



D-18543

T
664.0284
SOTs



Biblioteca Central



Escuela Superior Politécnica del Litoral
FACULTAD DE INGENIERIA EN MECANICA

**”Un Sistema para la Deshidratación
Continua de Banano Pelado y Rodajeado
Análisis Teórico, Modelo Físico y
Matemático“**

TESIS DE GRADO

Previa a la Obtención del Título de:
INGENIERO MECANICO



Presentada por:
GHUNTER KAREL SOTOMAYOR MACIAS

Guayaquil, - Ecuador

Año - 1997

AGRADECIMIENTO



Biblioteca Central

Al Dr. Alfredo Barriga, por su apoyo y ayuda generosa y perenne. Y a mi amigo Felipe Izurieta, pues sin su ayuda, el presente trabajo hubiera sido muy difícil de sobrellevar.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN



Biblioteca Central

Ing. Eduardo Rivadeneira.
DECANO DE LA FIM

Dr. Alfredo Barriga B.
DIRECTOR DE TESIS

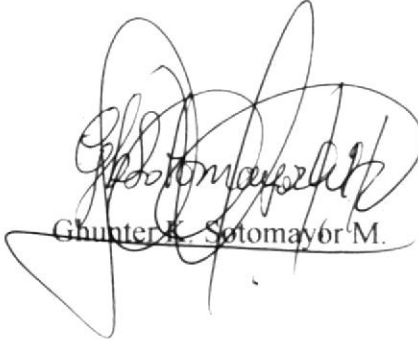
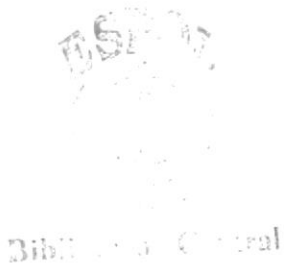
Ing. Jorge Duque
VOCAL

Ing. Fredy Cevallos B.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La Responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente, y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



Gunter K. Sotomayor M.

RESUMEN

El presente estudio se enfoca en el análisis teórico del problema que representa el secado continuo del banano en un horno del tipo Roto-Louvre, debido a sus propias características intrínsecas y en función de las cualidades finales del banano seco para su posterior utilización como base para la producción de harina de banano para consumo animal y como aglutinante en la alimentación de camarón a escala industrial.

Primeramente se describe en forma breve el horno a utilizarse, se establecen las características propias y únicas que posee el horno, el rango de las diferentes variables (temperatura del aire y del banano, velocidad de giro, requerimientos energéticos) en el cual funciona actualmente el horno mencionado, dimensiones importantes del horno y la capacidad actual de producción

Posteriormente se interpretará físicamente como es el proceso de secado a través de lecho de banano, se harán simplificaciones de la realidad para aplicar un modelo de transferencia de calor y difusión de masa transiente unidimensional para placa plana cuya función es representar el proceso de secado de las rodajas de banano en el interior del lecho. Se establecen las condiciones de borde y las condiciones iniciales a partir de los supuestos y las asunciones impuestas y se determinan las ecuaciones concernientes para cada proceso involucrado.

Finalmente se prueba el modelo global para casos particulares y conocidos de transferencia de calor y masa transiente, se realizan gráficas representativas y luego se aplicará el modelo global. Una vez que el modelo global haya sido establecido y probado, a partir de él se inferirá el comportamiento del banano según se varíe ciertos parámetros de funcionamiento.



Biblioteca Central



Biblioteca Central

INDICE GENERAL

	Pag.
INTRODUCCIÓN	1
I. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA PARA LA DESHIDRATACIÓN DEL BANANO Y ANÁLISIS TEÓRICO DE LOS PROCESOS DE INTERCAMBIO ENERGÉTICO DENTRO DEL LECHO	
1.1 Descripción del Horno y el proceso de deshidratación dentro del lecho	5
1.2 Equivalente geométrico del lecho de rodajas de banano en el horno	7
1.3 Proceso de intercambio térmico y de masa dentro del lecho	11
II. EL MODELO FÍSICO-MATEMÁTICO DE LA DESHIDRATACIÓN DEL BANANO DENTRO DEL LECHO	
2.1 Asumpciones y Simplificaciones del modelo	15
2.2 Determinación del porcentaje de volumen vacío y área vacía	18
2.3 Cálculo de las dimensiones del equivalente geométrico	19
2.4 Cálculo de los Coeficientes de Transferencia de Calor y Masa por convección	22
2.5 Proceso de migración de la masa desde el interior del bloque hacia la superficie	25
2.6 El proceso de Transferencia de Calor al interior del bloque de banano	28
III. ANÁLISIS DE GRÁFICAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	37
IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES SOBRE EL MODELO	
4.1 Conclusiones	50
4.2 Recomendaciones	52

APENDICE A	62
APENDICE B	77
BIBLIOGRAFIA	82





INDICE DE FIGURAS

	Pag	
Fig. 2.1	Forma geométrica del lecho de banano	19
Fig. 2.2	Análisis de un segmento de bloque sólido	24
Fig. 2.3	Balace de Energía en el nodo 5, o nodo de contacto con el aire	30
Gráfica A.1	MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA AL INTERIOR DEL BANANO DEBIDO A LA TRANSFERENCIA DE CALOR DEL AIRE AL BANANO. Perfiles de Temperaturas como una función del espesor del bloque, para distintos tiempos, sin considerar la tasa de evaporación y sin factor de corrección del área.	41
Gráfica A.2	MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA AL INTERIOR DEL BANANO DEBIDO AL EFECTO DE EVAPORACIÓN DEL AGUA CONTENIDA EN ÉL. Perfiles de Temperaturas como una función del espesor de bloque, para distintos tiempos, con tasa de evaporación constante, sin corrección del contenido de masa y sin factor de corrección del área.	42
Gráfica A.3	MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA AL INTERIOR DEL BANANO POR LOS EFECTOS DE ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO Y CALENTAMIENTO POR CONVECCIÓN DE CALOR DEL AIRE AL BANANO. Perfiles de Temperatura como una función del espesor del bloque, para distintos tiempos, con tasa de evaporación constante, sin corrección del contenido de masa y sin factor de corrección del área.	43
Gráfica A.4	MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA AL INTERIOR DEL BANANO POR LOS EFECTOS DE ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO Y CALENTAMIENTO POR CONVECCIÓN DE CALOR DEL AIRE AL BANANO. Perfil de Temperatura como una función del espesor de banano, en un hora para diferentes valores del factor de corrección del área con tasa de evaporación constante y sin corrección del contenido de masa	44
Gráfica A.5	MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA AL INTERIOR DEL BANANO POR LOS EFECTOS DE L ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO Y CALENTAMIENTO POR CONVECCION DE CALOR DEL AIRE AL BANANO. Perfiles de Temperatura vs. tiempo en el plano medio del bloque de análisis para varios porcentajes de masa constantes en el tiempo.	45
Gráfica A.6	MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA AL INTERIOR DEL BANANO POR LOS EFECTOS DE ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO Y CALENTAMIENTO POR CONVECCIÓN DE CALOR DEL AIRE AL BANANO. Perfil de Temperatura vs. tiempo en el plano medio del bloque de análisis, con variación continua y lineal de la masa por efecto de la evaporación para diferentes valores de área de transferencia.	46

Gráfica A.7	<p>MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA AL INTERIOR DEL BANANO POR LOS EFECTOS DE ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO Y CALENTAMIENTO POR CONVECCIÓN DE CALOR DEL AIRE AL BANANO. Perfil de Temperatura vs. tiempo en el plano medio del bloque de análisis, para 40% más de área de transferencia, para distintos correctores de contenido de masa por efecto de la evaporación.</p>	47
Gráfica A.8	<p>MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA AL INTERIOR DEL BANANO POR LOS EFECTOS DE ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO Y CALENTAMIENTO POR CONVECCIÓN DE CALOR DEL AIRE AL BANANO. Perfil de Temperatura vs. tiempo en el plano medio del bloque de análisis, para 50% más de área de transferencia, con cambio en la pendiente del factor de corrección de contenido de masa (de 2 a 1/2).</p>	48
Gráfica A.9	<p>MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA AL INTERIOR DE BANANO POR EFECTO DE LA DIFUSIÓN DE MASA, DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN DEL AIRE AL BANANO, TRANSFERENCIA DE MASA POR CONVECCIÓN DEL BANANO AL AIRE Y EL ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO. Perfil de Temperatura en el plano medio del bloque de análisis considerando el efecto de la reducción de la masa contenida dentro del bloque debido a la migración de humedad dentro de él, modelado a través de un proceso de difusión transiente con convección de masa como condición de borde</p>	49
Gráfica A.10	<p>MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA AL INTERIOR DE BANANO POR EFECTO DE LA DIFUSIÓN DE MASA, DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN DEL AIRE AL BANANO, TRANSFERENCIA DE MASA POR CONVECCIÓN DEL BANANO AL AIRE Y EL ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO. Perfil de Temperatura en el plano medio del bloque de análisis considerando el efecto de la reducción de la masa contenida dentro del bloque debido a la migración de humedad dentro de él, modelado a través de un proceso de difusión transiente con convección de masa como condición de borde</p>	50
Gráfica A.11	<p>MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA AL INTERIOR DE BANANO POR EFECTO DE LA DIFUSIÓN DE MASA, DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN DEL AIRE AL BANANO, TRANSFERENCIA DE MASA POR CONVECCIÓN DEL BANANO AL AIRE Y EL ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO. Perfiles De Temperatura para diferentes instantes de tiempo al interior del bloque de análisis de banano.</p>	51
Gráfica A.12	<p>MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE CONCENTRACIÓN DE AGUA DENTRO DEL BANANO POR EFECTO DE LA TRANSFERENCIA DE MASA POR CONVECCIÓN DEL BANANO AL AIRE. Perfil de Concentración, en el plano medio del bloque de análisis con concentración de vapor de agua en el aire variable en el tiempo y proporcional a la pérdida de masa en el interior del bloque.</p>	52

Gráfica A.13	MODELO PAR LA DISTRIBUCIÓN DE CONCENTRACIÓN DE AGUA DENTRO DEL BANANO POR EFECTO DE LA TRANSFERENCIA DE MASA POR CONVECCIÓN DEL BANANO AL AIRE... Perfil de Concentración de vapor de agua en el aire y Fracción de masa acarreada por el aire como una función del tiempo.	53
Gráfica A.14	CAIDA DE PRESIÓN DENTRO DEL LECHO DE BANANO COMO FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIA DEL AIRE.	54
Gráfica A.15	CAIDA DE PRESIÓN DENTRO DEL LECHO COMO UNA FUNCIÓN DE LA ALTURA DEL LECHO.	55

SIMBOLOGÍA

A	Area
a	Altura del lecho de banano en el modelo
α	Difusividad Térmica
b	Ancho del lecho de banano en el modelo
Bi	Número de Biot para transferencia de calor
Bi_m	Número de Biot para transferencia de masa
C_∞^T	Concentración del aire en el tiempo t
C_n^T	Concentración en el nodo n , en el tiempo t
D_{AB}	Coefficiente de difusividad del vapor agua en el aire
D_h	Diámetro Hidráulico
Δt	incremento en el tiempo
Δx	incremento en la dirección x
E	Energía
e	espesor del canal de aire, en el modelo
Fo	Número de Fourier para transferencia de calor
Fo_m	Número de Fourier para transferencia de masa
H	Altura del lecho de banano
h	Coefficiente de Transferencia de Calor por convección
h_m	Coefficiente de Transferencia de Masa por convección
k	Conductividad térmica
L	Longitud del horno
m	flujo másico
Nu_D	Número de Nusselt
Pr	Número de Prandtl
r	radio del cilindro de secado
ρ	Densidad
r_0	espesor del bloque de análisis
Re_D	Número de Reynolds
Sc	Número de Schmith
Sh_D	Número de Sherwood
T_{air} , T_∞	Temperatura del aire
T_n^T	Temperatura en el nodo n , en el tiempo t

INTRODUCCIÓN

Ecuador tiene una producción de exportación de aproximadamente tres millones trescientas mil toneladas de banano por año, quedando un excedente de unas quinientas mil toneladas, parte de las cuales se usa para producción artesanal de harina de banano, perdiéndose una parte del excedente.

Existe interés en el medio por desarrollar sistemas de deshidratación de banano verde. Dos son las motivaciones fundamentales, a saber: el excedente de banano que, por diversas razones, no llega a exportarse; y el creciente potencial de utilización de la harina de banano, tanto para consumo humano como para consumo animal.

La harina de banano puede ser utilizada tanto para consumo humano como para consumo animal. Dependiendo del destino final, el proceso varía en estrictez. Así, para elaboración de alimento balanceado para aves y porcinos, el descascarado, oxidación (y consecuentemente oscurecimiento de la harina) y el nivel de asepecia, tienen una menor importancia. Para consumo humano y de camarón de exportación, por otro lado, los estandares de fabricación son más exigentes. En todos ellos, con mayor o menor rigidez, se requiere de un secado homogéneo que permita la subsecuente molienda y tamizado del producto, eliminando la formación de grumos así como la descomposición fungal, que afectan al proceso el uno y al producto final el otro.

El aprovechamiento del banano excedente de exportación en un proceso como el de elaboración de harina de banano suministra valor agragado a un producto de muy bajo valor comercial. Así mismo, un producto bien elaborado permite su almacenamiento por tiempos más largos, evitando su pérdida de valor.

El proceso artesanal es limitado y no cumple las condiciones de volumen asepcia y calidad que se puede dar en escala industrial. Por comparación, para secar en endal oreándose al sol rodajas de banano verde, se podría generar cerca de 1 kg de material seco por cada metro cuadrado en tres días. Cada metro cuadrado de tendal podrá procesar en un mes unos 10 kg. de material seco, o 15 ton/mes en 1000 metros cuadrados.

Los hornos tradicionales de tipo tanda (batch) son muy probados y puede verse suficiente información en la literatura. Los hornos continuos, por otro lado, en aplicación a productos agrícolas, son más limitados. Existe el de tipo túnel rotatorio, usados en particular para la fabricación de mineral de cemento, así como para la cocción de residuos del envasado de camarón y de pescado.

El diseño de estos hornos túnel se basa mas en datos empíricos y en experiencia del fabricante. la información teórica y experimental sobre estos sistemas, y sobre el efecto de los parámetros básicos es limitada, inexistente o ambigua y conducente a errores. No puede extrapolarse de un producto a otro. No se puede determinar

fácilmente el efecto de parámetros tales como velocidad de giro, flujo de aire, temperatura de proceso, tamaño de los trozos de material desmenuzado, etc.

Con estas motivaciones, se plantea el presente estudio, mediante el cual se aspira a dar respuesta a algunas de las inquietudes técnicas, a nivel teórico, que limitan la implementación de sistemas continuos de deshidratación de banano verde a escala industrial.

Existiendo en el medio el interés y la necesidad de elaborara harina de banano de calidad aceptable, este estudio puede proporcionar lineamientos sobre el camino a seguir para el análisis de sistemas continuos de producción industrial.

CAPITULO I

DESCRIPCION DEL SISTEMA PARA LA DESHIDRATACIÓN DEL BANANO Y ANÁLISIS TEÓRICO DE LOS PROCESOS DE INTERCAMBIO ENERGÉTICO DENTRO DEL LECHO

1.1 Descripción del Horno y el proceso de deshidratación dentro del lecho

El sistema a analizarse está constituido por una masa de rodajas delgadas (1 a 2 mm de espesor) de banano verde. Estas están colocadas dentro del cilindro concéntrico interior del horno, el cual gira lentamente sobre su eje longitudinal, y tiene una suave pendiente descendente hacia adelante. Cuando el horno se encuentra estático, y la masa se distribuye uniformemente a lo largo del mismo, esta llena aproximadamente un 40% de área circular. El banano en rodajas se carga por la parte superior y descarga por gravedad por la parte inferior. Aire entra, también, por la parte superior (véase diagramas en el Apéndice B)

Al girar el horno, en estado estable (en el sentido del reloj visto desde adelante), la masa adquiere una inclinación dada, similar al ángulo de reposo de material granulado (ángulo límite pasado el cual se desliza el material por gravedad). La parte elevada estará del lado izquierdo (visto desde adelante). Inducido por el movimiento del horno, porciones del material en la parte superior se deslizan continuamente en cascada hacia abajo, dando una estabilidad dinámica al plano inclinado. Simultáneamente el material progresa lentamente corriente abajo del horno. Existe un “borboteo” inducido en la parte superior, que es como una masa inestable que desciende en cascada desde la parte superior del plano inclinado y que depende de la velocidad de giro y del “agarre” de la pared sobre las rodajas. El horno del tipo aquí descrito (Roto-Louvre) no posee aletas

axioespirales, característico de los hornos puramente cilíndrico-rotativos; éstas aletas espergean las rodela del lecho hacia arriba del horno, provocando la “lluvia” continua de rodela y su exposición a la corriente de aire puramente axial de estos hornos.

En el horno Roto-Louvre posee una cámara cilíndrica concéntrica externa. El aire entra por una porción del anillo formado por los dos cilindros e ingresa al horno de manera radial por debajo y a través del lecho, ingresando a través de fisuras longitudinales. El flujo de aire que circula por el espacio anular está constreñido, por medio de canales laterales, a fluir solo por debajo de donde se encuentra el lecho en operación estable.

El flujo de aire es por tanto efectivamente de tipo “flujo cruzado” con respecto al material, es decir, que mientras el material progresa de longitudinal (axial), el aire fluye radialmente hacia el núcleo central “vacío” del horno. El efecto deshidratante del aire caliente se da por tanto principalmente a través del lecho y a lo largo de éste, mientras que una fracción muy pequeña (menor al 5%) se da con el espergeo limitado de partículas de rodela que se elevan.

El horno tiene 8.0 m de longitud, y el diámetro del cilindro interior es de 1.0 m aproximadamente. Al cargarse al límite arriba indicado se estima que contiene

una masa de 746 kg. de rodajas de banano inicialmente fresco (aprox. 27 cajas de banano).

Debe notarse que en este tipo de horno el caudal que pasa por el núcleo central del horno aumenta gradualmente corriente abajo, empezando un valor muy pequeño en la sección de entrada, hasta alcanzar el valor de flujo total a la salida. El crecimiento puede considerarse linealmente creciente.

1.2 Equivalente geométrico del lecho de rodajas de banano en el horno

Como se indicó anteriormente, durante operación estable el lecho de banano adquiere una posición dinámicamente estable, con una superficie inclinada a favor de la dirección de giro. Aire para la deshidratación fluye de manera radial atravesando el lecho. Para efectos prácticos puede considerarse que este lecho cuya sección transversal corresponde a un segmento circular limitado por la superficie del círculo del horno y el plano inclinado que forma el lecho debido al giro del horno.

Esta realidad física puede hacerse equivalente para efecto de análisis a un lecho de sección transversal rectangular, cuyas dimensiones deben ser tales que representen un compromiso entre similitud de área transversal y similitud de condiciones termofluidodinámicas.

Por otro lado el lecho real se encuentra constituido por un conjunto de rodelaas físicamente contiguas y en contacto unas con otras. Si bien en el lecho real hay un balance dinámico y un estado cuasiestático, con rodelaas que migran lentamente a través de la masa, en el presente trabajo se idealiza esta situación a un lecho estático que corresponde a una visión promedio de la realidad.

Esta consideración dará una predicción conservadora del tiempo de secado, puesto que la circulación de las partículas en el lecho inducirá una mejor transferencia de masa y calor.

El proceso de calentamiento y deshidratación de las rodelaas de banano se da por la exposición continua al aire de secado a través del lecho. El agua contenida en las rodelaas es acarreada desde la superficie de la misma por el aire que pasa a través de los intersticios del lecho. El aire, cuya temperatura debe ser seleccionada para que mantenga su capacidad termodinámica de acarreo de humedad al atravesar el lecho, sin saturarse. La humedad, se encuentra inicialmente en la superficie de la rodelaa; migra porciones nuevas desde el interior de la misma hacia la superficie una vez que dicha superficie empieza a secarse. Mientras exista humedad en la superficie de las rodelaas y el aire que pase este inicialmente seco, la tasa de extracción de humedad se mantendrá relativamente constante. Esto corresponde, en la teoría de secado de productos agrícolas, con la tasa constante de secado característico de la primera etapa del

proceso de secado de partículas individuales y en lecho delgado (espesor equivalente a unos pocos diámetros de partículas).

Al empezar a secarse la superficie de las rodela, la “onda” de deshidratación empieza a migrar hacia el interior de la misma. Así mismo la humedad tiene que migrar desde el espacio interior de la rodela hacia la parte exterior. En el presente trabajo y debido a la alta tasa de evaporación que se induce se considera que esta migración se produce principalmente por difusión, a través de los espacios (poros) interiores de la partícula (rodaja de banano). La evaporación que inicialmente se dió en la superficie de la partícula, progresa un poco hacia el interior. En el presente trabajo se considera que la evaporación se produce en la superficie una vez que la masa ha migrado desde dentro de la partícula.

La distancia media que migra la humedad esta directamente relacionada con el espesor de la rodela, constituyéndose en uno de los parámetros más importantes del proceso de secado. Sin embargo, en la práctica el hecho de que las rodela se encuentran en extenso contacto y contiguidad entre si, dentro del lecho, hace que la superficie externa de cada rodela se encuentre en buena parte bloqueada del contacto del aire, por el contacto con otras rodela. El proceso de secado o la extracción de humedad por el aire se dará solo en los espacios intersticiales libres que existan dentro del lecho en un instante dado. En la práctica, por tanto, el lecho se comporta como un conjunto de partículas más gruesas, y con un área

de secado que es una fracción del área externa de las rodajas. El aire caliente fluye a través de los espacios intersticiales extrayendo humedad del lecho

Aún con esta simplificación el modelaje es complicado. Tomando en cuenta que el aire fluye por intersticios sinuosos e irregulares, se introduce una simplificación asimilando estos intersticios a canales rectos dentro del lecho. Complementariamente la porción entre canales se consideran bloques de material homogéneo. El aire de desecación fluye a través de estos canales extrayendo humedad al material. El espesor relativo entre canales y bloques debe estimarse de acuerdo a las características físicas del lecho y las rodajas (diámetro y espesor de las rodajas, espacio vacío dentro del lecho, propiedades termodinámicas, etc.)

El proceso de deshidratación estará dado entonces en el modelo por migración de agua desde la superficie libre del bloque en cada canal hacia el aire que pasa por dichos canales. En el interior la humedad migrará hacia la superficie de los bloques.

1.3 Procesos de intercambio térmico y de masa dentro del lecho

El aire de deshidratación debe cumplir requisitos básicos. Su capacidad de acarreo de humedad debe ser tal que le permita extraer toda la humedad al lecho de rodajas y salir del horno sin haber llegado a su punto de saturación.

La capacidad de acarreo de humedad por el aire viene dada por sus características termodinámicas. A una presión y temperatura dadas, el aire puede acarrear en fase gaseosa una cantidad de agua dada, que se especifica en una fracción de masa de agua por masa de aire seco (concentración gravimétrica). Cantidades adicionales de humedad del sólido no podrán ser acarreadas por el aire, e inversamente, de encontrarse en el aire se depositarán como condensado en el sólido (condensación reversa).

El proceso de evaporación (cambio de fase de líquido a vapor) requiere de una cantidad de energía tipificada por el denominado calor latente de evaporación (2438 kJoule/kg, a la temperatura de 30 °C). Esta energía es tomada de la zona inmediatamente contigua a la superficie de evaporación de las partículas (rodajas) del lecho. En el modelo se considera que la energía es tomada de una primera capa del material sólido, ocasionando su inmediato cambio (descenso de su contenido energético) medido éste por su temperatura para un calor específico constante. Concomitantemente, se considera que éste descenso de energía es a

su vez balanceado por influjo de calor desde las capas interiores del sólido, por un lado y desde el aire, por el otro hacia la capa superficial del sólido, cada uno con su respectivo mecanismo de transferencia de energía, ésto es conducción de calor al interior del sólido y convección de calor en la interfaz sólido-gas. El calor sensible del vapor de agua evaporada que migra desde la superficie del sólido hacia el aire se lo añade, por ser equivalente en su efecto, al calor latente.

Desde un punto de vista global, los procesos de migración de humedad, de calentamiento del sólido por el aire y la extracción de energía para la evaporación arriba descritos se suceden de manera simultánea y concatenada entre sí. Los procesos están de hecho “acoplados”. Por ejemplo, la cantidad de energía necesaria para el proceso de evaporación depende de la tasa de migración de masa de la superficie sólida al seno fluido, la que a su vez depende del gradiente entre el contenido de humedad en la superficie sólida y el aire. Por otro lado la temperatura de la superficie refleja la interacción dinámica -transiente- entre la temperatura previa -con el tiempo- y la conductividad de las porciones sólidas aledañas, el calor específico y densidad de la propia porción sólida, así como de la tasa de transferencia de calor convectiva entre el sólido y el aire a través de la interfaz. Por otro lado la cantidad de masa remanente en las diversas porciones interiores del sólido van disminuyendo gradualmente -y así mismo su densidad- conforme la humedad del interior va migrando hacia la superficie.

Una vez que se desarrolle el modelo, lo cual se da en las secciones subsiguientes este debe ser comprobado, individualmente en cada uno de los componentes indicados. Esto es, deberá predecir el efecto de calentamiento puro -estado transiente- cuando solo se considera el sólido expuesto a la acción del aire caliente -sin transferencia de masa-. Así mismo deberá predecir la tasa de evaporación que se da a una temperatura del sólido artificialmente fija, mientras aire fluye por el canal a una temperatura dada incrementando su humedad. Finalmente deberá también predecir la onda de enfriamiento transiente que se genera en la interfaz del sólido por efecto de la evaporación considerada aisladamente de los demás efectos. Los resultados de predicción globales del modelo incorporan estos efectos y las interrelaciones desarrolladas entre si. En el Apéndice A, se ilustran mediante gráficas los resultados de las comprobaciones antes mencionadas.

CAPITULO II

EL MODELO FÍSICO-MATEMÁTICO DE LA DESHIDRATACIÓN DEL BANANO DENTRO DE LECHO

2.1 Asumciones y Simplificaciones del modelo

- i.* No es tomado en cuenta por el modelo el 5% de masa de material que se comporta como “lluvia”, puesto que su masa es pequeña y EL PROCESO DE SECADO SE REALIZA PRINCIPALMENTE DENTRO DEL LECHO.
- ii.* Se traduce la forma del área transversal del lecho de banano a una sección rectangular, que posea la misma relación de áreas que el lecho original, en donde el aire circulará por debajo de y a través del lecho de nuestra nueva área.
- iii.* Se asimilan los espacios intersticiales del lecho de banano como canales rectos que atraviesan el lecho “rectangular”, en el modelo y complementariamente como bloques sólidos de material la porción entre canales. El aire circulará a través de estos canales.
- iv.* Los espesores relativos de los canales de aire y de bloque de sólido son estimados a partir de las características físicas del lecho y de las rodajas (relación de áreas, porción de espacio vacío, dimensiones de la rodaja).
- v.* Se considera que la migración de humedad y la transferencia de calor no es importante en la dirección longitudinal al lecho de banano, por lo tanto cualquier proceso será unidimensional y en la dirección perpendicular a la altura del lecho de banano.
- vi.* Para efectos de análisis, se considera al lecho estático para un instante de tiempo dado. Esto es una técnica de análisis debido al movimiento cuasiestático del lecho original (*slow moving bed*)

- vii.* Por el alto contenido de humedad del material, se considera que el mecanismo de migración de masa desde el interior de material es por difusión, y que la concentración inicial del aire es cero.
- viii.* Existe una humedad superficial en la pared exterior del banano la cual empieza a evaporarse hasta que se agote, subsecuentemente migra humedad desde el interior del sólido hacia la superficie, pero la evaporación de la humedad solo se produce en la superficie.
- ix.* La energía necesaria para que se produzca la evaporación es tomada de la capa de sólido contigua a la superficie en donde se produce la evaporación, y a su vez esta energía extraída es balanceada por el influjo de calor desde el interior del sólido (conducción de calor), y por el aire hacia el sólido (convección de calor).
- x.* El calor sensible que requiere la humedad una vez evaporada para llevarla a la temperatura de la corriente de aire es añadida al calor latente de evaporación, porque su efecto global en el proceso de secado es el mismo que el efecto producido por el calor latente solamente. El calor sensible extrae energía tanto del banano como del aire.
- xi.* Las propiedades termodinámicas tanto del aire como del banano permanecen constantes en el tiempo, a excepción de la densidad; pues ésta depende directamente del contenido de masa húmeda dentro del material, el cual se modela apropiadamente y se actualiza a través de la marcha computacional.

- xii.* Se ha considerado una temperatura promedio del aire para efectos de simplificación del modelo de transferencia de calor transiente.

2.2 Determinación del porcentaje de volumen vacío y área vacía

El espacio o volumen vacío dentro del lecho de banano fue determinado experimentalmente de la siguiente manera:

Se tomó un envase de volumen conocido, en nuestro caso fue un envase cilíndrico de 10 cm. de diámetro por 9 cm de alto. Se vació en el envase una cantidad de monedas de manera tal que llenase el envase con la mayor cantidad de monedas posible. Se escogió monedas porque no absorben agua, lo que si sucedería si fuese rodajas de banano.

Una vez que nuestro sistema se encuentra en la forma descrita se vacía agua en nuestro envase con las monedas dentro y se mide el volumen de agua vaciado. En nuestro caso fue aproximadamente de 210 cm^3

Para determinar el porcentaje de espacio vacío se dividió el volumen de agua contenido dentro del envase para el volumen del envase (aprox. 710 cm^3). El porcentaje de volumen vacío quedó en aprox. 30%

Para determinar el porcentaje de área vacía por el que el aire pasará a través del lecho se cumplió el siguiente procedimiento.

Una vez determinado el volumen vacío en nuestra muestra, éste volumen vacío se divide para la longitud del envase; éste valor representa el área vacía de la muestra (aprox. 23.3 cm²).

Se divide el área vacía para el para el área de la muestra (78.6 cm²) y se obtuvo el porcentaje de área vacía que fue aproximadamente del 30%.

2.3 Cálculo de las dimensiones del equivalente geométrico

Asumimos de que la forma geométrica del lecho de banano es el de un segmento circular formado por el plano inclinado que forma la superficie del lecho y el arco del cilindro interior del horno; de aquí queremos llegar a hallar el rectángulo equivalente correspondiente a la misma área bajo las siguientes condiciones:

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidades
Porcentaje de área ocupada por el lecho de banano	$%A$	40	
Radio del cilindro interior del horno	r	0.5	m
Altura del lecho de banano	H	0.35	m

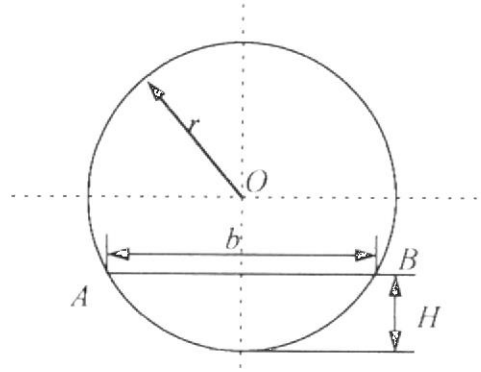


Fig. 2.1 Forma geométrica del lecho de banano

De la Fig. 2.1 podemos decir que:

$$\cos\left(\frac{AOB}{2}\right) = \frac{r-H}{r} \Rightarrow \left(\frac{AOB}{2}\right) = \cos^{-1}\left(\frac{r-H}{r}\right)$$

$$\tan\left(\frac{AOB}{2}\right) = \frac{b/2}{H-r} \Rightarrow b = 2\tan\left(\frac{AOB}{2}\right) = 2(r-H)\tan\left(\cos^{-1}\left(\frac{r-H}{r}\right)\right)$$

$$b = 2(0.5-0.35)\tan\left(\cos^{-1}\left(\frac{0.5-0.35}{0.5}\right)\right) = 0.95 \text{ m}$$

$$ab = \%A\pi r^2 \Rightarrow a = \frac{\%A\pi r^2}{b}$$

$$a = \frac{0.4\pi 0.5^2}{0.95} = 0.33 \text{ m}$$

donde a y b son las dimensiones de mi rectángulo equivalente. Una vez determinado las dimensiones del equivalente, se procede a aproximar los intersticios dentro del lecho a canales rectos que atraviesan nuestro equivalente. Para determinar el espesor de esos canales utilizamos el dato del área vacía determinado en la sección anterior. Si mantenemos la dimensión a constante en nuestro equivalente entonces el porcentaje de área vacía será directamente proporcional a la longitud b , esto significa que si el área vacía es 30%, el espacio ocupado por todos los canales por donde circula el aire será igual al 30% del lado b , imponiendo convenientemente el número de divisiones de canales, el cual se establece en 25 divisiones, tenemos que el espesor e de cada uno de los canales viene dado por:

$$e = \frac{0.3b}{25} = 0.0114 \text{ m}$$

El espesor del bloque sólido, r_0 , viene dada, entonces, por:

$$r_0 = \frac{0.7b}{25} = 0.0266 \text{ m}$$

2.4 Cálculo de coeficientes de Transferencia de calor y masa por convección

En el modelo el aire pasa a través de canales rectos de forma rectangular de dimensiones e por $L/10$, donde L es la longitud total del horno, el aire entra a una temperatura promedio de 135°C y la temperatura del banano es de 30°C . Para determinar el Coeficiente de transferencia de calor por convección, recordamos que es un flujo de aire a una tasa dada de $150\text{ m}^3/\text{min}$, en un ducto cerrado, asumiendo temperatura constante en la pared del ducto. Primero determinamos el Número de Reynolds con las propiedades del aire a 135°C , entonces tenemos que:

$$\text{Re}_D = \frac{\rho V D_h}{\mu} = \frac{\rho Q A \left(\frac{4A}{P} \right)}{\mu} = \frac{0.8711 \left(\frac{150}{60} \right) (0.0114)^8 \left[\frac{4(0.0114)^8}{10} + 2 \left(\frac{0.0114 + 8}{10} \right) \right]}{230.1 \cdot 10^{-7}} = 19.4$$

El régimen de flujo es laminar. Cuando el régimen de flujo es laminar el Número de Nusselt no depende de la velocidad del fluido sino de la geometría del sistema [REF. 2], que para nuestro caso es un rectángulo en donde uno de los lados es mucho mayor que el otro, obtenemos que para flujo laminar confinado

en ductos rectangulares en donde la relación de sus lados es infinito [REF. 2], tenemos que:

$$Nu_D = 7.54$$

Con el Número de Nusselt y de la definición de éste obtenemos el Coeficiente de Transferencia de Calor:

$$D_h = \left(\frac{4A}{P} \right) = \left[\frac{4(0.0114) \frac{8}{10}}{2 \left(0.0114 + \frac{8}{10} \right)} \right] = 0.0225 \text{ m}$$

$$h = \frac{k Nu_D}{D_h} = \frac{33.8 \cdot 10^{-3} (7.54)}{0.0225} = 11.36 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ K}}$$

Donde D_h es el diámetro hidráulico correspondiente al canal de aire de análisis y h el coeficiente de transferencia de calor para nuestro análisis. Este valor del coeficiente permanecerá constante en todo nuestro análisis

Para determinar el coeficiente de transferencia de masa, podemos aplicar la analogía de Reynolds o la de Colburn, dependiendo de si el valor del número de Schmidt es igual o no al número de Prandtl [REF. 2] correspondiente a la temperatura promedio del aire. El número de Schmidt viene dado por las

propiedades del aire, otra vez a la temperatura promedio, y del valor que se difunde en el aire, esto es:

$$D_{AB} = D_{AB, 298 K} \left(\frac{T}{298} \right)^{3/2} = 0.26 \cdot 10^{-4} \left(\frac{408}{298} \right) = 0.32 \cdot 10^{-4}$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D_{AB}} = \frac{230.1 \cdot 10^{-7}}{0.8711 (0.32 \cdot 10^{-4})} = 0.824$$

Donde D_{AB} es el Coeficiente de Difusión para el agua en aire como una función de la temperatura [REF. 2]. dado que los números de Sc y Pr son diferentes hay que aplicar la analogía de transferencia de calor y masa de Colburn [REF. 3], que establece que:

$$\frac{Nu}{Pr^n} = \frac{Sh}{Sc^n}, \text{ para } n = 1/3$$

De aquí se obtiene el valor del Número de Sherwood y de allí el coeficiente de transferencia de masa por convección h_m :

$$Sh = Nu \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{1/3} = 7.46 \left(\frac{0.824}{0.688} \right)^{1/3} = 7.92$$

$$h_m = \frac{Sh_D D_{AB}}{D_h} = \frac{7.92(0.32 \cdot 10^{-4})}{0.225} = 9.9 \cdot 10^{-4} \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$

2.5 El Proceso de migración de la masa desde el interior del bloque hacia la superficie

Como se indico en secciones anteriores el mecanismo de migración de la masa desde el interior del banano hacia la superficie, debido al alto contenido de agua en él, se asume que es posible modelarlo a través de un proceso de Difusión de masa. Dado que nuestro equivalente geométrico simula a un sólido colocado entre canales de aire, la ecuaciones a utilizarse son aquellas desarrolladas para placa plana. Donde las condiciones inicial viene dada por el contenido inicial de humedad dentro del banano y la condición de borde viene dada por el hecho de que la masa es extraída por el aire a través del mecanismo de convección de masa y la temperatura promedio del aire permanece constante durante todo el proceso.

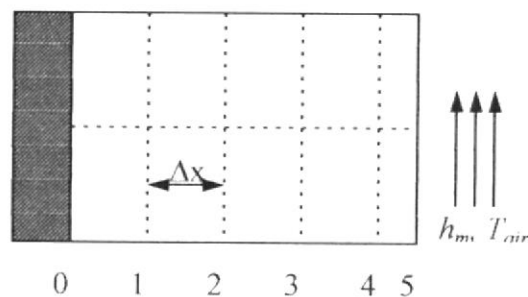


Fig. 2.2 Análisis de un segmento del bloque sólido

Para determinar la variación de la concentración en el interior del bloque con respecto al tiempo utilizamos la ecuación diferencial para Difusión transiente y luego la discretizamos, utilizando el método de diferencias finitas [REF. 2]. Para los nodos interiores esta ecuación discretizada queda de la siguiente forma:

$$C_n^{t+1} = Fo_m (C_{n+1}^t + C_{n-1}^t) + (1 - 2Fo_m) C_n^t \quad (2.1)$$

$$C_0^{t+1} = 2Fo_m (C_1^t) + (1 - 2Fo_m) C_0^t \quad (2.2)$$

$$C_5^{t+1} = 2Fo_m (C_5^t + Bi_m C_\infty) + (1 - 2Fo_m - 2Bi_m Fo_m) C_5^t \quad (2.3)$$

$$Fo_m = \frac{D_{AB} \Delta t}{(\Delta x)^2} \quad (2.4)$$

$$Bi_m = \frac{h_m \Delta x}{k_b} \quad (2.5)$$

$$Fo_m \leq \frac{1}{2(1 + Bi_m)} \quad (2.6)$$

Donde la Ec. 2.1 se aplica para cualquier nodo interior, la Ec. 2.2 para el nodo central del bloque (*midplane node*) y la Ec. 2.3 se aplica para el nodo que esta en contacto con el aire, aquí se incluye el efecto de la transferencia de masa de convección. Las Ecs. 2.4 y 2.5 definen el número de Fourier y el número de Biot respectivamente, el valor del incremento de x es arbitrario pero de éste depende la selección correcta del número de Fourier y por ende del incremento en el tiempo, de acuerdo al criterio de estabilidad que se establece mediante la Ec. 2.6. Como veremos más adelante también éstos números se deben relacionar con los números de Fourier y Biot para el proceso de transferencia de calor, de manera que guarden relación y poder introducir la corrección de la masa dentro de la ecuación de transferencia de calor. El valor de h_m fue determinado anteriormente y el valor de la conductividad es una propiedad del banano, así también conocemos que la concentración inicial viene dada por la contenido de humedad dentro de una masa inicial dada, ésta masa inicial es un dato de la producción de la planta; esta masa total debe dividirse para el número de divisiones hecha para llegar a nuestro volumen de análisis. Es así que la concentración inicial en 746 kg. de banano, que son secados en 1 hr, contenida en nuestro volumen de análisis Vol es:

$$C_n^0 = \frac{746 \cdot \text{Humedad}}{3600 \cdot \text{Numero de divisiones} \cdot \text{Volumen de Analisis}} = \frac{746 \cdot 0.65}{3600 \cdot 250 \cdot (0.8 \cdot 0.33 \cdot 0.0114)} = 0.18 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$$

Con las ecuaciones anteriores, los valores apropiados de las distintas variables y el contenido inicial de humedad se pueden desarrollar tablas en una hoja electrónica y generar gráficos que representan como va cayendo la concentración al interior del banano como una función del tiempo y del espacio. (véase Apéndice A, Gráficos. A.9 a a.13).

2.6 El proceso de Transferencia de Calor al interior del bloque de banano

El proceso de calentamiento del banano, para nuestro caso es el resultado de varios efectos individuales relacionados directamente con el proceso de transferencia de masa. Como se menciona en la sección 2.1, existe evaporación en la superficie exterior del bloque de análisis, esta evaporación se traduce en extracción de energía en forma de calor tanto del interior del banano como del aire, ambos adyacentes a la interfaz de evaporación; éste efecto de evaporación se traduciría en un enfriamiento del banano, sin embargo existe un proceso de transferencia de calor por convección del aire hacia el banano, cuyo efecto global se traduce en calentamiento del banano. El calor producido por la evaporación va directamente relacionado con la masa que ha sido transferida al aire, y así mismo la capacidad de ceder energía que posee el banano va directamente relacionada con el contenido de masa dentro de él, que como hemos calculado

anteriormente varía con el tiempo y con la posición al interior del bloque de análisis.

De aquí que los procesos involucrados en el aumento de temperatura del banano son: transferencia de calor por conducción desde el interior del banano hacia las capas exteriores; transferencia de calor por convección del aire al banano, debido al gradiente de temperatura existente entre el aire y el banano, dicho gradiente va decreciendo con el tiempo y finalmente extracción de Calor del banano hacia la interfaz de evaporación, este efecto extractivo depende directamente de la tasa de evaporación de humedad en la superficie que esta relacionada con el coeficiente de transferencia de masa que posee el aire y la diferencia de concentración de agua existente en la superficie y la concentración de vapor en el aire, depende también del contenido de masa al interior de banano en un instante dado.

Otra vez utilizaremos la transferencia de calor transiente, unidimensional con convección de calor y flujo de calor en la superficie, como condición de borde y como condición inicial, la temperatura del banano inicial igual a 30 °C. Tomando la ecuación diferencial para estado transiente [REF 2.] y discretizandola para los nodos interiores y el nodo central tenemos:

$$\frac{k}{c_p \rho} \frac{T_n^{t+1} - T_n^t}{\Delta t} = \frac{T_{n+1}^t + T_{n-1}^t - 2T_n^t}{(\Delta x)^2} \quad (2.7)$$

En la Ec. 2.7 vemos como uno de los factores la densidad, ésta depende del contenido de masa dentro de un volumen dado, como en nuestro proceso mantenemos el volumen constante lo que varía con respecto al tiempo es la masa, pues así lo determinamos en la sección anterior determinando como varía la masa con el tiempo. Si establecemos que la densidad es igual a la densidad inicial (con 65% de humedad) y que va disminuyendo según el proceso de difusión de masa podemos establecer como varía la densidad, esto es:

$$\rho = \rho_0 \frac{C_n^t}{C_n^0} \quad (2.8)$$

Con esta relación de la densidad se va incluyendo con el transcurso del tiempo el efecto de la reducción de masa dentro del banano como consecuencia de la migración de masa dentro del bloque. Finalmente manejando la Ec. 2.7 e incluyendo el efecto dado por la Ec. 2.8 tenemos que, refiriéndonos a la Fig. 2.2, para los nodos interiores y el nodo del plano centro:

$$T_n^{t+1} = \frac{C_n^t}{C_o^t} Fo (T_{n+1}^t - T_{n-1}^t) + \left(1 - 2Fo \frac{C_n^t}{C_o^t}\right) T_n^t \quad (2.9)$$

$$T_0^{t+1} = 2 \frac{C_n^t}{C_o^t} Fo (T_{n+1}^t) + \left(1 - 2Fo \frac{C_n^t}{C_o^t}\right) T_0^t \quad (2.10)$$

$$Fo = \frac{\Delta t \alpha}{(\Delta x)^2} \quad (2.11)$$

$$Bi = \frac{h \Delta x}{k_b} \quad (2.12)$$

Para el nodo en contacto con el aire y con la interfaz de evaporación nos referimos a la Fig. 2.3 y establecemos el siguiente balance de energía:

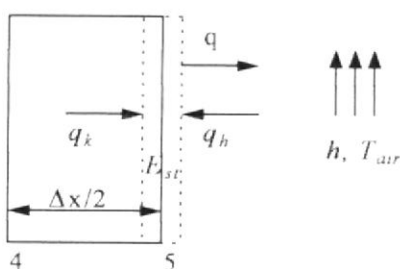


Fig. 2.3 Balance de energía en el nodo 5, o nodo en contacto con el aire.

$$\frac{\rho \frac{C_5^t}{C_0^t} A \Delta x}{\Delta t} (T_5^{t+1} - T_5^t) = \frac{kA}{\Delta x} (T_4^t - T_5^t) + hA(T_5^t - T_\infty) - q$$

$$q = mL = h_m A (C_5^t - C_\infty^t) L \quad (2.13)$$

$$\frac{\rho \frac{C_5^t}{C_0^t} A \Delta x}{\Delta t} (T_5^{t+1} - T_5^t) = \frac{kA}{\Delta x} (T_4^t - T_5^t) + hA(T_5^t - T_\infty) - h_m A (C_5^t - C_\infty^t) L \quad (2.14)$$

El valor de q representado en la Ec. 2.13 es el calor que se le extrae a la superficie como consecuencia de la evaporación de la masa contenida dentro del nodo 5 en el instante t , esa masa que se evapora es acarrreada por el aire mediante un proceso de convección de masa. La Ec. 2.14 es la ecuación de “acople” entre los efectos de transferencia de calor y masa que se produce en la interfase sólido-gas, como consecuencia de los fenómenos existentes y concernientes al proceso de secado de banano; finalmente la ecuación de temperatura en el nodo 5 queda de la siguiente manera:

$$T_5^{t+1} = 2 \frac{C_0^t}{C_5^t} Fo (T_4^t - Bi T_\infty) + \left(1 - 2 \frac{C_0^t}{C_5^t} Fo - 2 \frac{C_0^t}{C_5^t} Bi Fo \right) T_5^t - 2 \frac{C_0^t}{C_5^t} h_m (C_5^t - C_\infty^t) \frac{\Delta t}{\Delta x} L \quad (2.15)$$

En éste caso el criterio de estabilidad a aplicar viene dado por la siguiente ecuación:

$$Fo = \frac{C_5^a}{2(1+Bi)} \quad (2.16)$$

Donde el numerador representa la fracción de masa en cada instante del tiempo, sin embargo dado que es dato el porcentaje de humedad final que tendrá el banano (10 a 15%), reemplazamos ese valor en el numerador en el Ec. 2.16 y tenemos nuestro criterio de estabilidad definido:

$$Fo = \frac{0.1}{2(1+Bi)} \quad (2.17)$$

Como es obvio en la Ec. (2.15) los valores de Bi y Fo deben ser escogidos de tal manera que coincidan los intervalos de tiempo para ambos modelos, el de transferencia de calor y el de transferencia de masa, generalmente los incrementos de tiempo son mayores en el proceso de transferencia de calor transiente que para la difusión transiente, por lo que se debe escoger el incremento de tiempo menor de los dos calculados a través del número de Fourier para Transferencia de Calor y Difusión de masa y aplicarlas a las Ec 2.1 a 2.3 y 2.13 a 2.14.

Ya se ha establecido hasta ahora todas las ecuaciones necesarias para representar el modelo de transferencia de calor y masa dentro del lecho de banano como

consecuencia de la circulación a través de él, los valores del coeficiente de transferencia de calor fue obtenido en la sección 2.4, el valor del incremento en x es un valor independiente, los números de Biot correspondientes a transferencia de calor y masa depende de la elección de éste valor, el número de Fourier máximo depende de la condiciones de estabilidad para cada caso, se escoge de entre los dos el menor para obtener un único incremento de tiempo aplicable a ambos modelos, con estos valores es posible seguir la marcha hacia adelante y obtener las variables temperatura y concentración como una función del tiempo y del espacio hacia el interior del banano.

CAPITULO III

ANÁLISIS DE GRÁFICAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se procederá a probar el modelo con el objetivo de analizar como éste predeciría algunos fenómenos cuyos resultados son conocidos en la literatura concerniente. Esto lo lograremos, partiendo del modelo general, inhibiendo el efecto de ciertos términos de las ecuaciones generales para “aislar” a otros, analizar su comportamiento y compararlo con casos conocidos.

En la Gráfica A.1, apreciamos los perfiles de temperatura al interior del banano que resultarían en el caso hipotético de que se inhibiera los efectos de difusión de masa al interior del banano, la transferencia de masa por convección del banano al aire, el efecto térmico de la evaporación de la humedad en la superficie y sólo se analizara los efectos térmicos producidos por la transferencia de calor por convección del aire al banano y por conducción, al interior de éste. Las condiciones anteriormente mencionadas se reflejarían en las Ec. 2.8 a 2.10 y 2.13 a 2.16 de la siguiente manera:

- I. La relación de concentraciones C_n^t / C_n^0 , sería igual a la unidad y permanecería constante en ese valor durante toda la marcha computacional.
- II. El término que representa la transferencia de masa en la Ecs. 2.13 a 2.15 tendría el valor cero y permanecería constante en este valor durante toda la marcha computacional.

Como muestra la gráfica el efecto térmico de la corriente de aire caliente que circula por el canal -ideado por el modelo- se traduce finalmente en un aumento de la

temperatura del banano, cuyo comportamiento es similar al esperado de transferencia de calor transiente unidimensional, con convección de calor en la superficie de una placa plana [REF 2, 3].

En la Gráfica A.2, apreciamos el efecto térmico sobre el banano producido exclusivamente por un flujo de calor en la superficie de éste que sería equivalente a el efecto producido por la evaporación de la humedad en la superficie, este calor que fluye de la superficie lo toma del interior del banano vía conducción de calor al interior de éste, así mismo, inhibimos los demás fenómenos (la transferencia de masa por convección de la superficie del banano al aire, la transferencia de calor del aire a la superficie del banano, la difusión de masa desde en interior del banano a la superficie) en virtud de poder analizar éste fenómeno. Las condiciones anteriormente mencionadas se reflejarían en las Ec. 2.8 a 2.10 y 2.13 a 2.16 de la siguiente manera:

- I. La relación de concentraciones C_n^t / C_n^0 , sería igual a la unidad y permanecería constante en ese valor durante todo la marcha computacional.
- II. El término que representa la transferencia de calor en la Ecs. 2.13 a 2.15 tendría el valor cero y permanecería constante durante todo el proceso
- III. El término que representa el efecto de la evaporación de la humedad Ec. 2.14, q , permanecería constante durante el proceso y sería igual a una tasa de evaporación dada, m , multiplicada por el valor del calor latente de vaporización del agua a la temperatura del banano, L ,

La gráfica nos muestra que el efecto térmico de un flujo de calor desde la superficie a una tasa constante sobre el banano es de enfriamiento; lo que es razonable puesto que la única fuente de calor para que este fluya desde la superficie es el calor que posee el banano en su interior. Este comportamiento es similar al esperado de transferencia de calor transiente unidimensional, con flujo constante de calor en la superficie de una placa plana [REF 2, 3].

En la Gráfica A.3, apreciamos el efecto térmico al interior del banano -vía conducción de calor- producido, ahora, tanto por la transferencia de calor por convección desde el aire hacia la superficie del banano y por un flujo de calor en la superficie de éste que sería equivalente a el efecto producido por la evaporación de la humedad en la superficie. Otra vez, inhibimos los demás fenómenos (la transferencia de masa por convección de la superficie del banano al aire, la difusión de masa desde en interior del banano a la superficie) en virtud de poder analizar el efecto de estos fenómenos. Las condiciones anteriormente mencionadas se reflejarían en las Ec. 2.8 a 2.10 y 2.13 a 2.16 de la siguiente manera:

- I. La relación de concentraciones C_n^t / C_n^0 , sería igual a la unidad y permanecería constante en ese valor durante todo la marcha computacional.
- II. El término que representa la transferencia de calor en la Ecs. 2.13 a 2.15 tendría el valor cero y permanecería constante durante todo el proceso

III. El término que representa el efecto de la evaporación de la humedad Ec. 2.14, q , permanecería constante durante el proceso y sería igual a una tasa de evaporación dada, m , multiplicada por el valor del calor latente de vaporización del agua a la temperatura del banano, L ,

Como muestra la gráfica el efecto combinado se traduce finalmente en un calentamiento del banano pero a una temperatura inferior a la alcanzada en la Gráfica A.1; esto se debe a que el efecto térmico de calentamiento por convección se ve atenuado por el efecto térmico de absorción de calor producido por la interfaz de evaporación en la superficie del banano. Este efecto combinado que resulta finalmente en calentamiento del banano es un resultado más próximo a la realidad de sistema de deshidratación de banano analizado, puesto que en el proceso real de desecación de banano existen ambos efectos, evaporación de humedad y calentamiento debido al aire, y el resultado final es banano a una temperatura intermedia entre la temperatura inicial que poseía y la temperatura del aire a la salida de éste.

En la Gráfica A.4 se conservan las mismas condiciones establecidas para la figura A.3, pero se analizará el efecto térmico si el área de transferencia toma diferentes valores (1 vez el área, 1.2 veces, 1.4 veces, 1.6 veces, 1.8 veces), para un tiempo determinado (3600 seg). Las condiciones anteriormente mencionadas se reflejarían en las Ec. 2.8 a 2.10, 2.13 a 2.16 de la siguiente manera:

- I. La relación de concentraciones C_n^t / C_n^0 , sería igual a la unidad y permanecería constante en ese valor durante todo la marcha computacional.
- II. El término que representa el efecto de la evaporación de la humedad Ec. 2.14, q , permanecería constante durante el proceso y sería igual a una tasa de evaporación dada, m , multiplicada por el valor del calor latente de vaporización del agua a la temperatura del banano, L .
- III. Al reemplazar el término q en la Ec. 2.15 y despejar la temperatura T_5^t , el término que representa el efecto de extracción de calor por la evaporación de la humedad queda: $mL\Delta t / (\Delta x A)$, donde A , representa el área de transferencia de calor; la cual permanece constante durante el tiempo, pero le asignamos diferentes valores para analizar su efecto.

El efecto térmico de aumentar el área de transferencia se traduce en un aumento de la temperatura; se comprende éste efecto sobre la temperatura puesto que al aumentar el área de transferencia disminuye el efecto de la caída de temperatura por la evaporación de la humedad haciendo más fuerte el efecto de calentamiento por convección.

En la Gráfica A.5, otra vez mantenemos las condiciones establecidas para la Gráfica A.3, pero ahora analizaremos el efecto térmico con respecto al tiempo y en el centro del bloque de análisis que resultaría si fijásemos el valor del contenido de humedad

dentro del banano, para distintos valores de éste (100%, 85%, 70%, 55%) y luego variásemos este contenido linealmente con el tiempo de manera artificial. Las condiciones anteriormente mencionadas se reflejarían en las Ec. 2.8 a 2.10 y 2.13 a 2.16 de la siguiente manera:

- I. La relación de concentraciones C_n^t / C_n^0 , sería igual sucesivamente a la unidad, 0.85, 0.70, 0.55, y permanecería constante en ese valor durante todo la marcha computacional. Luego se asume también que la tasa en la que decrece C_n^t / C_n^0 , con respecto al tiempo es lineal y se analiza éste efecto
- II. El término que representa el efecto de la evaporación de la humedad Ec. 2.14, q , permanecería constante durante el proceso y sería igual a una tasa de evaporación dada, m , multiplicada por el valor del calor latente de vaporización del agua a la temperatura del banano, L .

Como muestra la gráfica el efecto combinado se traduce finalmente en un calentamiento del banano, calentamiento que va disminuyendo conforme el contenido de humedad va disminuyendo y disminuye progresivamente conforme la reducción de masa es lineal con el tiempo; éste efecto de disminución de temperatura conforme se reduce el contenido de masa es comprensible si recordamos que la energía que se transfiere es proporcional al contenido de energía del cuerpo del cual se transfiere que es proporcional a la masa, al disminuir la masa, disminuye el contenido energético por lo tanto disminuye la energía a ser transferida, un índice de

la capacidad de energía a transferir esta dada por la temperatura y en su disminución se ve reflejado el efecto antes mencionado. El análisis realizado nos aproxima más al sistema real, puesto que el contenido de humedad dentro del banano disminuye con el tiempo durante el proceso de secado en el lecho.

En la Gráfica A.6, nuevamente, mantenemos las condiciones establecidas para la Gráfica A.5, pero además de variar el contenido de humedad linealmente con el tiempo de manera artificial, se analizará el efecto térmico de aumentar el área de transferencia, de manera semejante al análisis realizado en la Gráfica A.4. Las condiciones anteriormente mencionadas se reflejarían en las Ec. 2.8 a 2.10 y 2.13 a 2.16 de la siguiente manera:

- I. La relación de concentraciones C_n^t / C_n^0 , varía linealmente con respecto al tiempo y se analiza éste efecto
- II. El término que representa el efecto de la evaporación de la humedad Ec. 2.14, q , permanecería constante durante el proceso y sería igual a una tasa de evaporación dada, m , multiplicada por el valor del calor latente de vaporización del agua a la temperatura del banano, L .
- III. Al reemplazar el término q en la Ec. 2.15 y despejar la temperatura T_s^t , el término que representa el efecto de extracción de calor por la evaporación de la humedad queda: $mL\Delta t / (\Delta x A)$, donde A , representa el área de transferencia de calor; la cual

permanece constante durante el tiempo, pero le asignamos diferentes valores para analizar su efecto.

Como muestra la gráfica el efecto combinado se traduce finalmente en un calentamiento del banano pero a una temperatura superior a la alcanzada en la Gráfica A.5 conforme aumenta el área de transferencia; se comprende éste efecto sobre la temperatura, puesto que al aumentar el área de transferencia, disminuye el efecto de la caída de temperatura por la evaporación de la humedad, haciendo más fuerte el efecto de calentamiento por convección.

En la Gráfica A.7, nuevamente, mantenemos las condiciones establecidas para la Gráfica A.6, pero además de variar el contenido de humedad linealmente con el tiempo de manera artificial, se analizará el efecto de aumento y disminución de la pendiente en la variación lineal para un valor determinado del área. Las condiciones anteriormente mencionadas se reflejarían en las Ec. 2.8 a 2.10 y 2.13 a 2.16 de la siguiente manera:

- I. La relación de concentraciones C_n^t / C_n^0 , varía linealmente con respecto al tiempo para diferentes valores de la pendiente y se analiza éste efecto
- II. El término que representa el efecto de la evaporación de la humedad Ec. 2.14, q , permanecería constante durante el proceso y sería igual a una tasa de evaporación

dada, m , multiplicada por el valor del calor latente de vaporización del agua a la temperatura del banano, L .

El efecto del aumento de la pendiente (2 veces la pendiente), logra que la desecación del banano sea más rápida, por lo tanto el proceso toma menos tiempo y el nivel de temperatura alcanzado es apreciablemente menor que el obtenido con pendiente 1; este efecto de reducción en el nivel de temperatura puede interpretarse de la siguiente manera: al existir una reducción drástica del contenido de humedad implica que el efecto de evaporación es más marcado que el efecto de calentamiento por convección, resultando finalmente en una reducción de temperatura comparada con la obtenida en la pendiente 1. El efecto de la disminución de la pendiente (pendiente $1/2$) es exactamente el opuesto al obtenido para la pendiente 2, puesto que el calentamiento por la transferencia de calor por convección es más marcado que el de la evaporación.

La Gráfica A.8, es semejante a la Gráfica A.7, con la diferencia de que la pendiente de caída de humedad cambia en un momento determinado, dentro del tiempo de análisis, de 2 veces la pendiente a $1/2$ veces la pendiente. Las condiciones anteriormente mencionadas se reflejarían en las Ec. 2.8 a 2.10, 2.13 a 2.16 de la siguiente manera:

- I. La relación de concentraciones C_n^t / C_n^0 , decrece linealmente con respecto al tiempo y en un momento determinado cambia la pendiente de 2 a 1/2.
- II. El término que representa el efecto de la evaporación de la humedad Ec. 2.14, q , permanecería constante durante el proceso y sería igual a una tasa de evaporación dada, m , multiplicada por el valor del calor latente de vaporización del agua a la temperatura del banano, L .

El efecto de el cambio del valor de la pendientes es exactamente el mismo que el mencionado para la Gráfica A.7, pero a diferencia de ésta gráfica, la pendiente no permanece constante con respecto al tiempo sino que su valor cambia de 2 a 1/2 en un instante dado, a pesar de ello el efecto mencionado anteriormente para pendiente 2 permanece, así como el correspondiente para pendiente 1/2. Este efecto de cambiar el valor de la pendiente nos acerca más al proceso real de secado en el lecho, pues la caída de humedad en el banano se produce primeramente muy rápido (pendiente 2) y luego lentamente (pendiente 1/2).

En las Gráfica A.9 a A.13, apreciamos los perfiles de temperatura, con respecto al tiempo en el centro de la rodaja de banano, que resultarían si existiesen al mismo tiempo los efectos de transferencia de calor del aire hacia el banano, conducción de calor a través del banano, evaporación continua de humedad en la superficie del banano, difusión de masa desde el interior del banano, y transferencia de masa desde

la superficie del banano hacia el aire. Ahora se aplicarán todas las ecuaciones desarrolladas en el Capítulo II.

Podemos asumir que el efecto combinado de los fenómenos mencionados anteriormente, es igual a la suma de los efectos individuales de cada fenómeno. En la Gráfica A.9 podemos apreciar el perfil de Temperatura vs. tiempo en el centro del bloque de banano y el contenido de humedad que cede la masa de banano al aire como una función del tiempo, durante un tiempo de secado de 2 hr, observamos que a partir de los 3600 seg prácticamente la masa que migra hacia el aire no varía, lo que significa que ya ha llegado a estado estable, sin embargo aún permanece el aumento de temperatura, lo cual puede entenderse que se debe a que el efecto de evaporación ya ha terminado y pesa solamente el efecto de calentamiento por convección el cual ahora afecta a la fibra; la Gráfica A.10 es semejante a la anterior pero el tiempo de secado es 1 hr. La Gráfica A.11 representa el perfil de temperatura al interior de banano para varios instantes de tiempo, como es notorio a los 3600 seg. ya la temperatura no varía mayormente al interior del banano. La Gráfica A.12 nos permite observar la caída de concentración en el centro del bloque de análisis como una función del tiempo, la disminución de la concentración permanece hasta los 3600 seg. a partir de la cual se encuentra en estado estable, esto se debe al aumento de la concentración de humedad en el aire producto de la migración de la humedad desde el banano hacia el aire. La Gráfica A.13, nos permite ver el contenido de humedad que ha ganado el aire (tomado con referencia a la masa cedida por el banano) con

respecto al tiempo y la fracción de masa evaporada acarreada por el aire con respecto al tiempo.

La Gráfica A.14 nos representa como varía la caída de presión dentro del lecho de banano como una función de la temperatura. La fórmula para determinar la caída de presión dentro de un lecho estático, por el cual atraviesa un fluido que no cambia de fase mientras se encuentra en el lecho viene dada por [REF. 1]:

$$\frac{\Delta p}{H} \frac{g'_c \varepsilon^3 D_h \rho_G}{(1-\varepsilon) m^2} = \left(\frac{1}{Re_{D_h}} + 1.75 \right)$$

Donde: Δp , es la caída de presión en lb/ft²; H , la altura del lecho en ft; D_h , el diámetro hidráulico en ft; ε , la fracción vacía; ρ_G , la densidad del gas a la temperatura del gas; G , flujo másico del gas en lb/ hr ft²; g'_c , es una constante de proporcionalidad; Re_{D_h} , el número de Reynolds. Como sabemos el número de Reynolds varía según el flujo másico de aire y la propiedades del fluido a la temperatura del fluido, manteniendo constante el flujo másico de aire, entonces depende el número de Reynolds de las propiedades que dependen de la temperatura y finalmente la presión depende del valor del número de Reynolds.

En la Gráfica A.15 se representa la caída de presión como una función de la altura del lecho, para un valor fijo de la temperatura, que fue elegida en temperatura promedio del aire de 135 °C.

CAPITULO IV

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES SOBRE EL MODELO

4.1 Conclusiones

- El modelo permite predecir la temperatura final del banano (aprox. 90°C) y el nivel de humedad final del banano (aprox. 10% de humedad), en el tiempo requerido (1 hora).
- El modelo permite predecir la concentración de vapor en el aire (0.09 kg/m^3) al final del proceso de secado dentro del horno.
- El modelo permite predecir la influencia de la altura de lecho (a través del conocimiento del área cubierta por el lecho de banano que es una función de la altura de la cama) en el proceso de secado de banano y a partir de allí, mediante un análisis posterior es posible determinar la altura óptima de cama.
- El modelo permite determinar la caída de presión dentro del lecho de banano.
- El modelo permite determinar la influencia del flujo másico del aire y la temperatura inicial del banano en el proceso de secado.
- El modelo no estudia la influencia de la velocidad de giro del tambor sobre el proceso de secado.
- El modelo no puede determinar el efecto en el cambio de temperatura del aire sobre el secado del banano, puesto que para el análisis se ha tomado un temperatura promedio de éste para los procesos que involucran transferencia de calor.

- El modelo no actualiza los valores de las propiedades conforme transcurre el tiempo por lo que no es posible, a través de él, determinar la influencia de las propiedades del material sobre el proceso de secado.
- El modelo, debido a que no actualiza el valor de las propiedades con el tiempo, tampoco actualiza los valores de los coeficientes convectivos de calor y masa, y los hace permanecer constantes durante el proceso analizado.
- El modelo no permite predecir como varían el contenido de masa, la temperatura y la tasa de migración de humedad en la dirección longitudinal a la altura del lecho, puesto que se asumió procesos transientes unidimensionales.
- La densidad del material es actualizada conforme transcurre el tiempo porque el modelo utiliza difusión transiente para determinar como varía la masa con el tiempo.
- El modelo permite inferir la cantidad de energía necesaria para llevar al banano de su condición de humedad inicial a la final
- El modelo permite inferir la influencia que tiene el espesor de rodaja de banano, en el proceso de secado, ajustando el valor del espesor del bloque sólido de análisis.
- El modelo predice correctamente el comportamiento del material bajo condiciones conocidas de transferencia de calor y masa, por ejemplo: Transferencia de calor transiente con convección de calor a temperatura constante en la superficie, Transferencia de calor transiente para flujo de calor

constante en la superficie, Transferencia de masa transiente con convección de masa en la superficie. Y también predice correctamente el comportamiento si alguna de los parámetros varían para alguno de estos casos conocidos, por ejemplo: variación del área de transferencia de calor y masa, cambio en las condiciones iniciales de temperatura y concentración, cambio en los coeficientes convectivos de calor y masa y otros similares.

4.2 Recomendaciones

- Comparar las curvas de temperatura, concentración y contenido de masa vs. tiempo dadas por el modelo con aquellas obtenidas mediante experimentación, para corregir el modelo según sea el caso.
- Determinar la variación de la temperatura del aire con el tiempo, para poder mejorar el modelo, evitando el uso de una temperatura promedio del aire durante el proceso de secado
- Investigar como la variación de las propiedades termodinámicas (conductividad, calor específico, difusividad térmica) tanto del material, conforme su contenido de humedad, como del aire, de acuerdo a la variación de temperatura de éste mientras atraviesa el lecho de banano, influyen sobre el proceso de secado utilizando el modelo.
- Actualizar los valores de todas las propiedades termodinámicas, según el contenido de humedad -descrito por un proceso de difusión transiente- y la

temperatura -según un modelo de transferencia de calor transiente- con el tiempo, para actualizar los valores de los coeficientes convectivos, que influyen decididamente en el comportamiento del modelo.

- Mejorar, si es posible, el equivalente geométrico del lecho de banano, pero sin variar la visión de utilizar el análisis de placa plana introducido por el modelo. Una sugerencia sería, por ejemplo, conservar el análisis de placa plana, pero que la placa tuviera una altura variable, como lo es en el lecho donde la altura de éste pasa de un máximo a un mínimo. Otra sugerencia sería afinar el espesor de los canales por donde circula el aire, que para el análisis fue obtenido mediante la fracción vacía dentro del lecho y de la relación área vacía - área total.
- Analizar la influencia que tiene la velocidad de giro del horno sobre el proceso de secado de banano.
- Introducir un análisis bidimensional de los procesos transcientes analizados por éste modelo, para estudiar como varia el contenido de humedad del aire conforme atraviesa el lecho, y su influencia en los demás procesos involucrados.

APÉNDICE A

GRÁFICO A.1
MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA AL
INTERIOR DEL BANANO DEBIDO A LA TRANSFERENCIA DE
CALOR DEL AIRE AL BANANO

Perfiles de Temperaturas como una función del espesor de bloque, para distintos tiempos, sin considerar la tasa de evaporación y sin factor de corrección del área

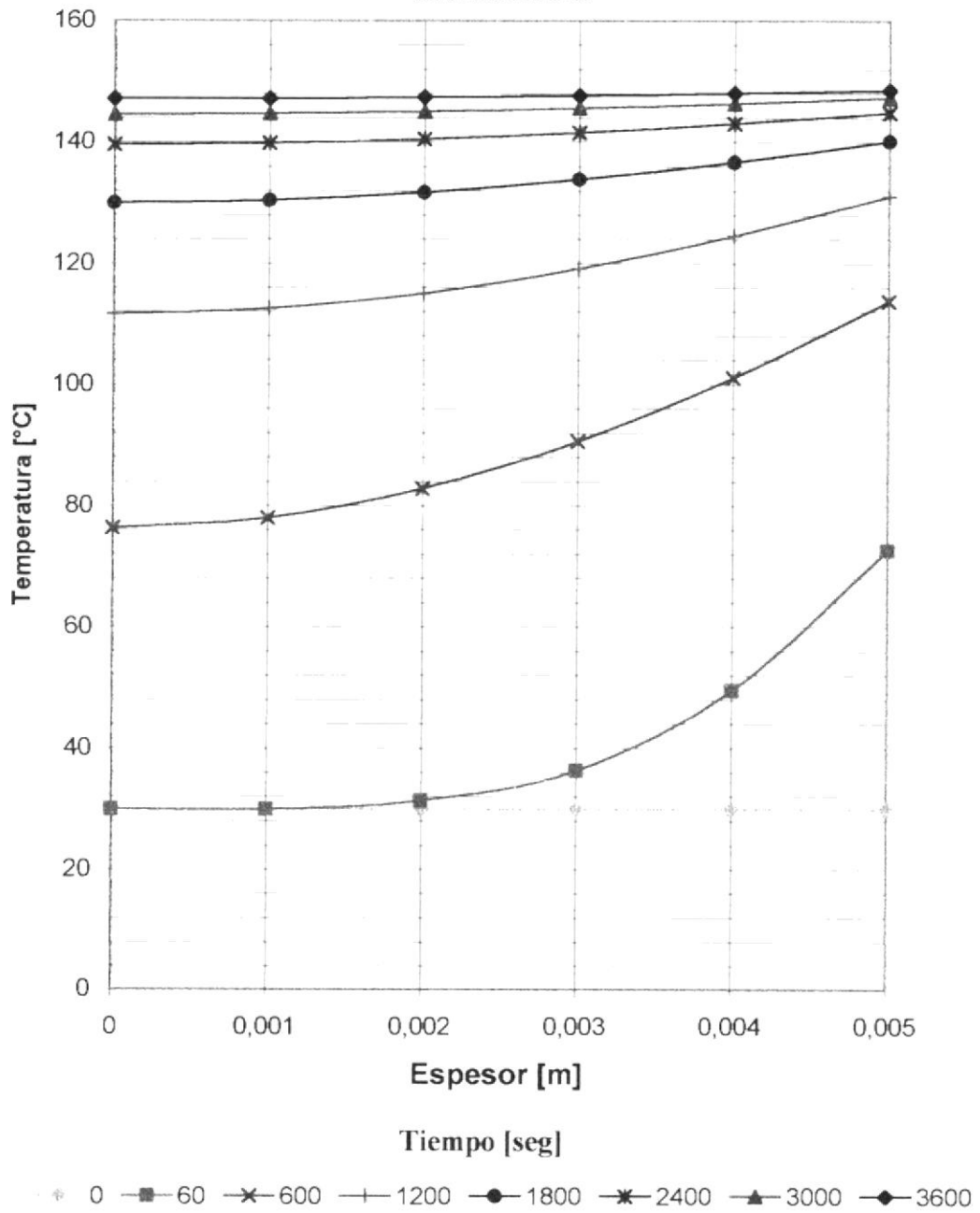


GRÁFICO A.2
MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA AL
INTERIOR DEL BANANO DEBIDO AL EFECTO DE EVAPORACIÓN
DEL AGUA CONTENIDA EN ÉL

Perfiles de Temperaturas como una función del espesor de bloque, para distintos tiempos, con tasa de evaporación constante, sin corrección del contenido de masa y sin factor de corrección del área

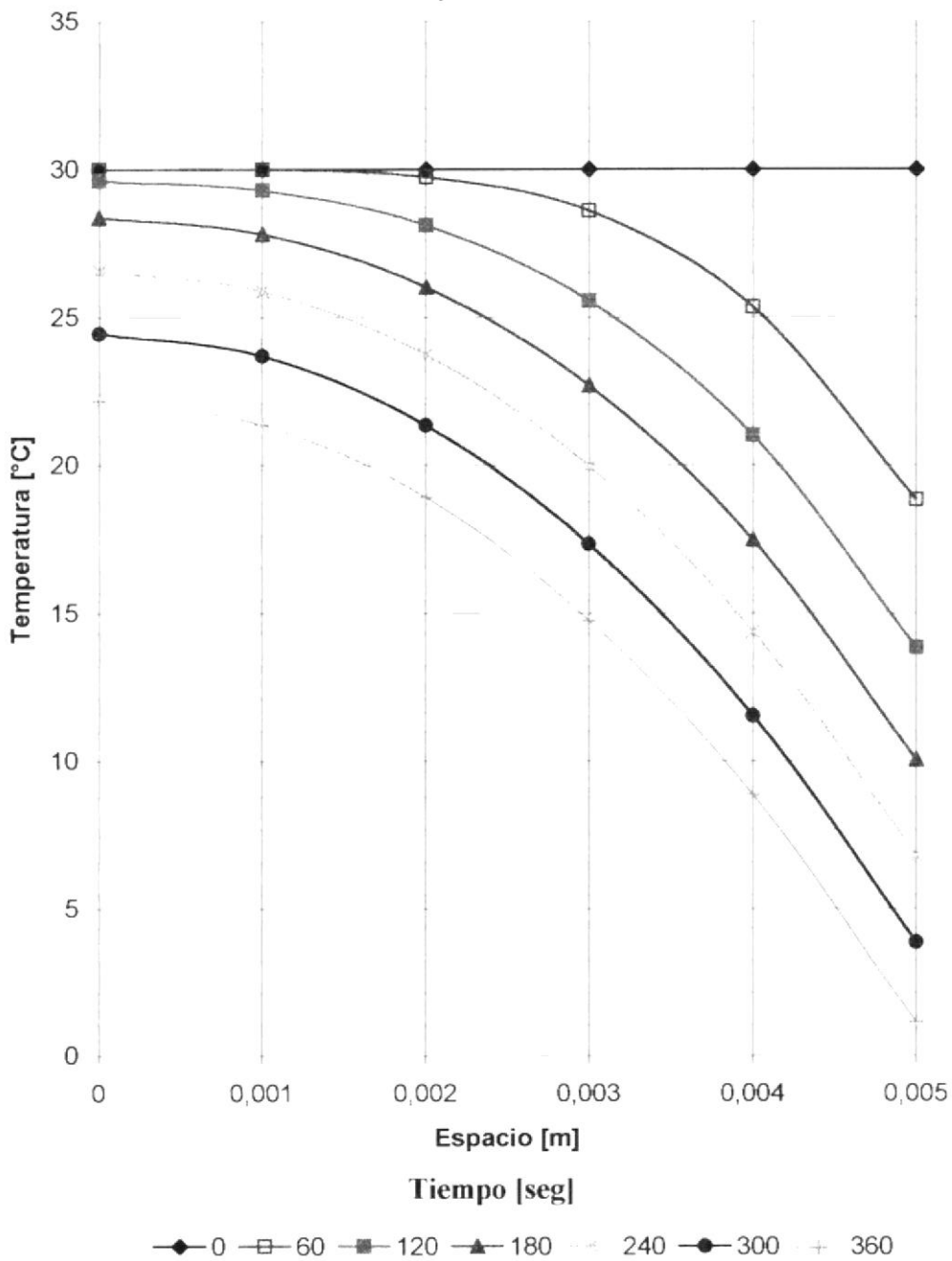


GRÁFICO A.3
MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA AL
INTERIOR DEL BANANO POR LOS EFECTOS DE ENFRIAMIENTO
EVAPORATIVO Y CALENTAMIENTO POR CONVECCION DE
CALOR DEL AIRE AL BANANO

Perfiles de Temperaturas como una función del espesor de bloque, para distintos tiempos, con tasa de evaporación constante, sin corrección del contenido de masa y sin factor de corrección del área

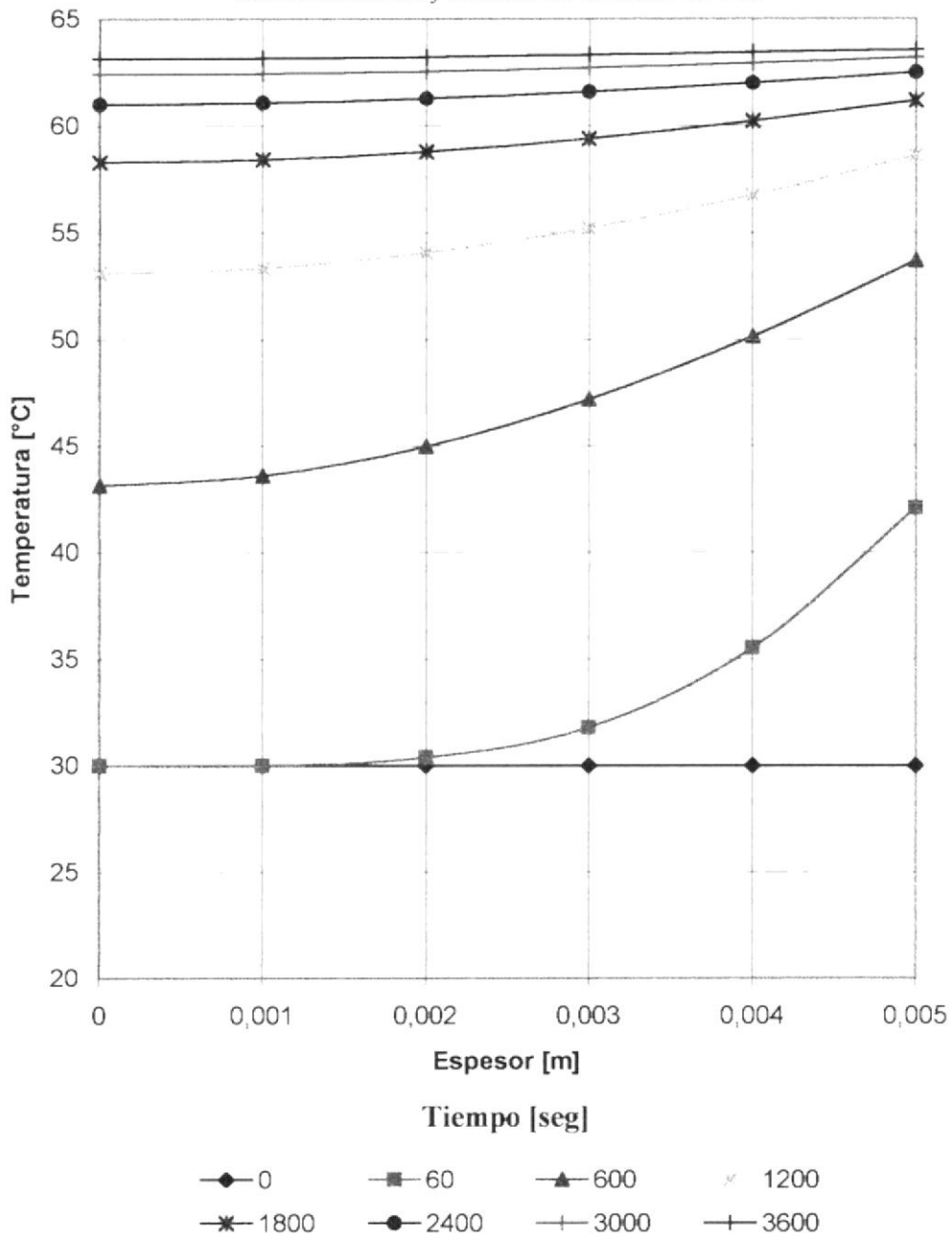
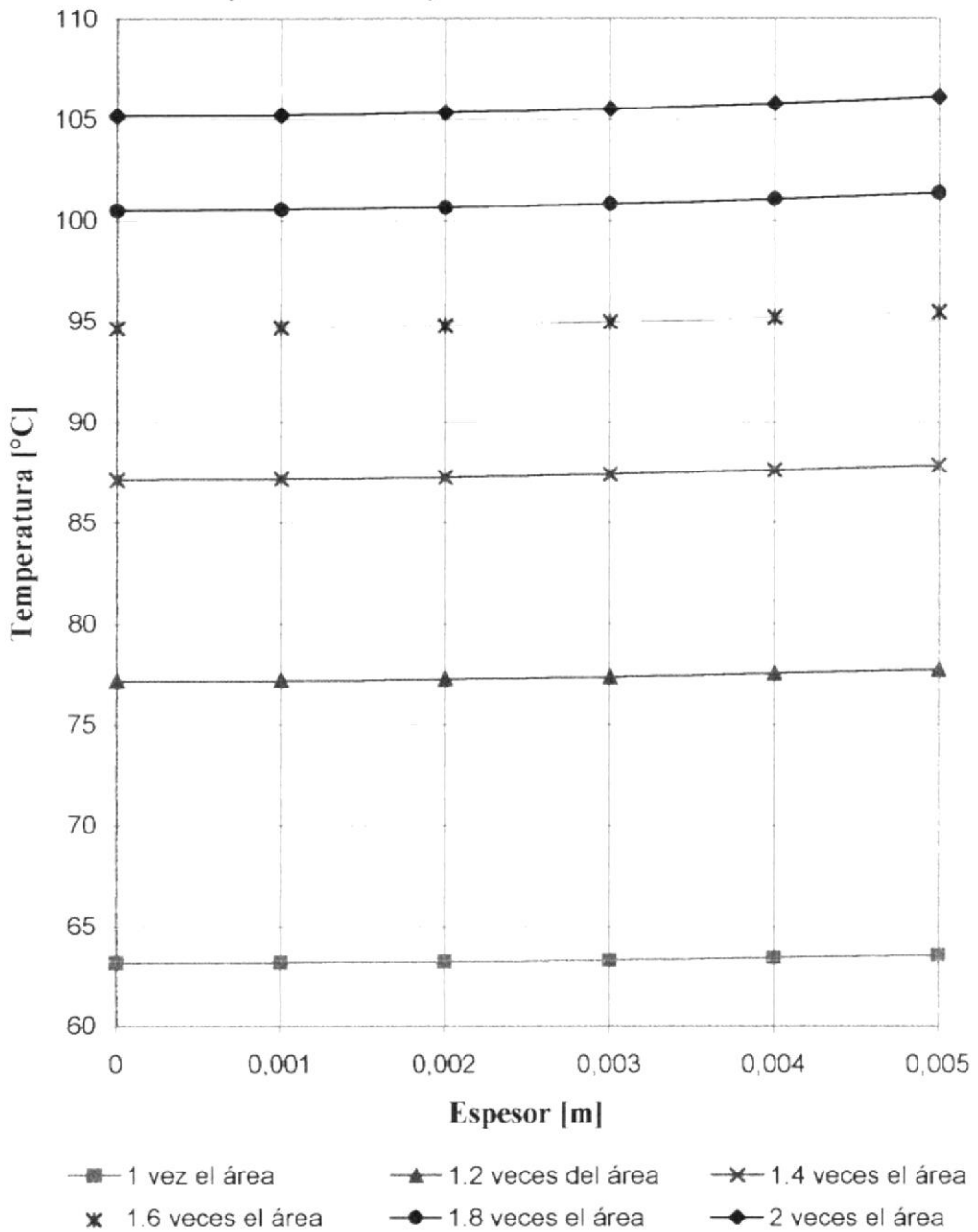


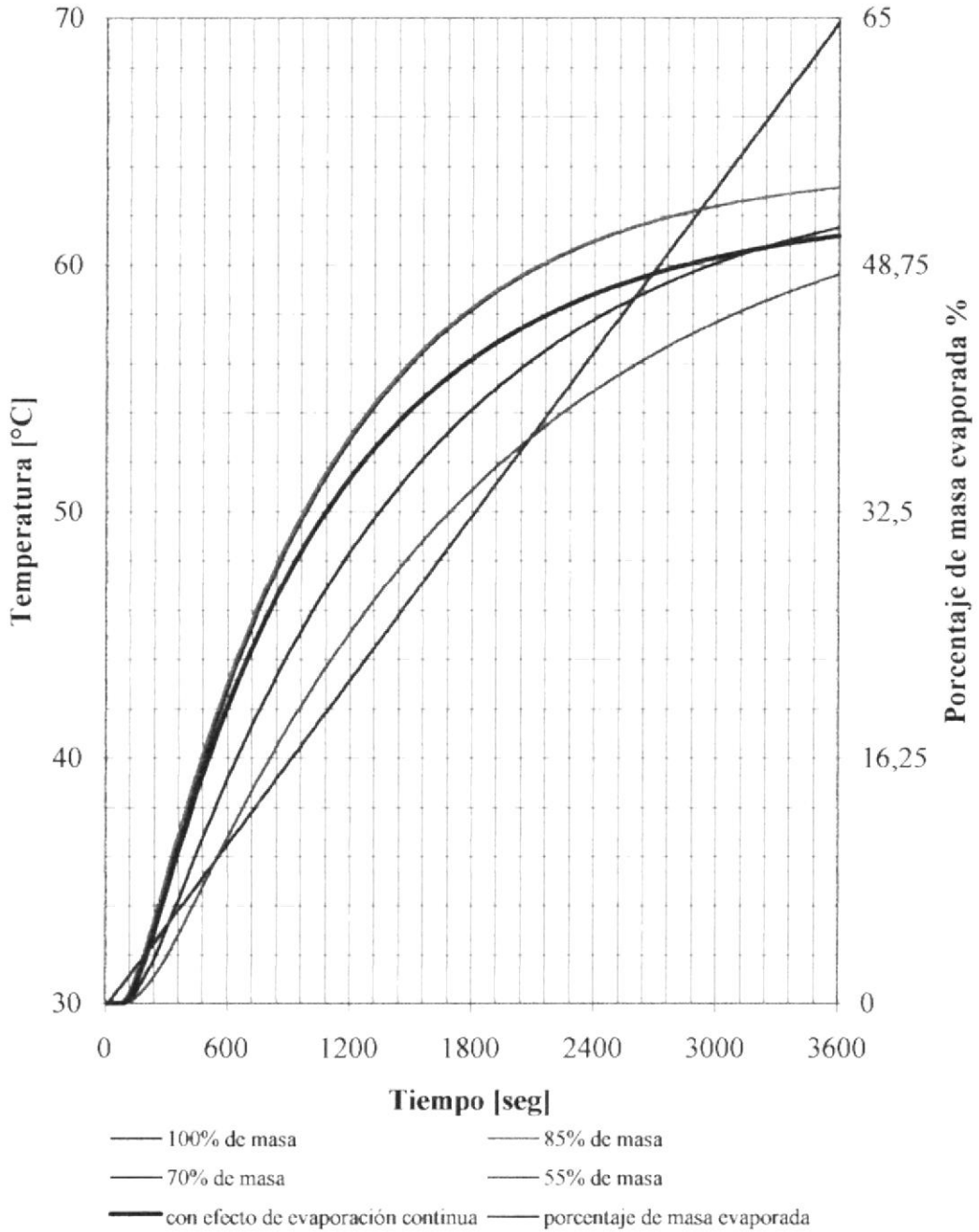
GRÁFICO A.4
MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA AL
INTERIOR DEL BANANO POR LOS EFECTOS DE ENFRIAMIENTO
EVAPORATIVO Y CALENTAMIENTO POR CONVENCIÓN DE
CALOR DEL AIRE AL BANANO

Perfil de Temperatura como una función del espesor de banano, en una hora para diferentes valores del factor de corrección del área con tasa de evaporativa promedio constante y sin corrección del contenido de masa



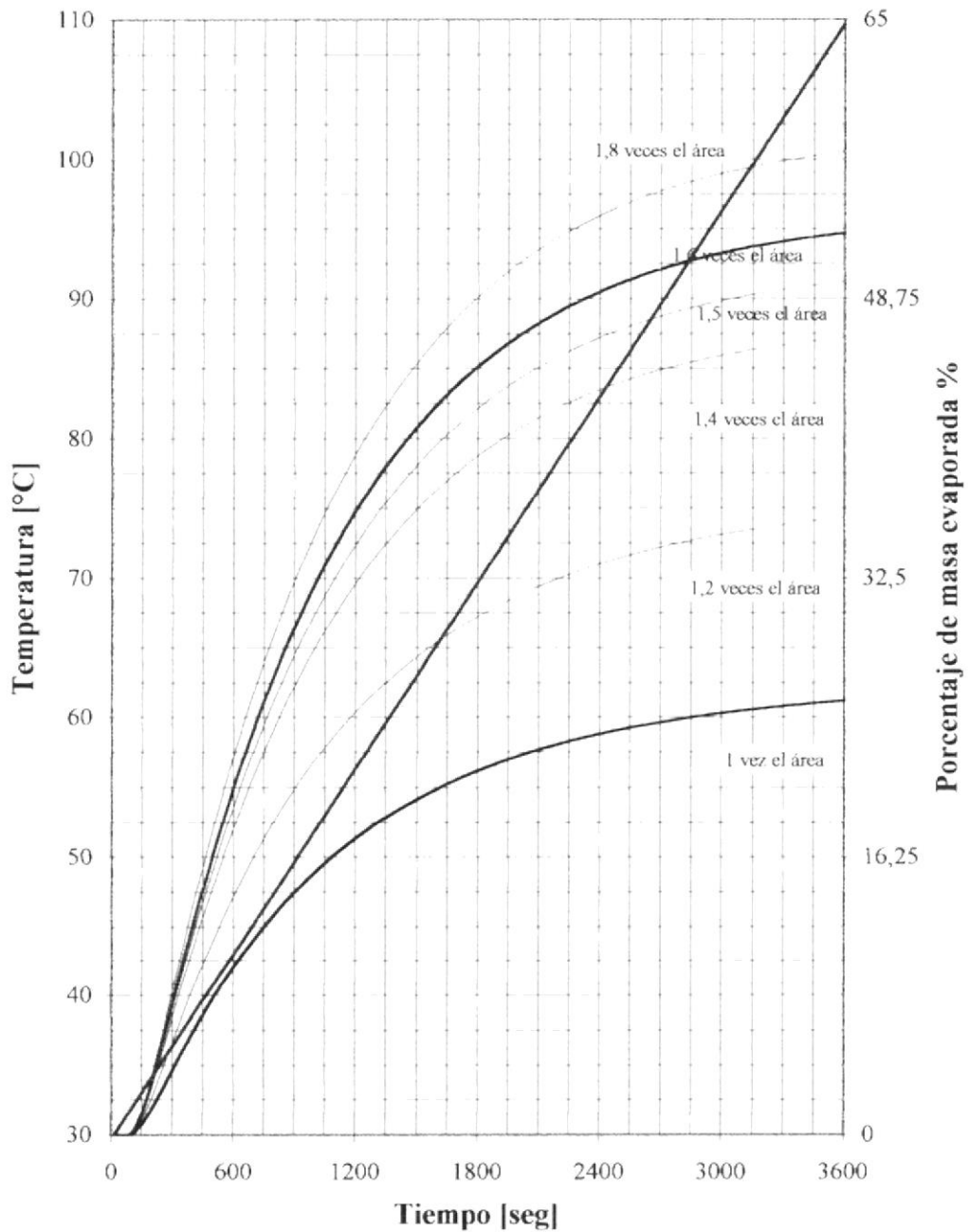
GRÁFICA A.5
MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA AL
INTERIOR DEL BANANO POR LOS EFECTOS DE ENFRIAMIENTO
EVAPORATIVO Y CALENTAMIENTO POR CONVENCION DE
CALOR DEL AIRE AL BANANO

Perfil de Temperatura vs. tiempo en el plano medio del bloque de análisis para
varios porcentajes de masa



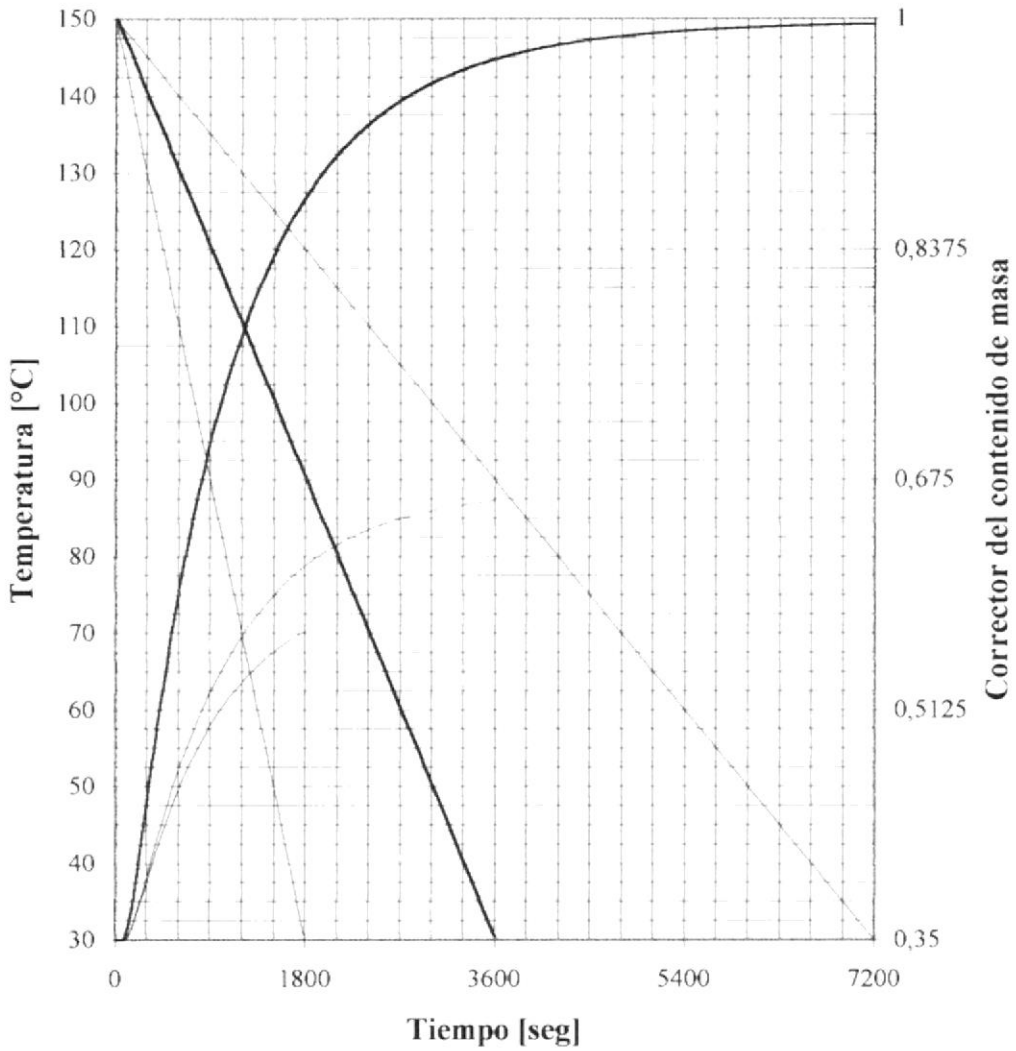
GRÁFICA A.6
MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA AL
INTERIOR DEL BANANO POR LOS EFECTOS DE ENFRIAMIENTO
EVAPORATIVO Y CALENTAMIENTO POR CONVECCION DE
CALOR DEL AIRE AL BANANO

Perfil de Temperatura vs. tiempo en el plano medio del bloque de análisis, con
 variación continua y lineal de la masa por efecto de la evaporación, para
 diferentes valores de área de transferencia



GRÁFICA A.7
MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA AL
INTERIOR DEL BANANO POR LOS EFECTOS DE ENFRIAMIENTO
EVAPORATIVO Y CALENTAMIENTO POR CONVENCION DE

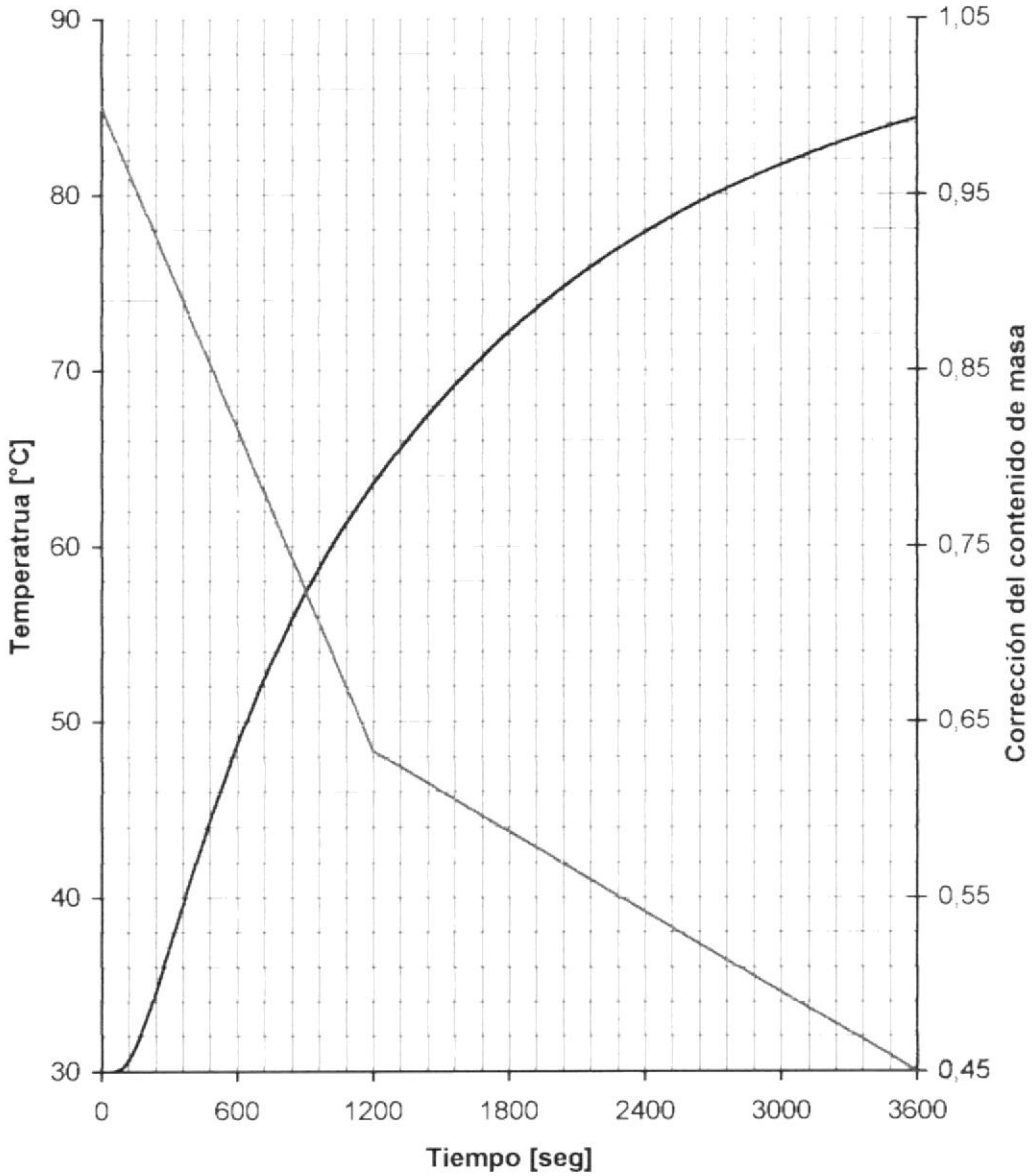
Perfil de Temperatura vs. tiempo en el plano medio del bloque de análisis, para 40% más de área de transferencia, para distintos correctores de contenido de masa por efecto de la evaporación



- perfil de temperatura, pendiente de contenido: 1
- perfil de temperatura, pendiente de contenido: 2
- perfil de temperatura, pendiente de contenido: 1/2
- corrector de contenido de masa, lineal de pendiente 1
- corrector contenido de masa, lineal de pendiente 2
- corrector de contenido de masa, lineal de pendiente 1/2

GRAFICO A.8
MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA AL
INTERIOR DEL BANANO POR LOS EFECTOS DE ENFRIAMIENTO
EVAPORATIVO Y CALENTAMIENTO POR CONVENCION DE
CALOR DEL AIRE AL BANANO

Perfil de Temperatura vs. tiempo en el plano medio del bloque de análisis, para 50% más de área de transferencia, con cambio en la pendiente (de 2 a 1/2) del factor de corrección de contenido de masa

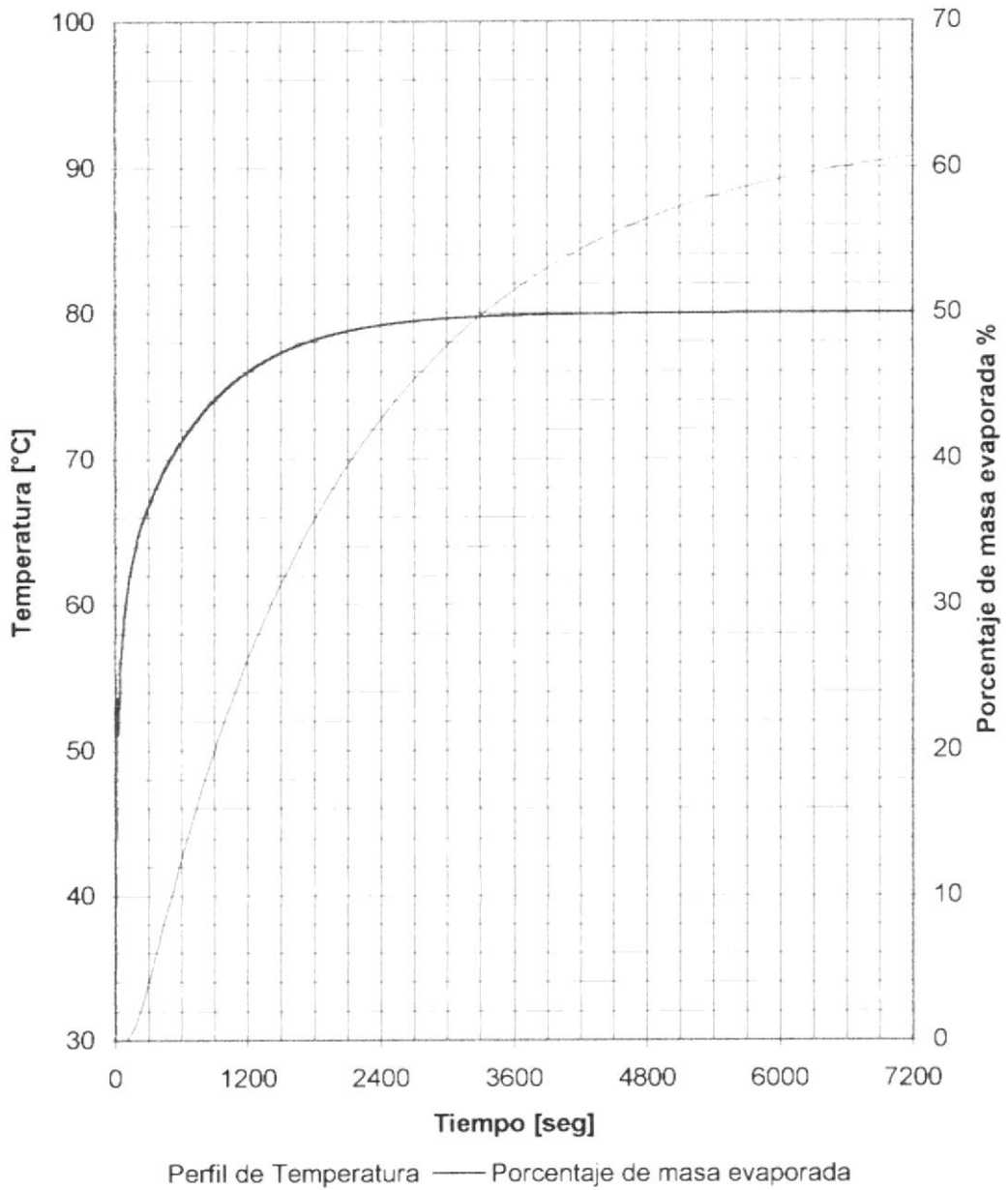


- perfil de temperatura
- - - Corrector de contenido de masa, con cambio de pendiente: 2 a 1/2

GRÁFICA A.9

MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA AL INTERIOR DE BANANO POR EFECTO DE LA DIFUSIÓN DE MASA, DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN DEL AIRE AL BANANO, TRANSFERENCIA DE MASA POR CONVECCIÓN DEL BANANO AL AIRE Y EL ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO

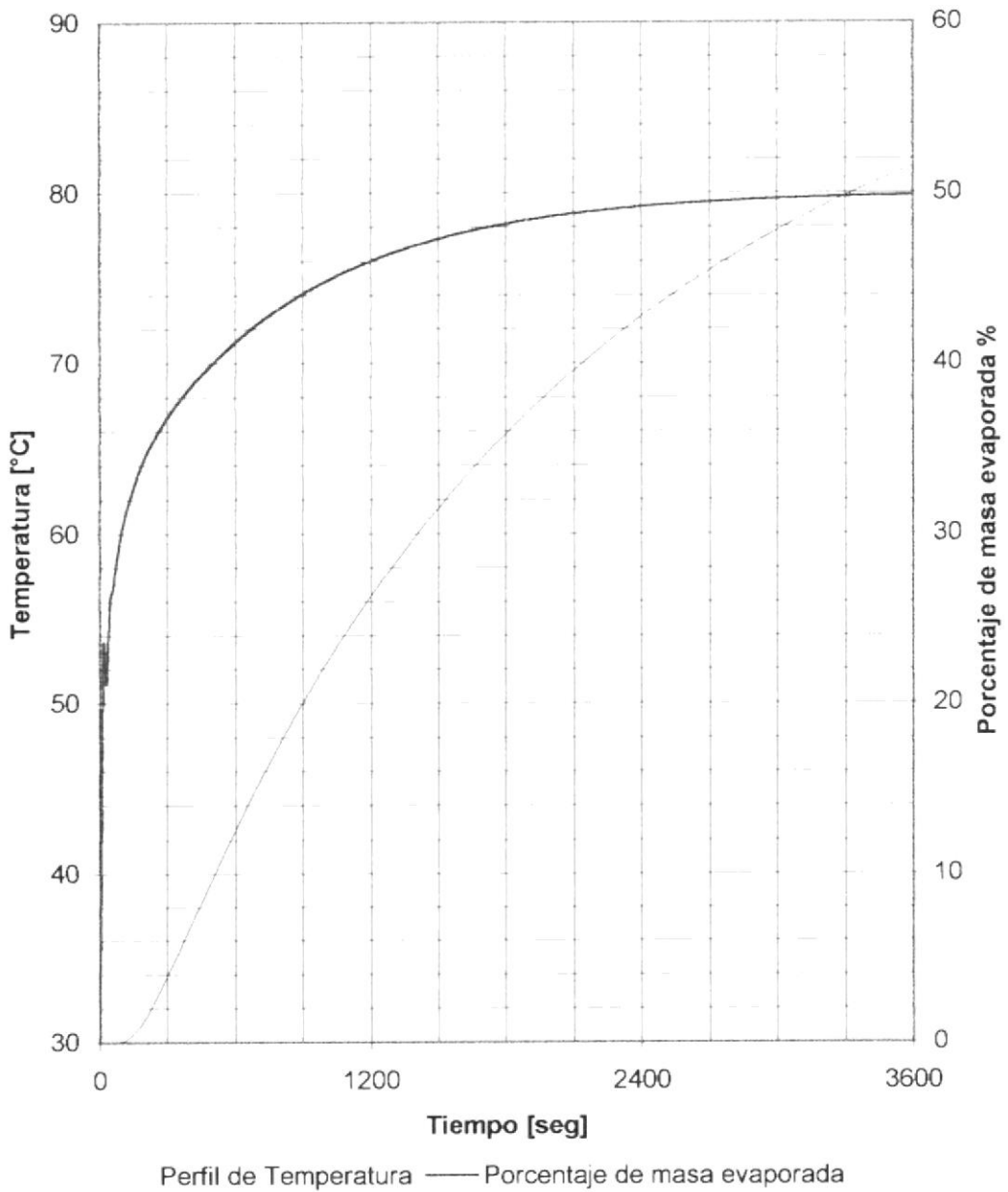
Perfil de Temperatura en la plano medio del bloque de análisis considerando el efecto de la reducción de la masa contenida dentro del bloque debido a la migración de humedad dentro del él, modelado a través de un proceso de difusión transiente con convección de masa como condición de borde



GRÁFICA A.10

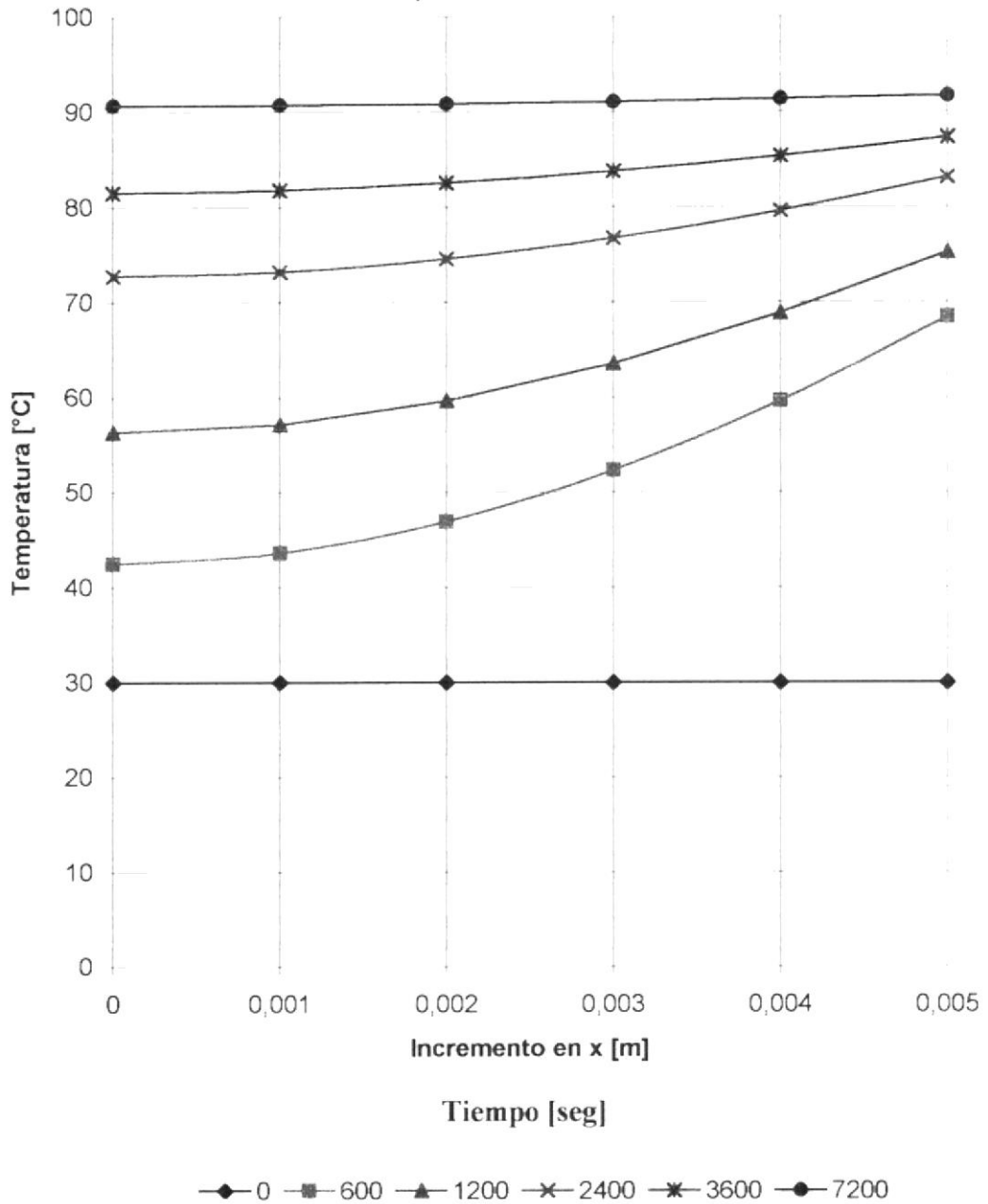
MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA AL INTERIOR DE BANANO POR EFECTO DE LA DIFUSIÓN DE MASA, DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN DEL AIRE AL BANANO, TRANSFERENCIA DE MASA POR CONVECCIÓN DEL BANANO AL AIRE Y EL ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO

Perfil de Temperatura en la plano medio del bloque de análisis considerando el efecto de la reducción de la masa contenida dentro del bloque debido a la migración de humedad dentro del él, modelado a través de un proceso de difusión transiente con convección de masa como condición de borde



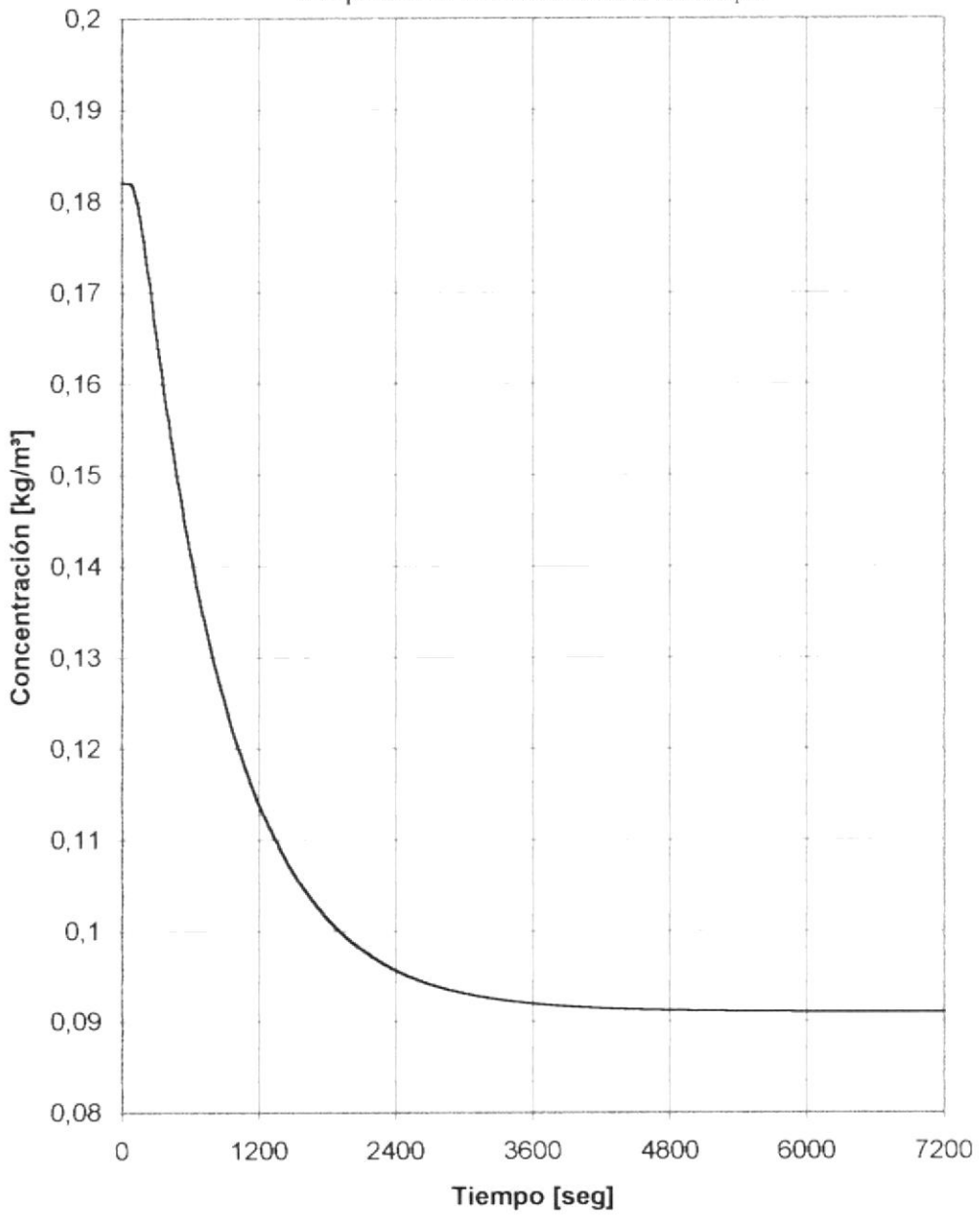
GRÁFICA A.11
MODELO PARA LA DISTRIBUCIÓN DE TEMPERATURA AL
INTERIOR DE BANANO POR EFECTO DE LA DIFUSIÓN DE MASA,
DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN DEL AIRE
AL BANANO, TRANSFERENCIA DE MASA POR CONVECCIÓN DEL
BANANO AL AIRE Y EL ENFRIAMIENTO EVAPORATIVO

Perfiles de Temperatura para diferentes instantes del tiempo al interior del
 bloque de análisis de banano



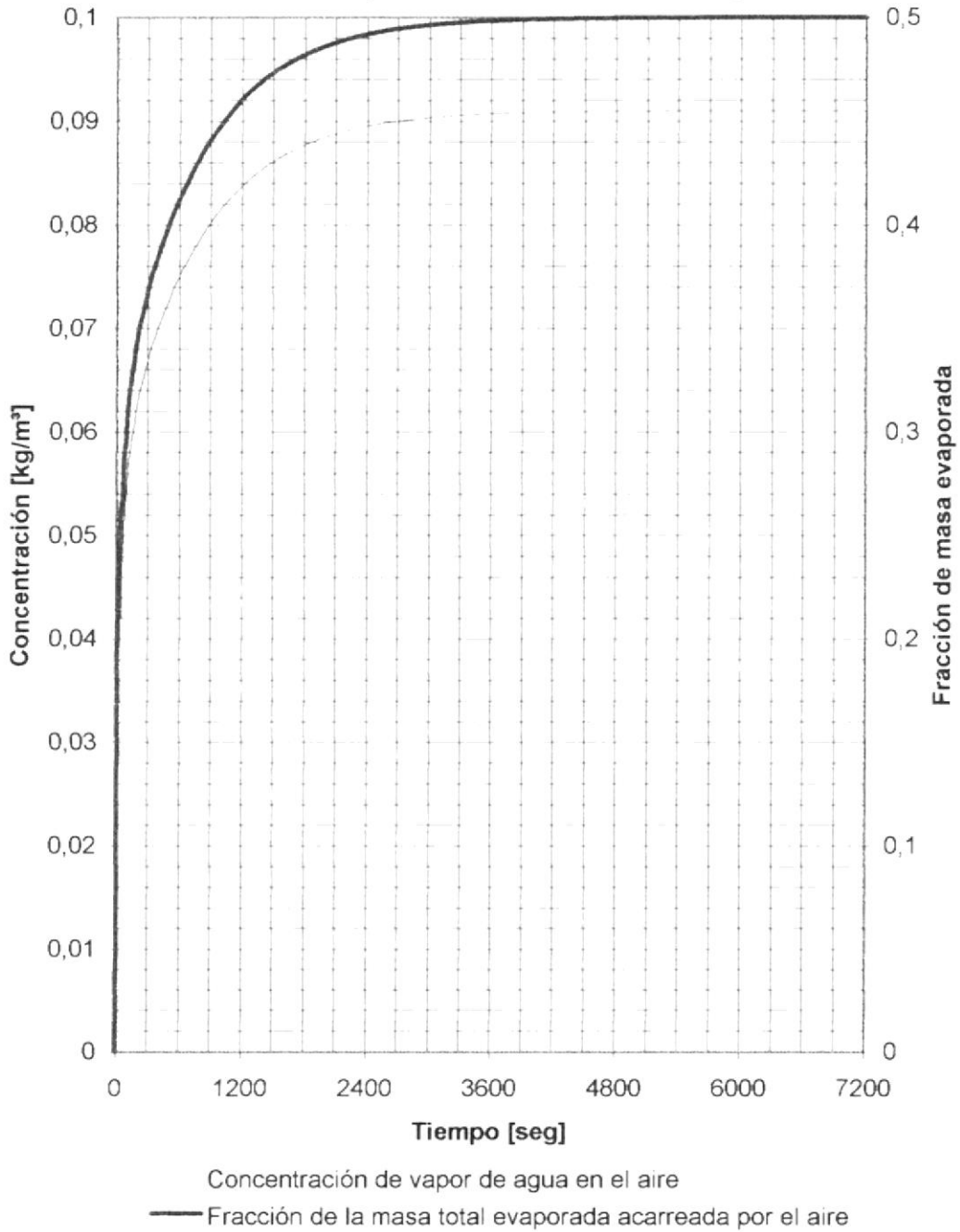
GRÁFICA A.12
MODELO PARA LA DISTRIBUCION DE CONCENTRACION DE
AGUA DENTRO DEL BANANO POR EFECTO DE LA
TRANSFERENCIA DE MASA POR CONVECCIÓN DEL BANANO AL
AIRE

Perfil de Concentración, en el plano medio del bloque de análisis con
concentración de vapor de agua en el aire variable en el tiempo y proporcional
a la pérdida de masa en el interior del bloque

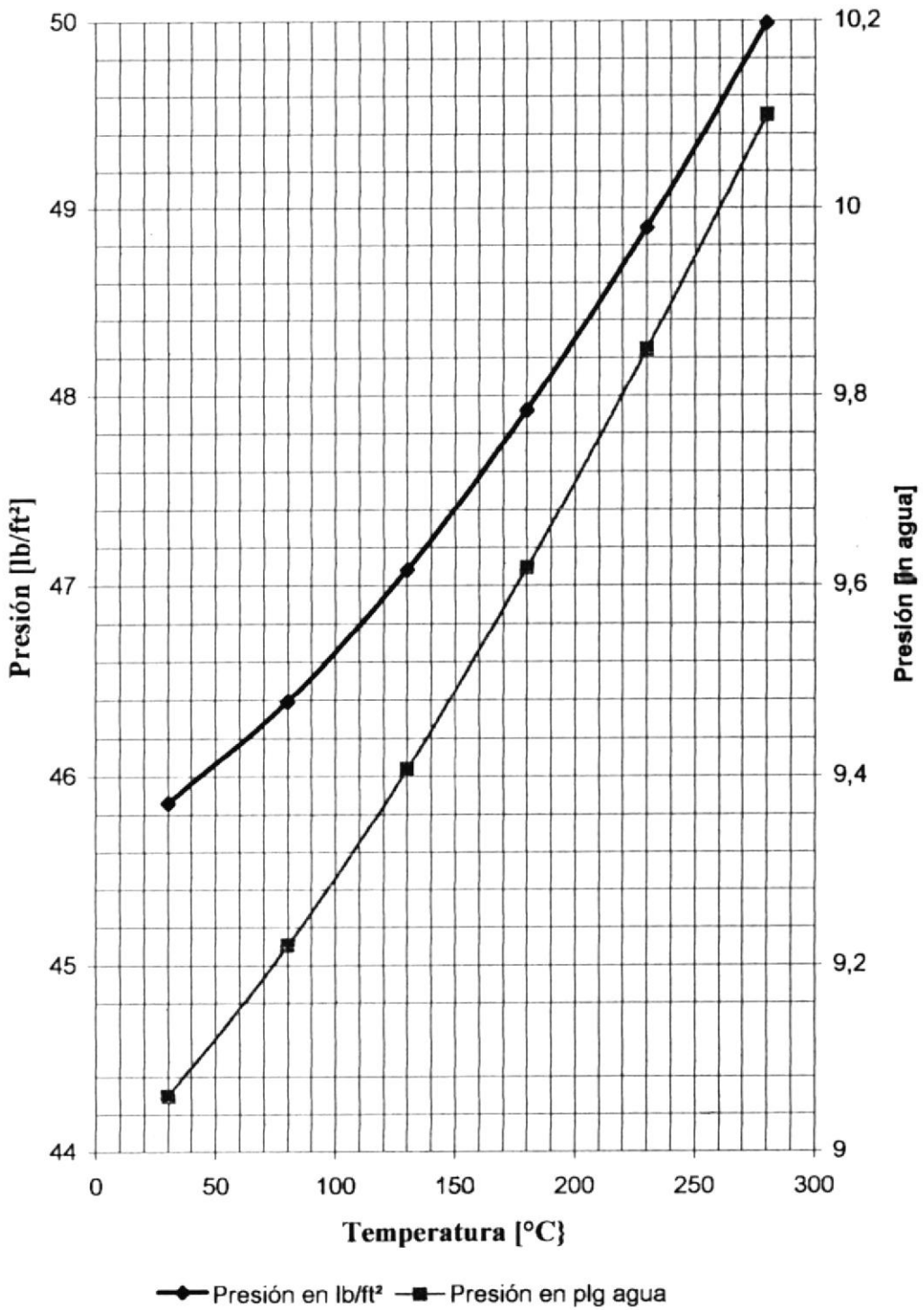


GRÁFICA A.13
MODELO PARA LA DISTRIBUCION DE CONCENTRACION DE
AGUA DENTRO DEL BANANO POR EFECTO DE LA
TRANSFERENCIA DE MASA POR CONVECCIÓN DEL BANANO AL
AIRE

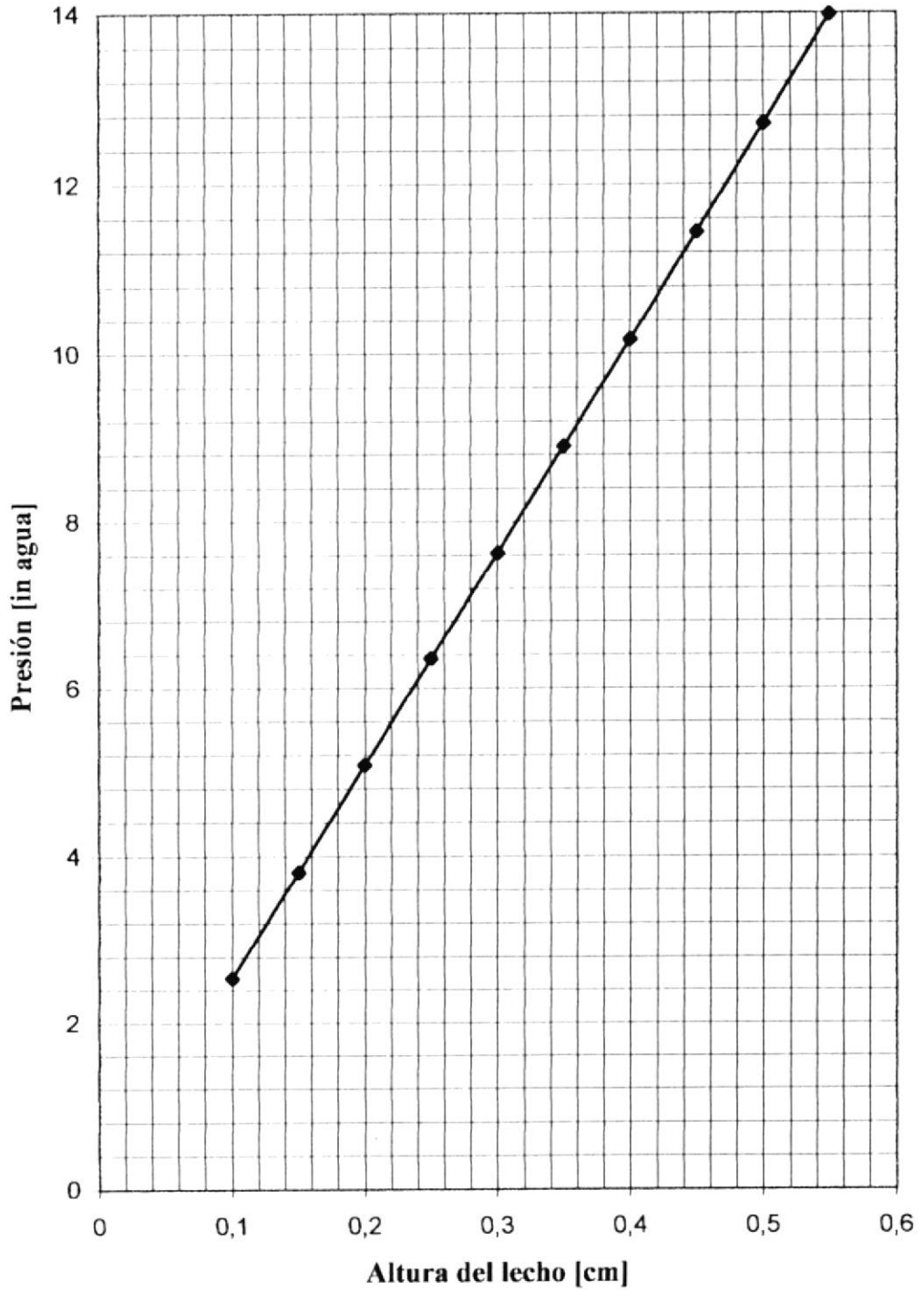
Perfil de Concentración de vapor de agua en el aire y Fracción de masa
acarreada por el aire como una función del tiempo.



GRÁFICA A.14
CAIDA DE PRESIÓN DENTRO DEL LECHO DE BANANO COMO
FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA DE SALIDA DEL AIRE



GRÁFICA A.15
CAIDA DE PRESIÓN DENTRO DEL LECHO COMO UNA FUNCIÓN
DE LA ALTURA DEL LECHO



APÉNDICE B



Roto-Louvre®

Dryer

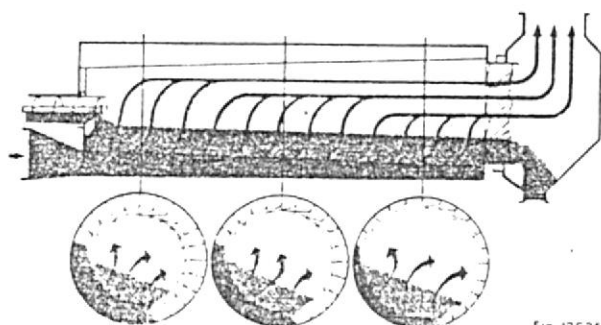


Fig J3635

or cooler

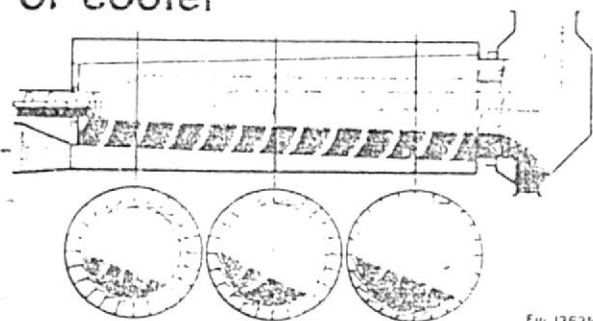


Fig J3635

or dryer/cooler

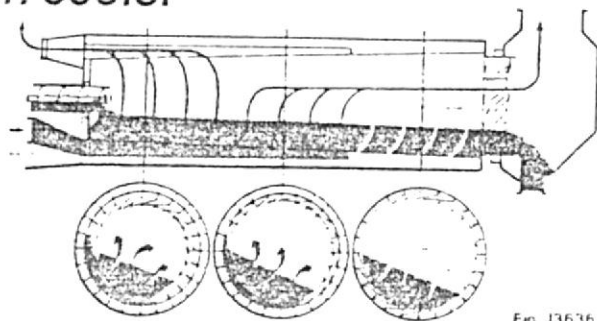


Fig J3636

The Roto-Louvre is a compact and versatile dryer/cooler featuring precise automatic thermal control. Its patented design features provide gentle, efficient treatment of the material and low maintenance.

The Roto-Louvre drum consists of a solid outer shell of uniform diameter and an inner shell that increases in diameter from input end to discharge end. The tapered inner shell is constructed of long overlapping plates that form full-length louvres. This inner shell supports the material bed and permits air to penetrate freely without loss of material.

Radial plates partition the space between the shells into long narrow channels open at the large end to admit air and closed at the narrow end.

As the entire drum slowly revolves, the material gently rolls over itself in a spiral path to the discharge end. This gentle action keeps degradation and abrasion to a minimum.

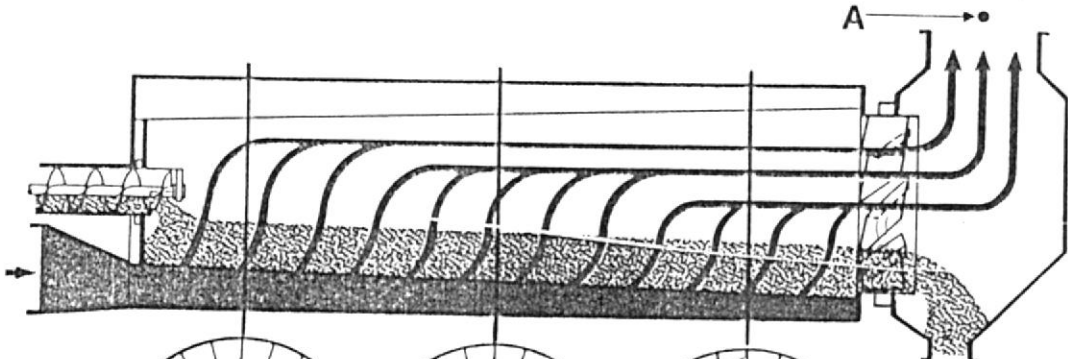
Heated air is introduced into the channels directly under the material bed. It passes upward through the constantly moving material, assuring uniform, intimate contact with the surface of the particles of material.

Efficient, positive heat transfer by convection — inherent in the Roto-Louvre process — helps to maintain uniformity of product and safety from damage by overheating. The tapered inner shell permits the material bed to be thinner at the input end, so that the greatest volume of heated air passes through the material where it contains the most moisture and is least susceptible to over-heating.

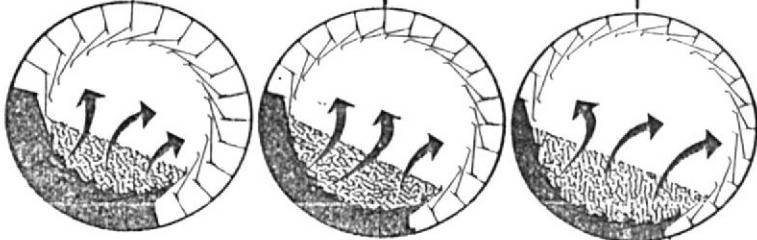
As a cooler, the Roto-Louvre utilizes either ambient air or conditioned air.

**Exclusive process,
available only in FMC Roto-Louvre®**

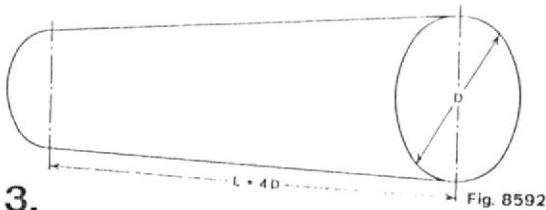
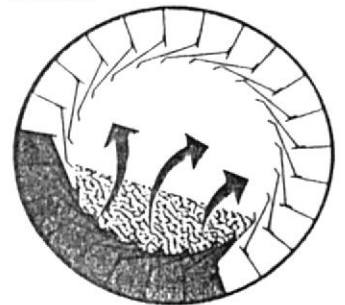
- with:
1. precise control
 2. gentle handling
 3. compact size
 4. highest efficiency



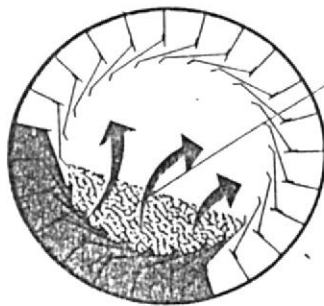
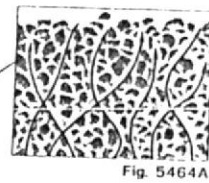
1. Greatest volume of air penetrates material bed where it is **thinnest**, decreasing as bed becomes thicker. Thermometer (A) senses temperature variations all along the bed, providing instant control response.
Fig. J3635



2. As the drum revolves, the material is carried around until the angle of repose is reached. Then it rolls gently back upon its own bed, assuring uniform exposure to the air flow.

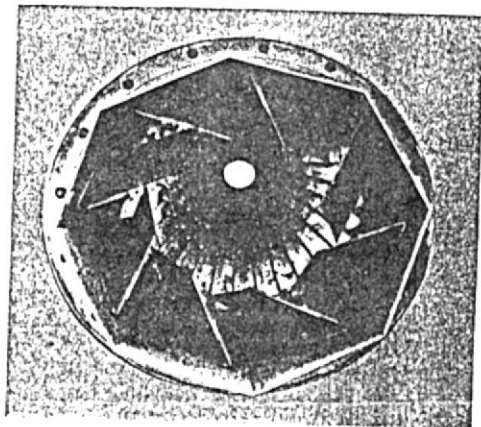


3. A Roto-Louvre requires less floor space than conventional dryers because the drum length is usually no more than four times its diameter.

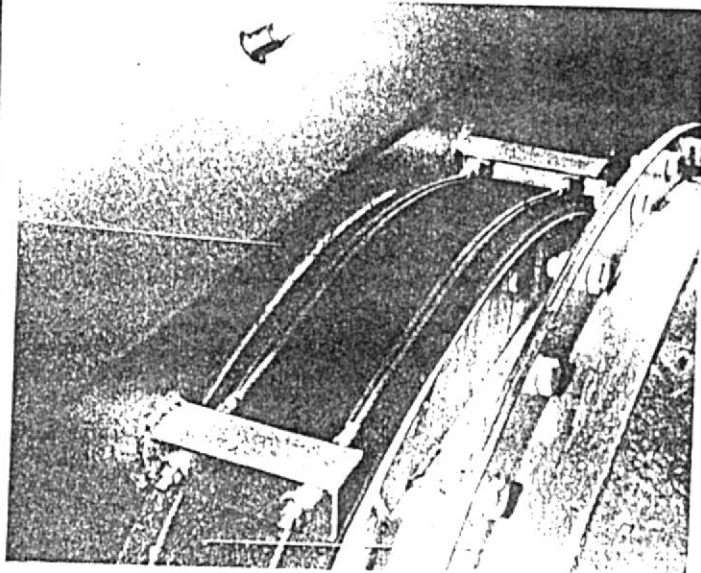
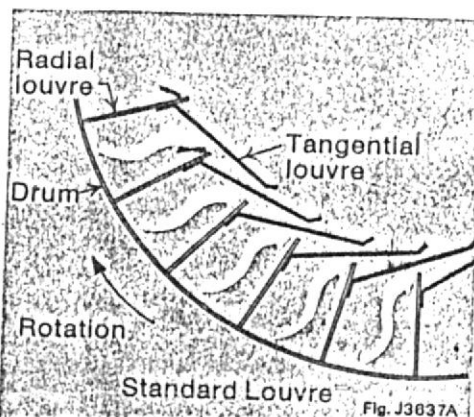


4. The revolving action of the material in the drum is designed to bring all surfaces of every particle into intimate contact with air penetrating the bed for rapid heat transfer and uniform drying or cooling of the material.

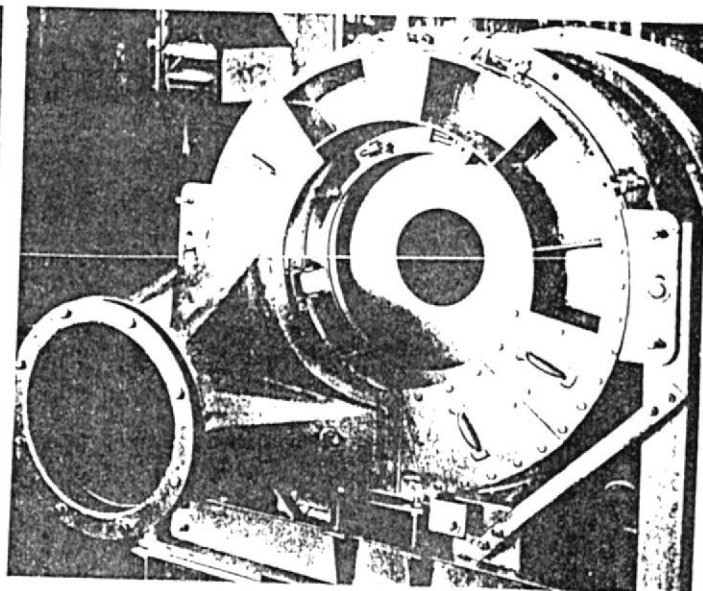
Discharge end of Roto-Louvre® drum shows tapering design of inner shell and over-lapping louvre construction. 47180



Enlarged section, showing standard louvre construction.



A simple, low maintenance, belt air seal between the rotating drum and the stationary discharge hood is secured by two wire ropes. 47179



Distributing ring assembly with damper covers on both sides of air inlet connector. They protect the air inlet cut-off dampers which direct air flow within the drum. 47168



Roto-Louvre[®] construction Components and Details

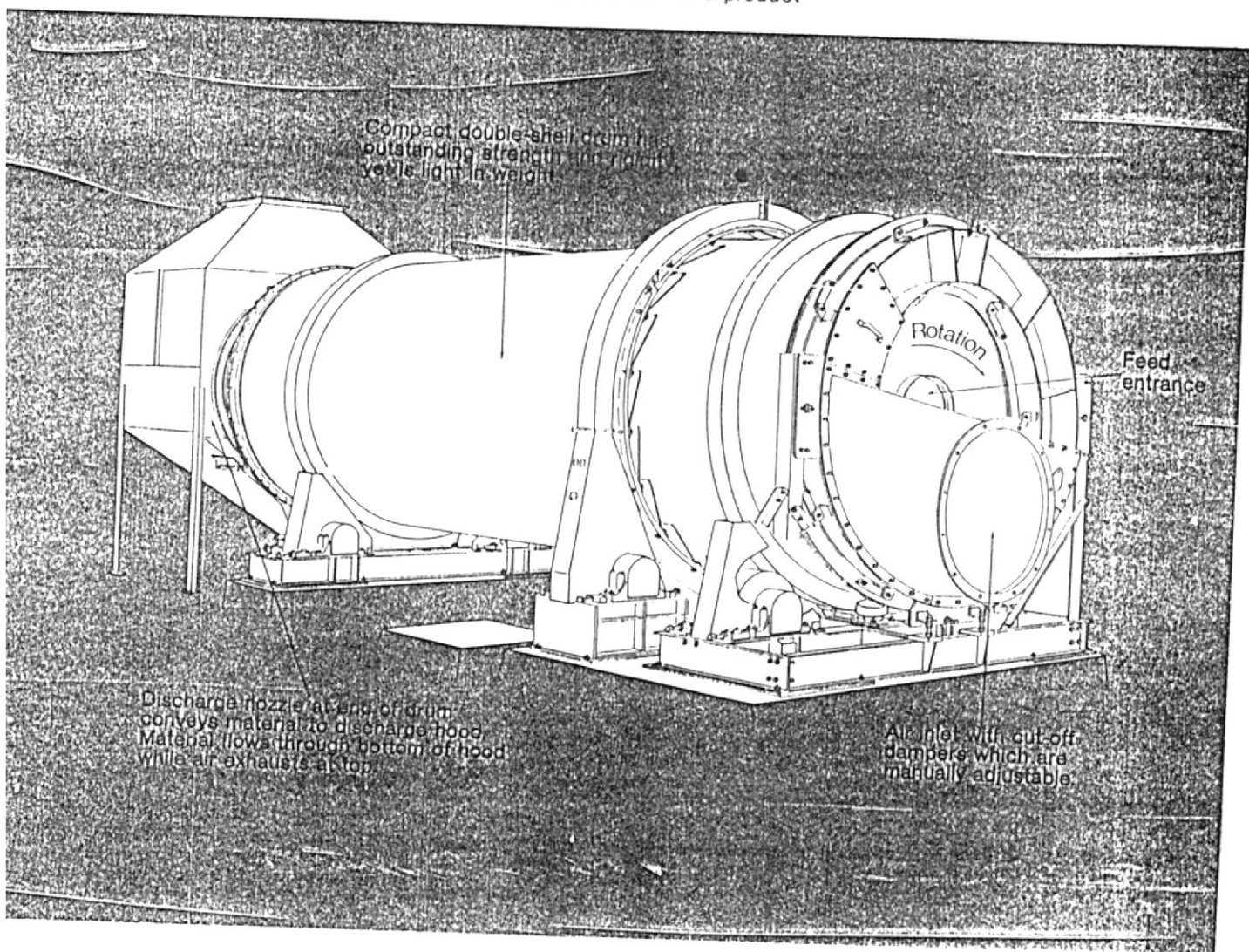
Compact design and double shell construction give the Roto-Louvre drum outstanding strength and rigidity. The short drum and intermediate supports reduce heavy construction requirements for installation and support. The drum revolves on one-piece, machined, forged steel tires, supported on hardened, forged steel trunnions.

The trunnions turn on spherical, roller bearing pillow blocks which mount on a structural steel base.

The drum and louvres may be constructed of special materials to meet specific product requirements—for example, stainless steel for sanitary requirements, aluminum for corrosion resistance and other materials such as Monel for a product

which would affect, or be affected by, ordinary steels.

The standard louvre design is shown on page 13, fig. J3637A. Certain special designs are also available for specific problems.



BIBLIOGRAFIA

1. TREYBAL ROBERT E., Operaciones con Transferencia de Masa, Editorial Hispano Americana S.A., Buenos Aires, 1970
2. INCROPERA FRANK P., DeWITT DAVID P., Fundamental of Heat and Mass Transfer, 3ra. Edición, Editorial John Wiley & Sons, Singapur, 1990
3. RHOSENOW WARREN E., CHOI HARRY, Heat, Mass and Momentum Transfer, Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1961
4. SONNTAG, RICHARD E., VAN WYLEN GORDON J., Introducción a la Termodinámica Clásica y Estadística, Editorial Limusa, México D.F., 1979
5. NAKAMURA SHOICHIRO, Métodos Numéricos Aplicados con Software, 1ra. Edición, Prentice Hall, México D.F., 1992
6. BRAVO PATRICIA, Estudio y Análisis de las Cmaras Tradicionales de Secado de Arroz en Cáscara, Tesis de Grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, 1990

