hill. Boston. 2000. (5)
- ¹² KUO, Kenneth Kuan-Yun. *Principles of Combustion*. John Wiley. New York. 1986. (6)
- ¹³ McCABE, Warren Lee. *Operaciones unitarias en ingeniería química*. 4ta edición. McGraw-Hill. Madrid. 1998. (8)
- ¹⁴ ANSYS *Elements Reference*. 001084 Tenth Edition. SAS IP, Inc.
- ¹⁵ ANSYS *Theory Reference*. 001099, Ninth Edition. SAS IP, Inc.

- ¹⁶ STEWART, James. *Calculus Early Transcendentals*. Third Edition. Brooks/Cole publishing Company. New York. 1995.
- ¹⁷ MONTGOMERY, Douglas C. *Design and Analysis of Experiments*. 5th Edition. John Wiley & Sons. New York. 2001.
- ¹⁸ HICKS, Charles. *Fundamentals Concepts in the Design of Experiments*. 4th Edition. Oxford University Press. 1993.
-