

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA

UNIDAD IZTAPALAPA

**ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN
SECADOR DE LECHO FLUIDIZADO CONTINUO
DE SEMILLAS DE AMARANTO OPERADO
CON UNA SOLA ETAPA.**

**TESIS QUE PRESENTA:
I.Q. LUIS ALBERTO VERDUZCO MORA**

**PARA OBTENER EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIAS (INGENIERÍA QUÍMICA)
ABRIL DEL 2009**

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA

UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA

UNIDAD IZTAPALAPA

**“ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN SECADOR DE LECHO
FLUIDIZADO CONTINUO DE SEMILLAS DE AMARANTO OPERADO CON
UNA SOLA ETAPA.”**

TESIS QUE PRESENTA:

I.Q. LUIS ALBERTO VERDUZCO MORA

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA

ASESORES

DR. MARIO G. VIZCARRA MENDOZA

M. en I. CARLOS MARTINEZ VERA

ABRIL 2009

A mis Padres:

J. Trinidad (Q.E.P.D.) y Graciela.

Porque gracias a su amor, esfuerzo, sacrificio, valentía y confianza, hicieron posible mi desarrollo académico y personal.

A mis hermanos:

Daniel, Carlos Alejandro y Emmanuel.

Por su compañía y amistad. Porque siempre confiaron en mi y porque su esfuerzo y dedicación han sido un ejemplo para mi.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por mi familia y amigos y porque en las mejores situaciones y en las más difíciles, siempre he sentido que está conmigo.

A mis familiares por su apoyo y confianza.

A los Amigos y compañeros que he conocido a lo largo de toda mi formación académica, por su compañía, comprensión y apoyo incondicional en las buenas y en las malas.

A “La Pandilla”, por su amistad y porque siempre he contado con ustedes. Por todos los excelentes momentos que hemos compartido y por los que aún están por venir.

A mis Profesores del Posgrado en Ingeniería Química de la UAM-IZTAPALAPA, por darme la formación académica que permitió el desarrollo de este proyecto de investigación.

A mis asesores Dr. Mario G. Vizcarra Mendoza y M. en I. Carlos Martínez Vera, por la dirección de esta tesis. Por su confianza y comprensión.

Al Dr. Jaime Vernon Carter, Dr. Richard Steve Ruiz Martínez, y Dr. César Pérez Alonso por el tiempo y dedicación que invirtieron en la revisión de esta tesis y por sus valiosos comentarios que ayudaron a mejorar este trabajo. Y por formar parte del jurado.

Al CONACyT, por el apoyo económico brindado durante la realización de este trabajo de investigación.

RESUMEN

Se realizó el estudio experimental del secado de semillas de amaranto, en un secador de lecho fluidizado operado en forma continua con una sola etapa.

Tal como se esperaba, la cinética de secado corresponde a un proceso controlado por mecanismos internos (difusión) y fue ajustada a un modelo de decaimiento exponencial, a las diferentes temperaturas de alimentación del aire. En el caso del estudio de la DTR, utilizando como trazador las mismas semillas de amaranto coloreadas, y como técnica de estímulo – respuesta, la inyección de pulsos de estas semillas al secador, se logró representar el comportamiento del lecho fluidizado con un modelo de N tanques agitados en serie, dando como resultado, para L/D de 1 y 2, la ecuación correspondiente a 1 y 2 tanques agitados respectivamente.

A partir de la cinética de secado por lotes obtenida en condiciones de experimentación adiabáticas, se obtuvieron curvas de secado a condiciones isotérmicas, con éstas y el análisis de la DTR, se pudo predecir el contenido promedio de humedad a la salida del secador, encontrando desviaciones entre los datos calculados y los experimentales, no mayores al 15%, que contrastado con lo establecido en la literatura, no parece ser exagerado.

INDICE

RESUMEN

1. INTRODUCCIÓN

1.1 El Amaranto	5
1.2 Secado de sólidos	6
1.3 Periodos de secado.	6
1.4 Mecanismos de secado en el periodo de velocidad decreciente.	9
1.5. Operaciones de secado.	12
1.6 La tecnología de los lechos fluidizados	12
1.6.1. Diámetro de partícula	14
1.6.2. Densidad de la partícula	15
1.6.3. Velocidad mínima de fluidización	15
1.6.4. Clasificación de partículas.	15
1.6.5. Regímenes de fluidización.	16
1.7 Distribución de tiempos de residencia en un secador de lecho fluidizado	17
1.8 Balance de población en el secador continuo.	19
1.9 Modelo para el cálculo teórico de la humedad de salida de un secador continuo.	25
1.10 Modelo de tanques agitados en serie.	27

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA 30

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO 34

4. OBJETIVOS

4.1. Objetivo General	35
4.2 Objetivos Particulares	35

5. MATERIAL Y EQUIPO.

5.1 Material (Semillas de Amaranto)	36
5.2 Equipo Experimental.	36

6. DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS.

6.1 Diámetro de Partícula	38
6.2 Fracción de espacios vacíos	38
6.3 Esfericidad	38
6.4 Densidad Empacada	38
6.5 Densidad Aparente	38

7. DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES HIDRODINÁMICAS

7.1 Velocidad mínima de fluidización	39
7.2 Fracción de espacios vacíos a mínima de fluidización.	39

8. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

8.1. Preparación de los granos de amaranto.	40
8.2. Determinación de Distribución de Tiempos de Residencia (DTR)	41
8.3. Determinación cinética de secado en la operación por lotes.	41
8.4. Determinación cinética de secado en la operación continua.	41
8.5. Determinación de humedad en los granos de amaranto.	42

9. DISEÑO EXPERIMENTAL.

9.1. El diseño factorial 2^k	43
9.2. Diseño factorial 2^2 con repeticiones en un punto central.	44

10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

10.1 Propiedades físicas e Hidrodinámicas del amaranto.	46
10.2. Funciones de Distribución de Tiempos de Residencia.	46
10.3 Cinéticas de Secado en la operación por lotes.	51
10.4 Operación del secador en forma continua.	53

10.5 Resumen de resultados en la operación continua.	57
10.6 Comparación entre humedad promedio teórica con humedad experimental a la salida del secador continuo.	60
10.7 Análisis del Diseño factorial.	63
11. CONCLUSIONES.	66
NOMENCLATURA	68
BIBLIOGRAFÍA	71
APENDICE A	74
APENDICE B	76
APENDICE C	79
APENDICE D	81
APENDICE E	92

1. INTRODUCCIÓN

1.1 El amaranto

El amaranto es una planta que pertenece a la familia de las *amarantaceas*; según evidencias arqueológicas se cree que es originaria del estado de Puebla en México. Se ha cultivado desde Arizona y Nuevo México en Estados Unidos, hasta Perú y Bolivia. Su nombre significa vida eterna debido a que crece en tierra poco fértil y con una mínima cantidad de agua; también porque una sola planta puede producir cerca de un millón de semillas. (www.amaranto.org.mx)



Reino: Plantae
Subreino: Embriofitas
División: Magnoleophyta
Clase: Magnoleopsida
Subclase: Caryophyllidae
Orden: Caryophyllales
Familia: Amaranthaceae
Género: Amaranthus
Especies: *hypochondriacus*, *caudatus*, *cruentus*,
edulis, *tricolor*, *paniculatus*, *sanguineus*, *blitoides*,
hybridus, *leucocarpus*, *gangeticus*.

Figura 1.1 Planta de Amaranto

El amaranto tiene un alto valor nutritivo debido a la calidad y cantidad de sus proteínas (17%), cuenta con el doble de proteínas que el maíz y el arroz y de un 60 a 80 por ciento más que el trigo, es rico en fibra dietética, calcio, hierro, vitamina C y complejo B (Tosi y Re, 1999)

En cuanto se refiere a la industrialización del amaranto como actividad competitiva, el desarrollo ha sido muy lento. El proceso de transformación del grano se ha realizado en su mayoría artesanalmente, lo cual ha significado crear ciertos nichos de mercado como el naturista, alimentación alternativa (alegrías, harinas, tortillas, verduras etc.)

1.2 Secado de sólidos.

El secado artificial produce la principal transformación del grano en la poscosecha y a su vez es el procedimiento que más atención requiere para no afectar la calidad del mismo. De la energía utilizada en el proceso de producción de granos, el secado insume alrededor del 50%. Tomando en cuenta estos dos factores, es decir calidad y consumo energético, se puede apreciar la importancia que adquiere la realización correcta del mismo.

El objetivo principal del secado es reducir la humedad de cosecha de los granos y semillas a niveles seguros para el almacenamiento y óptimos para su comercialización. (Rodríguez, 2005)

El secado de sólidos es un proceso simultáneo de transferencia de masa y energía, en el cual se emplea calor para evaporar la humedad, que a su vez se remueve de la superficie del sólido, por medio de un agente externo (aire). (Treybal, 1988)

1.3 Periodos de secado.

A partir de experimentos de secado de sólidos, se obtienen datos que asocian el contenido de humedad en base seca en función del tiempo y a partir de estos datos se puede calcular la velocidad de secado. La forma típica de estas funciones se ejemplifica en la figura 1.2

La sección AB se conoce como periodo inicial y representa un lapso de calentamiento del sólido que se está secando.

La sección BC se caracteriza porque el movimiento de humedad dentro del sólido es lo suficientemente rápido como para mantener saturada la superficie del mismo y la velocidad de secado es controlada por la velocidad de transferencia de calor a la superficie de evaporación. Este periodo se conoce como de velocidad constante, ya que todos los parámetros que inciden en el proceso se mantienen constantes.

La sección CD representa el periodo de velocidad decreciente, se caracteriza porque la resistencia interna al transporte de humedad es mayor dentro del material que en la superficie de éste y existe una disminución continua de la velocidad de secado a lo largo de lo que resta el ciclo de secado.

El Punto C, representa el contenido de humedad crítico, que es donde concluye el periodo de velocidad constante y comienza la velocidad de secado decreciente. Éste depende de la naturaleza del sólido que se esta secando.

El punto D, representa el contenido de humedad de equilibrio, que es la humedad límite a la cual un material dado se puede secar en condiciones específicas de temperatura, humedad y flujo de gas.

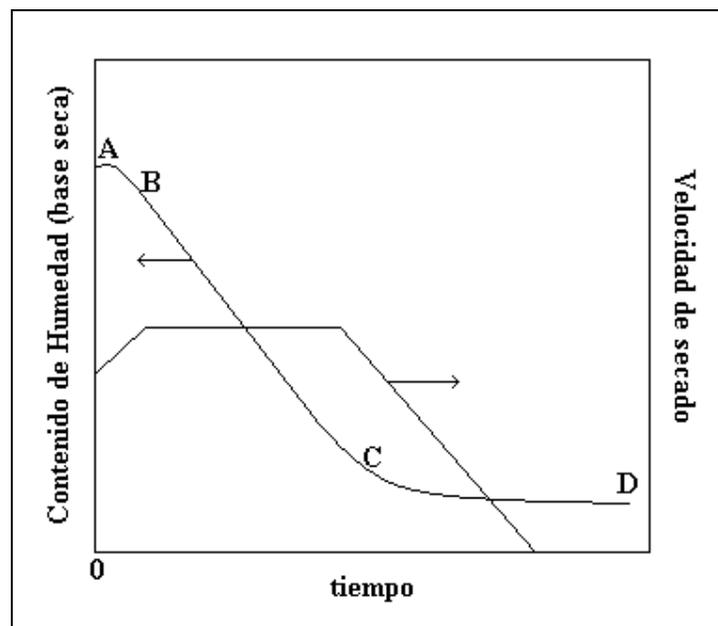


Figura 1.2.- Contenido de humedad y velocidad de secado en función del tiempo.

Una manera de aproximar su tratamiento matemático para el establecimiento de los balances de masa y energía, es el proponer que la velocidad de evaporación se lleva a cabo por el mismo mecanismo que el existente en un termómetro de bulbo húmedo (T_w), tal que el flujo de calor hacia el sólido se define como:

$$q = h(T_s - T_w)A \quad (1.1)$$

Y el flux másico de vapor de agua de la superficie del sólido hacia la corriente de aire es:

$$n_v = k_y \frac{M_A}{M_B} (Y_w - Y_s) \quad (1.2)$$

Suponiendo que sólo prevalece el mecanismo de evaporación, el flujo de calor será igual a:

$$q = n_v \lambda_w A \quad (1.3)$$

Pueden igualarse (1.1) y (1.3) para obtener una expresión general, que permita el cálculo del flujo de agua durante el proceso de secado:

$$n_v = \frac{h(T_s - T_w)}{\lambda_w} = k_y \frac{M_A}{M_B} (Y_w - Y_s) = R_c \quad (1.4)$$

La ecuación (1.4) indica que en una operación de secado con periodo de velocidad de secado constante, la velocidad de transferencia de masa equivale a la velocidad de transferencia de calor. En la figura 1.2 es posible observar que la curva de humedad se comporta linealmente con respecto al tiempo hasta alcanzar la no-linealidad en el proceso, este punto de transición se denomina humedad crítica y depende de la forma, tamaño y naturaleza del sólido, así como de sus condiciones de operación. (Mc Cabe, 1998).

En general los cereales no presentan periodos de velocidad de secado constante a menos que sean cosechados sin estar maduros, o que hayan atrapado agua por condensación ó de lluvias. Siendo entonces el periodo de secado decreciente el más significativo. (Tosi y Re, 1999)

Durante el periodo de secado a velocidad decreciente la superficie mojada disminuye gradualmente, asimismo disminuye la velocidad de secado, pues se pierden las condiciones de saturación en la superficie de secado. Este periodo está más controlado por los mecanismos de movimiento de humedad desde el interior del sólido a la superficie que por la influencia de factores externos. (Treybal, 1988)

1.4 Mecanismos de secado decreciente.

Muchos mecanismos se han propuesto para describir la transferencia de humedad en productos porosos capilares como lo son los cereales

1. Movimiento de líquido debido a fuerzas superficiales (**Capilaridad**). En este mecanismo interviene la tensión superficial en sólidos que contienen poros y canales interconectados de diversos tamaños; los materiales alimenticios granulares y húmedos se deforman fácilmente, el agua mantiene el cuerpo hinchado aunque su interior se encuentra bajo compresión debido a las fuerzas superficiales, a medida que el agua se elimina de la superficie, las fuerzas que actúan afectan a los componentes débiles del sólido y lo deforman, a tal grado que ocupan menos volumen existiendo encogimiento, el agua se mueve a velocidades que dependen de las fuerzas que se oponen al movimiento como lo es la viscosidad y el radio efectivo de los poros, el agua se va eliminando de los poros e intersticios y los meniscos formados aumentan su concavidad por lo que debe aumentarse la succión. Es obvio que los poros pequeños generan fuerzas mayores que los poros grandes; esto explica la disminución en la velocidad de secado.

2. Contracción del sólido al disminuir la humedad (**Encogimiento**). Materiales fibrosos como los vegetales y productos alimenticios, presentan tensión en sus paredes celulares al aumentar su contenido líquido, las paredes son elásticas y volverán a su estado original si no se exceden sus límites permisibles, en caso contrario el material perderá sus dimensiones. Si los tejidos del material mueren (temperaturas elevadas) las paredes aumentan su permeabilidad, y la deformación aumenta debido a daños como rupturas en los tejidos, los productos en ocasiones formarán una capa dura en la superficie que

impide el flujo de líquido ó vapor, disminuyendo la velocidad del proceso. Esto trae como consecuencia una disminución en la calidad del producto.

3. Transferencia difusional del agua (**Difusión**). En general las etapas tempranas del secado se gobiernan por fenómenos de capilaridad; posteriormente el fenómeno de difusión controla el proceso y se lleva en el interior de los capilares, poros y pequeños espacios ocupados por vapor, el cual se difunde hacia el exterior hasta que los capilares se vacían, el vapor se aleja por el movimiento de una corriente de aire. Krischeri (1938) señala la presencia de aire estancado dentro de los poros, el agua al evaporarse se mueve desde el interior de los poros; desde las regiones de alta presión de vapor hacia las de baja. La siguiente ecuación describe el flux del vapor de agua:

$$n_v = -\frac{D_m}{\varphi} \frac{1}{R_v T} \frac{P}{P - p_v} \frac{dp_v}{dl} \quad (1.5)$$

φ es el factor de resistencia a la difusión y depende de la estructura geométrica del interior del sólido; si se trata de un material higroscópico también dependerá fuertemente del contenido de humedad.

Para el caso de sólidos de naturaleza coloidal porosa, se propone el mecanismo de difusión líquida por gradientes de concentración como mecanismo controlante en el movimiento de humedad a la superficie y por lo tanto, de la velocidad de secado en el periodo decreciente.

Partiendo de la Segunda ley de Fick:

$$\frac{\partial(\rho_s M)}{\partial t} = \nabla(D_m \rho_s \nabla M) \quad (1.6)$$

El coeficiente de difusión de humedad puede considerarse una función exponencial de la temperatura del tipo ley de Arrhenius.

$$D_m = D_0 * \text{EXP} \left[-\frac{E_0}{RT} \right] \quad (1.7)$$

Si se considera al coeficiente de difusión como constante a una temperatura T fija, sin cambios de volumen en el sólido se obtiene:

$$\frac{\partial(\mathbf{M})}{\partial \mathbf{t}} = D_m \nabla^2 \mathbf{M} \quad (1.8)$$

La solución de esta ecuación dependerá de la geometría del sólido y de las condiciones de frontera que prevalezcan en la interfase sólida. Para una geometría esférica como la del amaranto:

$$\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial \mathbf{t}} = D_m \left[\left(\frac{\partial^2 \mathbf{M}}{\partial r^2} \right) + \left(\frac{2}{r} \right) \left(\frac{\partial \mathbf{M}}{\partial r} \right) \right] \quad (1.9)$$

Con condición inicial

$$\mathbf{t} = \mathbf{0}, \quad \mathbf{0} \leq r \leq R_p, \quad \mathbf{M} = \mathbf{M}_0 \quad (1.10)$$

$$\mathbf{t} \neq \mathbf{0}; \quad r = \mathbf{0}, \quad \mathbf{M} \rightarrow \text{finita}, \quad \frac{d\mathbf{M}}{dr} = \mathbf{0} \quad (1.11)$$

Y en la frontera (considerando la operación de fluidización):

$$\mathbf{t} \neq \mathbf{0}; \quad r = R_p, \quad \mathbf{M} = \mathbf{M}_{eq} \quad (1.12)$$

Como la humedad es función de la posición, se define un contenido de humedad promedio en el sólido:

$$\mathbf{M}(\mathbf{t}) = \frac{4\pi}{V_s} \int_0^{R_p} r^2 M(r, t) dr \quad (1.13)$$

Resolviendo (1.9) con las condiciones (1.10) y (1.12) y posteriormente la ecuación (1.13) para encontrar el perfil de humedad en la partícula, finalmente se obtiene la solución analítica:

$$\frac{M(t) - M_{eq}}{M_0 - M_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \text{EXP} \left[\frac{n^2 \pi^2 D_m t}{R_p^2} \right] \quad (1.14)$$

Esta solución corresponde al caso en el que las resistencias externas a la transferencia de masa no son importantes, mismas que se cumplen en un lecho fluidizado, función del estado hidrodinámico que prevalece en el lecho (Crank,1978)

1.5 Operaciones de secado.

Las operaciones de secado pueden clasificarse por lotes ó continuas. La primera es un proceso donde cierta cantidad de material húmedo se expone a una corriente de gas que fluye continuamente, en el que se evapora humedad. Esta operación es cara y se limita a operaciones a pequeña escala (plantas piloto), trabajos de investigación (laboratorio) y para secar materiales valiosos. En la segunda, el material que se va a secar se alimenta en forma continua a través del secador al igual que lo hace el gas. (Treybal,1988)

Como ya se indicó anteriormente, el secado mediante lechos fluidizados puede llevarse a cabo, en forma intermitente o continua, dependiendo de la escala de operación (Reay y Baker, 1985),

1.6 La tecnología de los lechos fluidizados.

Los sistemas que involucran el manejo de sólidos y gases se pueden clasificar por el movimiento que presentan los sólidos. A bajas velocidades de gas, el fluido se filtra por los huecos de las partículas sin movimiento alguno y la caída de presión en el lecho es directamente proporcional a la velocidad superficial del fluido, el sólido se encuentra estático (lecho fijo). Si la velocidad aumenta, las partículas se alejan entre sí alcanzando

las condiciones de fluidización, aquí, la caída de presión en el lecho se mantiene prácticamente constante en todo el rango de velocidad superficial y a mayores velocidades del aire, los sólidos pueden llegar a ser arrastrados por el fluido siendo la caída de presión inversamente proporcional a la velocidad superficial, situación que corresponde al transporte neumático. En la figura 1.3 se representa el comportamiento hidrodinámico de un sistema aire-sólido. (Kunni y Levenpiel, 1991)

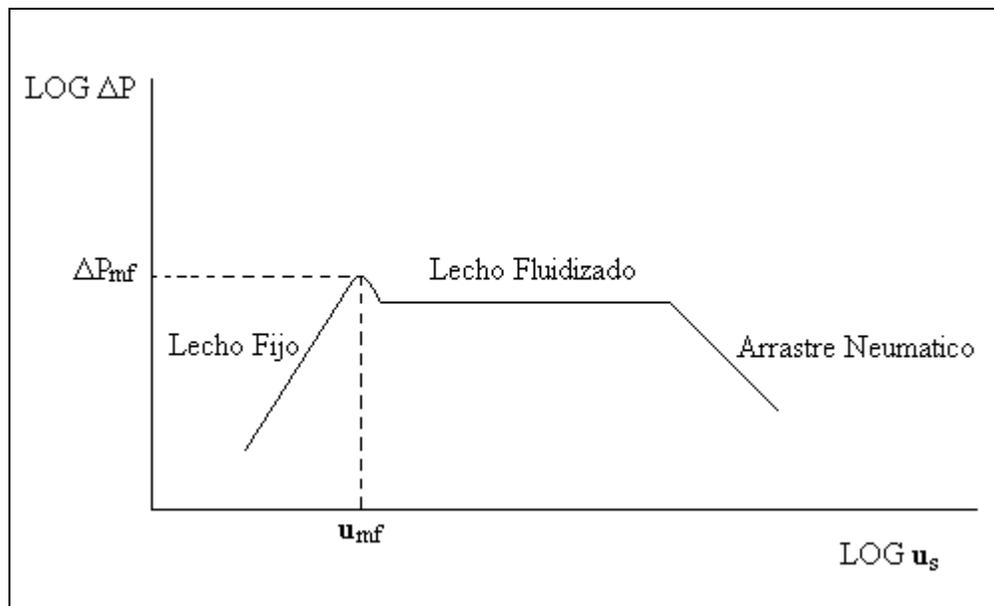


Figura 1.3. Comportamiento hidrodinámico de un sistema aire-sólido (Kunni y Levespiel, 1991)

En el universo de las tecnologías relacionadas con el secado; el lecho fluidizado aplicado para este fin ofrece las siguientes ventajas:

- Altas velocidades de transferencia de masa y calor entre las partículas y el gas, provocada por el mezclado intensivo debido a la presencia de burbujas de gas.
- Control adecuado de temperaturas evitando posibles degradaciones térmicas en sólidos biológicos y alimenticios. (Zahed y col. 1995)

Entre las desventajas a tomar en cuenta se mencionan:

- Un aumento en el tamaño del secador, conlleva un aumento de potencia en el compresor, por las altas caídas de presión que se presentan en el equipo, como un aumento en los requerimientos de flujo de aire, incidiendo en las dimensiones del ventilador.

- Los sólidos a secar en estos equipos deben ser resistentes para no sufrir desgaste o roturas, si este factor no es de importancia para la selección, debe tenerse en mente la necesidad de recuperaciones periódicas de finos. (Kunni y Levenspiel, 1991)

1.6.1 Diámetro de la partícula.

Estrictamente hablando, la mayoría de las partículas son irregulares por lo que se define un diámetro equivalente de la siguiente forma (Kunni y Levenspiel, 1991):

d_s = diámetro de una esfera obtenido del volumen de la partícula irregular.

El concepto anterior permite determinar un diámetro efectivo definido como:

$$d_e = \phi_s d_s \quad (1.15)$$

Para fines prácticos este valor representa el tamaño de las partículas en el lecho, ϕ_s es el valor de la esfericidad, definido como:

$$\phi_s = \left(\frac{\text{superficie de la esfera}}{\text{superficie de la partícula}} \right)_{\text{al mismo volumen}} \quad (1.16)$$

Donde $\phi_s = 1$ para las esferas y $0 < \phi_s < 1$; para las demás geometrías.

1.6.2 Densidad de la partícula.

Estrictamente se conocen tres tipos de densidades: la densidad empacada ó densidad formada por el sólido y su fracción de espacios vacíos tomadas como un todo; la densidad aparente ó la densidad del sólido aislada del aire que puede interferir en su determinación, la cual se obtiene a partir de métodos volumétricos y gravimétricos, cuya aplicación en el campo de la fluidización es necesaria. Finalmente la densidad real que se obtiene a partir del volumen de la masa sólida, eliminando espacios intra e interpartículas que interfieren en el cálculo.

1.6.3 Velocidad mínima de fluidización.

Para un lecho con partículas descansando sobre la placa distribuidora, la fluidización inicia cuando las fuerzas de arrastre del aire igualan al peso de las partículas (Ergun, 1952); de tal forma que la fracción de espacios vacíos mínima de fluidización es mayor a la fracción vacía del lecho fijo y puede estimarse si se determina adecuadamente el incremento en el volumen provocado por el aumento del flujo de aire. Si esto sucede la velocidad mínima de fluidización puede obtenerse de acuerdo a lo siguiente:

$$\frac{1.75}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s} \frac{(d_p \rho_g u_{mf})^2}{\mu} + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf})}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2} \left(\frac{d_p u_{mf} \rho_g}{\mu} \right) = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (1.17)$$

El término de la derecha de la ecuación (1.17), se conoce como el número de Arquímedes.

1.6.4 Clasificación de las partículas

Es de importancia mencionar que el comportamiento de la fluidización depende del tipo de partículas y Geldart (1973), las clasificó en términos de la diferencia de densidades (partícula-gas) y el diámetro promedio de las partículas; formando cuatro grupos: **A** ($30 < d_p < 100 \mu m$ y fuerzas interpartículas importantes), **B** ($40 < d_p < 500 \mu m$;

$1400 < \rho_B < 4000 \text{ kg/m}^3$, de fácil fluidización), **C** (partículas más finas que **A** con fuerzas interpartículas muy grandes en comparación con la velocidad del gas) y **D** (partículas gruesas $d_p > 1 \text{ mm}$. que no permiten la expansión del lecho, muchos granos se clasifican en éste tipo). El amaranto se clasifica como un sólido de fácil fluidización, es decir, un sólido de tipo **B**.

1.6.5 Regímenes de fluidización

*Régimen corpuscular.- Se presenta en partículas tipo **A**, el gas pasa por los huecos sin formar burbujas, el lecho se observa como una fase, las condiciones de velocidad del gas son estrechas, expandiendo un poco el rango cuando se opera a presiones altas ó densidades altas del gas.

*Régimen burbujeante.- Se presenta en partículas del tipo **B** y **D**; las burbujas de aire aparecen tan pronto como se alcanza la velocidad mínima de fluidización y agitan vigorosamente los sólidos. Aunque la existencia de coalescencia es ineludible al aumentar la velocidad formando dos fases llamadas fase burbuja y fase densa ésta última contiene la mayoría de las partículas.

*Régimen turbulento.- Al aumentar la velocidad se abandona el régimen burbujeante a tal grado que las dos fases constituyentes no llegan a distinguirse, debido a la explosión de las burbujas, y en este caso la altura del lecho es difusa.

*Taponamiento (Cortocircuito).- Este régimen se caracteriza por la presencia de burbujas del tamaño del lecho y forma tapones de aire, estos se presentan en diámetros pequeños o en relaciones $L/D \gg 1$. Estos tapones se rompen en la superficie del lecho. Si hay un aumento en la velocidad del gas se cambia al régimen de lecho rápido.

*Régimen en Erupción.- Este régimen surge cuando el gas se inyecta verticalmente en una abertura pequeña en el fondo del lecho, las partículas son arrastradas por el chorro de

gas hasta la superficie y regresan al lecho, pegadas a las paredes del mismo, esto provoca un mezclado más regular y cíclico que el lecho burbujeante.

* Formación de canales.- El régimen se forma en partículas del tipo C donde los sólidos forman agregados por las fuerzas cohesivas presentes, de tal manera que el gas no puede fluidizar al sólido y sólo forma ductos ó agujeros por donde éste pasa y abandona el lecho. (Kunni y Levenspiel, 1991)

1.7 Distribución de tiempos de residencia (DTR) en un secador de lecho fluidizado continuo.

El tiempo que los sólidos permanecen dentro de un secador influye directamente en la calidad del producto, con tiempos muy cortos, el nivel de secado es insuficiente, mientras que tiempos excesivos producirían daños en el producto que se está secando. Por otro lado, el tiempo de residencia en el secador está influenciado por el tipo de secador empleado y sus condiciones de operación así como por las características del material que se está secando (tamaño de la partícula, densidad, porosidad, contenido de humedad). (Reyes y Castro, 2004)

Cuando un secador opera en condiciones de estado estacionario, el tiempo de residencia individual de las partículas difiere, por esto es común informar sobre una distribución de tiempos de residencia (DTR) o de un tiempo de residencia promedio de las partículas en el lecho.

El conocimiento de la distribución de tiempos de residencia es necesario para resolver las ecuaciones de transferencia de masa y energía y así describir completamente la temperatura y el contenido de humedad en el secador, a la vez que nos permite conocer el patrón de flujo que prevalece en el lecho. (Renauld y col. 2001).

La determinación experimental de una DTR es llevada a cabo mediante un método experimental estímulo - respuesta, en el cual, un pulso de sólidos marcados con algún

trazador apropiado, es alimentado al secador y la concentración del mismo (C_i) es determinada a la salida del secador para cada intervalo de tiempo (Δt_i).

A partir de los valores discretos, la DTR, (E_θ) se determina mediante la siguiente ecuación (Levenspiel, 2002):

$$E_\theta = \frac{C_i}{\Sigma(C_i \cdot \Delta t_i)} \tau \quad (1.18)$$

Donde τ es el tiempo de residencia promedio y es calculado mediante la ecuación 1.19:

$$\tau = \frac{\Sigma(C_i \cdot t_i \cdot \Delta t_i)}{\Sigma(C_i \cdot \Delta t_i)} \quad (1.19)$$

Graficando los valores de E_θ contra el tiempo adimensional ($\theta = t/\tau$), se obtiene la curva de DTR. En la figura 1.4 se presentan algunas funciones típicas para diferentes grados de mezclado en el lecho.

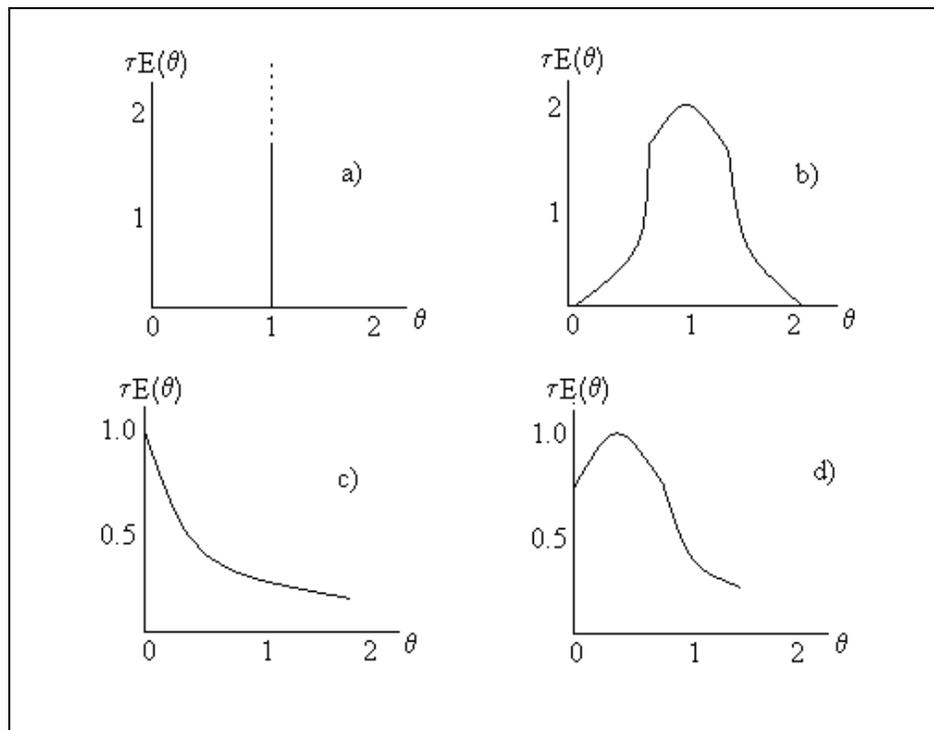


Figura 1.4. Funciones respuesta para un sistema continuo, Inyección tipo pulso.
a) Flujo pistón, b) Flujo arbitrario con cierto grado de mezclado, c) Flujo en mezclado perfecto, d) Mezclado con cierto grado de retención.

Teóricamente, la función de distribución de tiempos de residencia tanto para 1 etapa como para i etapas en serie puede obtenerse a partir de un balance de población.

1.8 Balance de población en el secador continuo.

Para establecer este balance, es necesario hacer las siguientes suposiciones:

- 1.- El sistema opera en estado estacionario
- 2.- Los sólidos son de tamaño uniforme
- 3.- Los sólidos se encuentran perfectamente mezclados
- 4.- Todas las etapas son geoméricamente idénticas y fluidizan en las mismas condiciones.

Además de las siguientes definiciones:

- Número de partículas introducidas en el secador por unidad de tiempo.

$$\eta = \frac{Q_s}{V_s \rho_s} = \frac{6Q_s}{\pi \rho_s d_s^3} \quad (1.20)$$

- Tiempo de residencia promedio de una partícula sólida en la etapa i es:

$$\bar{\tau}_i = \frac{W_i}{Q_s} \quad (1.21)$$

De la hipótesis 4, se deduce que:

$$\bar{\tau} = \sum \bar{\tau}_i \quad (1.22)$$

- Sea $dN_i(\tau)$, el número de partículas / unidad de masa del lecho que han permanecido en la etapa i entre τ y $\tau + d\tau$

- $n_i(\tau)$ es la densidad de población de partículas que han permanecido un tiempo τ en la etapa i.

La relación entre estas dos últimas definiciones es:

$$n_i(\tau) = \frac{dN_i(\tau)}{d(\tau)} \quad (1.23)$$

Balance de población para una etapa.

Se consideran las partículas que han permanecido un tiempo comprendido entre el intervalo τ y $\tau + d\tau$. De acuerdo con la primera hipótesis, se considera constante el número de partículas. En el balance poblacional se considera que el número neto de partículas del lecho que penetran al dominio $[\tau$ y $\tau + d\tau]$ entre los instantes de tiempo t y $t + dt$ es igual al número total de partículas que salen del dominio entre estos dos instantes.

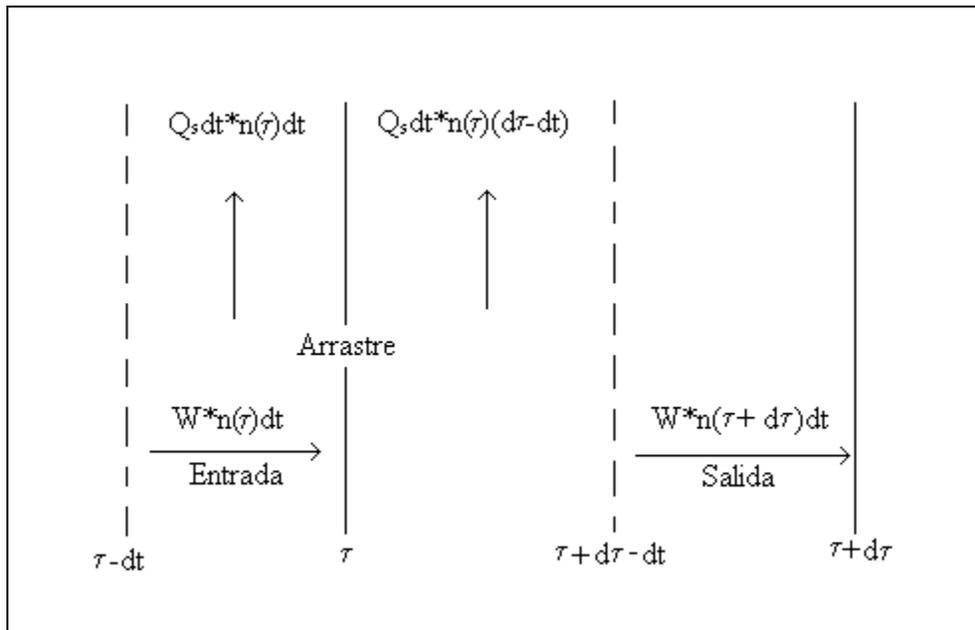


Figura 1.5. Dominio sobre el que se realiza el balance de población

A partir del balance:

$$W * n(\tau)dt - Q_s dt * n(\tau)dt = Q_s dt * n(\tau)(d\tau - dt) + W * n(\tau + d\tau)dt \quad (1.24)$$

$$W * n(\tau)dt - Q_s dt * n(\tau)dt = Q_s dt * n(\tau)(d\tau) - Q_s dt * n(\tau)dt + W * n(\tau + d\tau)dt \quad (1.24^a)$$

$$W * n(\tau + d\tau)dt - W * n(\tau)dt = -Q_s dt * n(\tau)d\tau \quad (1.24^b)$$

Dividiendo entre $Q_s dt$ y factorizando se obtiene:

$$\frac{W}{Q_s} \left[\frac{n(\tau + d\tau) - n(\tau)}{n(\tau)} \right] = -d\tau \quad (1.25)$$

Pero $\frac{W}{Q_s} = \bar{\tau}$, entonces:

$$\left[\frac{dn(\tau)}{n(\tau)} \right] = -\frac{d\tau}{\bar{\tau}} \quad (1.26)$$

Integrando ambos lados de la ecuación obtenemos:

$$\int_{n_0}^n \left[\frac{dn(\tau)}{n(\tau)} \right] = \int_{\tau_0}^{\tau} -\frac{d\tau}{\bar{\tau}} \quad (1.27)$$

Finalmente obtenemos que:

$$n(\tau) = n_0 * \text{EXP} \left(-\frac{\tau}{\bar{\tau}} \right) \quad (1.28)$$

Donde n_0 es la densidad de partículas frescas introducidas al secador.

$$n_0 = \frac{\eta}{W} = \frac{Q_s}{V_s \rho_s W} = \frac{1}{V_s \rho_s \bar{\tau}} \quad (1.29)$$

Entonces el número de partículas por unidad de masa de lecho, que han permanecido entre τ y $\tau + d\tau$ en el secador es:

$$dN(\tau) = n_0 * \text{EXP}\left(-\frac{\tau}{\bar{\tau}}\right) * d\tau \quad (1.30)$$

Para una columna con más de una etapa, para las dos primeras se obtendría:

$$1^{\text{er.}} \text{ Etapa} \quad n_1 = n_0 * \text{EXP}\left(-\frac{\tau_1}{\bar{\tau}}\right) \quad \text{a un tiempo } \tau_1 \quad (1.31)$$

$$dN_1 = n_0 * \text{EXP}\left(-\frac{\tau_1}{\bar{\tau}}\right) * d\tau_1 \quad \text{entre } \tau_1 \text{ y } \tau_1 + d\tau_1 \quad (1.32)$$

$$2^{\text{da.}} \text{ Etapa} \quad n_2 = n_0 * \text{EXP}\left(-\frac{\tau_2}{\bar{\tau}}\right) \quad \text{a un tiempo } \tau_2 \quad (1.33)$$

$$dN_2 = n_0 * \text{EXP}\left(-\frac{\tau_2}{\bar{\tau}}\right) * d\tau_2 \quad \text{entre } \tau_2 \text{ y } \tau_2 + d\tau_2 \quad (1.34)$$

Sin embargo, tenemos que tomar en cuenta que entre las partículas dN_2 , hay partículas que han permanecido tiempos de residencia entre 0 e ∞ en la primera etapa, por esto, es necesario definir una fracción de densidad de población α_{12} que considere a las partículas que ya estuvieron en la etapa 1, entonces para las dos etapas se define:

$$d^2N_{12} = (\alpha_{12} n_2) * d\tau_1 d\tau_2 \quad (1.35)$$

Si multiplicamos dN_1 por dN_2 obtenemos:

$$dN_1 dN_2 = \left[n_0 * \text{EXP} \left(-\frac{\tau_1}{\bar{\tau}} \right) \right] \left[n_0 * \text{EXP} \left(-\frac{\tau_2}{\bar{\tau}} \right) \right] d\tau_1 d\tau_2 \quad (1.36)$$

$$d^2 N_{12} = n_0 * n_0 \left[\text{EXP} \left(-\frac{\tau_1 + \tau_2}{\bar{\tau}} \right) \right] d\tau_1 d\tau_2 \quad (1.37)$$

$$d^2 N_{12} = n_0 * \left(\frac{1}{V_s \rho_s \bar{\tau}} \right) * \left[\text{EXP} \left(-\frac{\tau_1 + \tau_2}{\bar{\tau}} \right) \right] d\tau_1 d\tau_2 \quad (1.38)$$

$$d^2 N_{12} = \left(\frac{n_0}{\bar{\tau}} \right) * \left[\text{EXP} \left(-\frac{\tau_1 + \tau_2}{\bar{\tau}} \right) \right] d\tau_1 d\tau_2 \quad (1.39)$$

Entonces:

$$\alpha_{12} n_2 = \left(\frac{n_0}{\bar{\tau}} \right) * \left[\text{EXP} \left(-\frac{\tau_1 + \tau_2}{\bar{\tau}} \right) \right] \quad (1.40)$$

Pero, de la ecuación (1.33)

$$n_2 = n_0 * \text{EXP} \left(-\frac{\tau_2}{\bar{\tau}} \right) \quad , \text{ entonces}$$

$$\alpha_{12} = \left(\frac{1}{\bar{\tau}} \right) * \left[\text{EXP} \left(-\frac{\tau_1}{\bar{\tau}} \right) \right] \quad (1.41)$$

Por lo tanto, la distribución de tiempos de residencia total de las partículas que abandonan las dos etapas es:

$$n_2^t = dN_2^t = \int_0^{\tau} \frac{n_0}{\bar{\tau}} * \mathbf{EXP}\left(-\frac{\tau}{\bar{\tau}}\right) * d\tau_2 = \frac{\tau * n_0}{\bar{\tau}} * \mathbf{EXP}\left(-\frac{\tau}{\bar{\tau}}\right) \quad (1.42)$$

De manera general para i etapas:

$$n_i = n_0 * \mathbf{EXP}\left(-\frac{\tau_i}{\bar{\tau}}\right) \quad (1.43)$$

$$dN_i = n_0 * \mathbf{EXP}\left(-\frac{\tau_i}{\bar{\tau}}\right) * d\tau_i \quad (1.44)$$

Para la etapa i - 1:

$$\alpha_{i-1,i} = \left(\frac{1}{\bar{\tau}}\right) * \left[\mathbf{EXP}\left(-\frac{\tau_{i-1}}{\bar{\tau}}\right)\right] \quad (1.45)$$

Y por lo tanto:

$$\alpha_{i-1,i} n_i = \left(\frac{n_0}{\bar{\tau}}\right) * \left[\mathbf{EXP}\left(-\frac{\tau_{i-1} + \tau_i}{\bar{\tau}}\right)\right] \quad (1.46)$$

Así la fracción de densidad de partículas que han permanecido τ_1 en la primera etapa, τ_2 en la segunda, ..., τ_{i-1} en i - 1 etapa y las que han permanecido τ_i en la etapa i es:

$$\alpha_{12\dots i-1,i} = \frac{1}{\left(\frac{\bar{\tau}}{\bar{\tau}}\right)^{i-1}} * \mathbf{EXP}\left[-\frac{\tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \dots + \tau_{i-1} + \tau_i}{\bar{\tau}}\right] \quad (1.47)$$

Y la densidad de población correspondiente será:

$$\alpha_{12\dots i-1,i} n_i = \frac{n_0}{\left(\frac{\tau}{\tau}\right)^{i-1}} * \mathbf{EXP} \left[-\frac{1}{\tau} \sum_{j=1}^i \tau_j \right] \quad (1.48)$$

Y el total queda como:

$$n_i^t = \frac{n_0 (\tau)^{i-1}}{(i-1)! \left(\frac{\tau}{\tau}\right)^{i-1}} \mathbf{EXP} \left(-\frac{\tau}{\tau} \right) \quad (1.49)$$

La ecuación anterior representa la función de distribución de tiempos de residencia.

1.9 Cálculo teórico de la humedad promedio a la salida de un secador continuo.

Una de las aproximaciones más empleadas es la desarrollada por Vanecek y col. (1966), donde la humedad promedio de salida de un secador continuo de lecho fluidizado, puede calcularse a partir de los datos de secado obtenidos por lotes y la determinación de la DTR., esto es:

$$\dot{\bar{X}}(\tau) = \int_0^{\infty} \bar{X}(\tau) \mathbf{E}(\tau) d\tau \quad (1.50)$$

Donde $\bar{X}(\tau)$ corresponde a la función obtenida mediante la determinación experimental de cinética de secado por lotes a condiciones constantes de temperatura en el lecho y $\mathbf{E}(\tau)$ es la correspondiente función de distribución de tiempos de residencia (DTR).

Entonces, el contenido de humedad promedio a la salida del secador de i etapas es:

$$\dot{X}(\tau) = \int_0^{\infty} \left(\bar{X}(\tau) \frac{n_0(\tau)^{i-1}}{(i-1) \left(\frac{\tau}{\tau}\right)^{i-1}} \text{EXP}\left(-\frac{\tau}{\tau}\right) \right) d\tau \quad (1.51)$$

En la experimentación, obtener condiciones isotérmicas en el lecho requeriría de un control sofisticado de temperatura, el cual tendría que ajustar la temperatura del aire conforme al contenido de humedad que tengan los sólidos a lo largo del experimento. Reay y Allen (1982), proponen una técnica que permite ajustar la curva de secado a temperatura constante, a partir de una curva de secado obtenida experimentalmente a condiciones adiabáticas, manteniendo constante la temperatura de alimentación del aire y registrando la evolución de la temperatura del lecho durante el tiempo que dura la experimentación. El ajuste se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta t_{isot} = \Delta t_1 \left(\frac{[(p_s - p_i)(X - X_e)]_{r_1}}{[(p_s - p_i)(X - X_e)]_{r_{isot}}} \right) \quad (1.52)$$

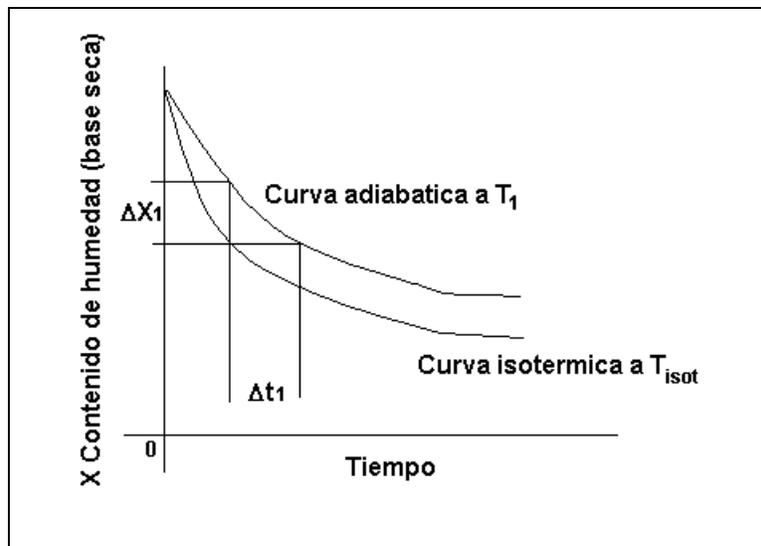


Figura 1.6.- Transformación de las curvas de secado por lotes.

Donde p_s es la presión de vapor de agua, p_i es la presión parcial de agua en el aire de alimentación, X es el contenido de humedad a un tiempo dado y X_e es el contenido de humedad en el equilibrio. McKenzie y Bahu (1991), determinaron que para materiales tipo B, como lo es el amaranto, (según la clasificación de Geldart), el cálculo de la curva a condiciones isotérmicas es prácticamente independiente de la humedad, por lo que emplearon la ecuación de la forma:

$$\Delta t_{isot} = \Delta t_1 \left(\frac{[(p_s - p_i)]_{T_1}}{[(p_s - p_i)]_{T_{isot}}} \right) \quad (1.53)$$

1.10 Modelo de tanques en serie.

El comportamiento de la curva E_θ de un secador puede representarse mediante una combinación de tanques completamente agitados, teniendo como único parámetro el número de tanques (N). A continuación se presenta una ecuación análoga a la obtenida a partir del balance de población sólo que en ésta se hace referencia a tanques conectados en serie. (Levenspiel, 2002)

$$E_\theta = \tau E = \frac{N \cdot (N \cdot \theta)^{N-1}}{(N-1)!} \cdot e^{-N\theta} \quad (1.54)$$

Así para el modelo de un tanque agitado perfectamente mezclado ($N=1$) se tiene:

$$E(t) = \frac{1}{\tau} e^{\left(-\frac{t}{\tau}\right)} \quad (1.55)$$

Mientras que el modelo que representa a dos tanques agitados en serie ($N=2$) es:

$$E(t) = \frac{t}{\tau^2} e^{\left(-\frac{t}{\tau}\right)} \quad (1.56)$$

Gráficamente, en la figura 1.6, se presenta el comportamiento de las funciones de DTR del modelo de tanques en serie. Para $N=1$ se representa el comportamiento de un tanque en mezclado perfecto, mientras que cuando N crece, tiende al flujo en pistón.

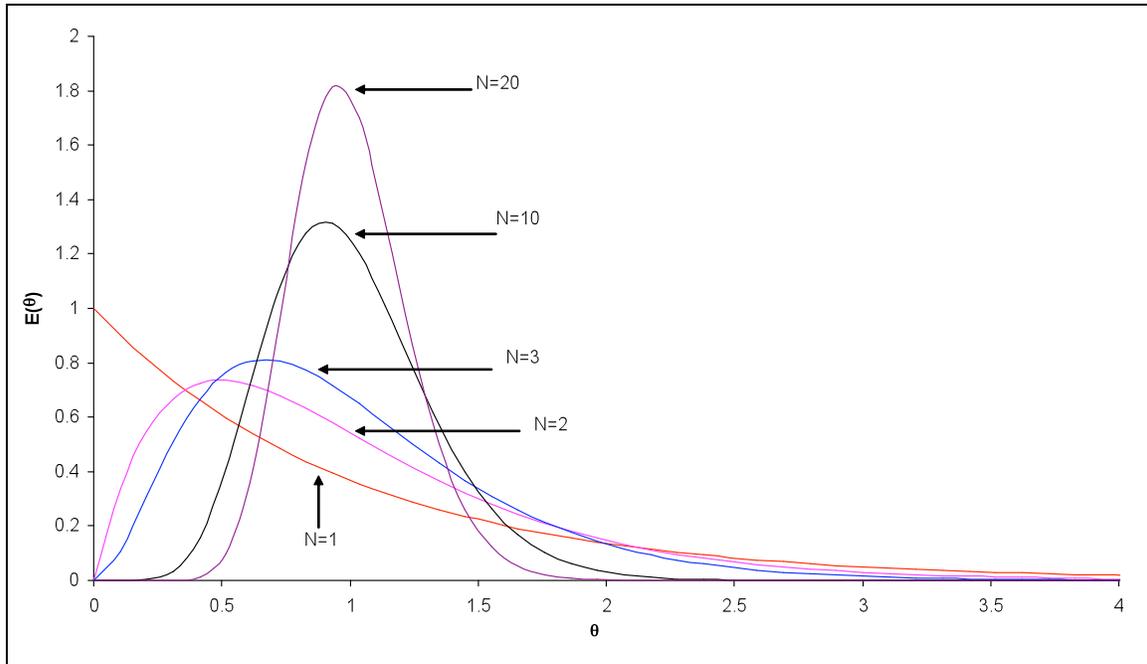


Figura 1.6. Curvas de DTR para el modelo de tanques en serie.

Una magnitud descriptiva de importancia, es la amplitud de la distribución, que comúnmente se mide con la varianza σ^2 , ésta representa el cuadrado de la amplitud de la distribución y sus dimensiones son $(\text{tiempo})^2$. Es particularmente útil para comparar curvas experimentales con una curva de una familia de curvas teóricas y junto con el parámetro locacional de la distribución, es decir, la media o centroide de la distribución (ecuación 1.19) dicha curva puede ser caracterizada.

Así para una curva continua, o para medidas discretas a intervalos de tiempo iguales, la varianza, resulta: (Levenspiel, 2002)

$$\sigma^2 = \frac{\sum t_i^2 E_i}{\sum E_i} - \tau^2 \quad (1.57)$$

Un caso particular de las funciones DTR y relevante en el estudio de lechos fluidizados (dado la suposición de un buen grado de mezclado en el lecho), es el mezclado perfecto, el cual se encuentra definido por la ecuación (1.55)

Si a un lecho continuo con flujo másico **G** y una masa de sólidos retenidos **Z** se introduce repentinamente, al tiempo $t = 0$, un pulso de trazador de magnitud **m** ($m \ll Z$) y se determina con el tiempo, la fracción en peso de trazador a la salida **C**(τ), se habrá de cumplir la siguiente relación, Vanecek y col. (1966):

$$E(t) = \frac{G}{m} C(t) \quad (1.58)$$

Combinando la ecuación 1.55 con la ecuación 1.58, se obtiene la relación lineal

$$\log(C(t)) = \log\left(\frac{m}{Z}\right) - 0.43\left(\frac{G}{Z}\right)t \quad (1.59)$$

De cumplirse que los datos experimentales se ajusten al modelo lineal propuesto, se aplica el modelo de mezclado perfecto para el comportamiento de los sólidos en el lecho.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.

La determinación de la distribución de tiempos de residencia es de sumo interés en el diseño y caracterización en la mayoría de los procesos de ingeniería química, bioquímica, alimentos y ambiental. En el escalamiento de equipos, este parámetro es de importancia relevante (Baléo y Le Cloirec, 2000). Es por esto, que se ha desarrollado investigación en este campo de estudio y en particular en la caracterización de diferentes tipos de secadores. A continuación se presentan algunos ejemplos.

Mazza y col. (2003), determinan las distribuciones de tiempos de residencia para un secador de tipo Spray, secando una solución acuosa de óxido de galio, además presenta una técnica basada en la inyección de un trazador radioisotopo. Modela el comportamiento del secador empleando el modelo de tanques en serie. No presenta datos sobre el secado del producto.

Lema y Pontin. (2005) realizan un análisis de las variables de diseño en el comportamiento de un secador rotatorio de semillas de amaranto, concluye que, la temperatura del aire de alimentación y el tiempo de residencia son los factores más importantes en el secado del grano. No presentan un estudio detallado de las distribuciones de tiempos de residencia ni hacen énfasis en las cinéticas de secado.

Reyes y Castro. (2004) determinan las funciones de Distribución de tiempos de residencia para un secador de lecho fluidizado, con agitación mecánica y entradas laterales de aire. Concluye que la humedad de los sólidos influye en la forma de las funciones. Modela a partir del modelo de tanques en serie. La mejor aproximación a mezclado perfecto es cuando también se alimenta aire lateralmente.

Marreto y col. (2007) estudian la influencia que tiene sobre el tiempo de residencia, el volumen de trazador, la concentración del mismo y la técnica de inyección empleada. A partir de esto obtienen las funciones de distribución de tiempos de residencia para un

secador tipo fuente. Encuentran que la concentración y el volumen de trazador influyen en el tiempo de residencia.

En lo referente al secado, la humedad promedio de salida de un secador operado en forma continua puede predecirse a partir de la función de distribución de tiempos de residencia y de las cinéticas de secado obtenidas en la operación por lotes del secador. (Danckwerts, 1953), (Vanecek, 1966), (Chandran,1990). De manera general, se acepta que un lecho fluidizado opera en mezclado perfecto. (Chandran,1990)

En la literatura especializada, existen artículos que modelan el comportamiento de un secador operado por lotes y su respectiva validación experimental, sin embargo, la operación en continuo ha recibido menos atención y su modelo se limita a predecir la humedad de salida a partir de las cinéticas por lotes y se acepta que está en mezclado perfecto y en la mayoría de los casos, no existe validación experimental.

Chandran y col. (1990) reportan un modelo para el secado de sólidos por lotes y en continuo y verificaron sus datos experimentales con el modelo propuesto por Vanecek. Realizaron la DTR para un secador de lecho fluidizado y fluidizado en espiral, obteniendo resultados satisfactorios empleando el modelo del mezclado perfecto.

Zahed y Epstein. (1992) presentan un conjunto de ecuaciones con parámetros no ajustables para predecir numéricamente el comportamiento de la variación de humedad y temperatura en un secador tipo fuente, operado por lotes y en continuo, realizan simulaciones en lotes y continuo y comparan sus resultados con datos experimentales obtenidos por Mathur y Gishler (1953). Para el caso continuo, el mejor ajuste a los resultados experimentales es cuando se considera al sólido con temperatura uniforme y al lecho con un buen grado de mezclado pero no un mezclado perfecto.

Zahed y col. (1995), presentan un modelo con parámetros no ajustables para un secador de lecho fluidizado operado por lotes y en continuo. Realizan simulación para ambos tipos de operación, para la predicción de la humedad en continuo, suponen que el secador

opera en mezclado perfecto. Respecto a la validación del modelo presentado comentan que no hay los suficientes datos experimentales y los que se han publicado no permiten una adecuada comparación, ya que no corresponden al régimen de fluidización empleado o no reportan información clave necesaria para ser comparada.

Kannan y col. (1995) estudian el efecto que tienen sobre el secado, la temperatura de alimentación del aire y el tiempo de residencia de los sólidos en un secador de lecho fluidizado operado en forma continua. Para la predicción de la humedad de salida, suponen que el secador opera en mezclado perfecto.

Tosi y Re (1999) Obtienen una ecuación de tipo Arrhenius que predice el contenido de humedad como una función de la temperatura y el tiempo, a partir de cinéticas de secado obtenidas en un secador de lecho fluidizado operado en lotes, el grano que secó fue semillas de amaranto. La ecuación es válida en el intervalo de temperaturas de 60 a 100°C , humedad inicial del grano de 23.5 a 16.6 % base seca y para un flujo másico de aire de 30 Kg aire seco/m² min.

Caballero (1999) Realizó una comparación entre los modelos homogéneo y heterogéneos propuestos por Zahed (1992 y 1995) Empleó un secador de lecho fluidizado de semillas de amaranto operado en lotes. Concluye que el modelo que considera la hidrodinámica más sencilla del lecho ofrece un mejor ajuste a los resultados experimentales.

Abdel-Jabbal y col. (2002), realizan el estudio de la dinámica de un secador de lecho fluidizado tipo fuente operado en continuo. A partir del enfoque propuesto por Zahed y col. (1995) desarrollan un modelo que predice el contenido de humedad de los sólidos, la humedad del aire y la temperatura de los sólidos como una función del tiempo. El comportamiento dinámico del proceso de secado fue analizado mediante la respuesta del proceso a cambios en la temperatura del aire, humedad inicial del sólido, tiempo de residencia y humedad de entrada del aire. Suponen que el secador se encuentra perfectamente mezclado. No realizan validación experimental de su modelo.

Lema y col (2005) Estudian el efecto del tiempo de residencia, la temperatura y caudal del aire sobre el comportamiento de un secador rotatorio de semillas de amaranto. Concluyen que tanto el tiempo de residencia como la temperatura del aire tienen gran incidencia en el secado. No hacen mayor referencia sobre las cinéticas de secado del amaranto.

De la revisión anterior, se puede intuir la importancia de caracterizar, modelar y verificar experimentalmente dicho modelo, aunque en general es aceptable que un lecho fluidizado opera perfectamente mezclado, es importante determinar el verdadero comportamiento de flujo en el lecho para así caracterizar de manera adecuada el secador. En la mayoría de los trabajos presentados, no se realiza experimentación que valide el modelo, y se limitan a predecir el comportamiento del secador en continuo, a partir de su operación por lotes y suponiendo mezclado perfecto. Por tal motivo es necesario realizar trabajo en caracterizar adecuadamente el patrón de flujo en el lecho y en la validación experimental del modelo matemático propuesto por Vanecek y col. (1966) a partir de funciones de distribución de tiempos de residencia obtenidas experimentalmente y no supuestas. Ya que, como se mencionó, Zahed y Epstein (1992), obtuvieron mejores resultados al comparar la Humedad teórica con la humedad de salida obtenida experimentalmente empleando una función de DTR experimental en lugar de la suposición de mezclado perfecto.

3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.

El secado es una operación importante en industrias como la química, metalúrgica, farmacéutica y alimenticia entre otras. El secado por lecho fluidizado es considerada una de las técnicas más exitosas, ésta ofrece una alta eficiencia de contacto entre el sólido que se va a secar y el gas caliente, sin embargo es una operación que consume grandes cantidades de energía.

Comúnmente el estudio experimental de este tipo de secadores se hace en equipos operados en forma intermitente y rara vez en lechos fluidizados continuos. Debido a los grandes volúmenes de materias primas que se manejan en la agroindustria, resulta de primordial importancia concebir estos secadores operados en forma continua, para entender su funcionamiento en vías de poder escalarlos posteriormente.

4. OBJETIVOS

4.1 General

Analizar el funcionamiento de un secador de lecho fluidizado continuo de semillas de amaranto, operado con una sola etapa, a partir de la evaluación de los parámetros operacionales: temperatura de alimentación del aire al secador y el tiempo de residencia de los sólidos en el secador, variando la relación altura del vertedero con el diámetro interno del secador (L/D).

4.2 Particulares

- Determinar la cinética de secado del amaranto por lotes y en continuo.
- Determinar la Distribución de Tiempos de Residencia (DTR) de los granos a través del secador.
- Realizar la validación del modelo comparando resultados teóricos con experimentales.

5. MATERIALES Y EQUIPO

5.1 Material.

Para este estudio se utilizó la especie *Amarantus hypochondriacus* que es la variedad más consumida en México, procedente de Xochimilco, en la Ciudad de México D.F. En condiciones de saturación el contenido de humedad varía entre 16 y 18 % (base seca).

5.2 Equipo Experimental.

En la figura 5.1 se muestra la instalación experimental utilizada en este estudio. Consta de un secador de acrílico con diámetro interno de 0.095 m y altura de 0.48 m con paredes aisladas y una placa distribuidora con 233 orificios de 0.001 m de diámetro en arreglo triangular. El secador se alimentó con una corriente de aire anhidro por medio de un compresor con líneas de acero galvanizado (DI, 0.02 m) y sus filtros, dicha corriente se reguló por medio de un rotámetro que permite una alimentación de 0.05 a 0.9 m³ /min a 391.9 kPa (man.) a la descarga del compresor.

Para el calentamiento del aire de alimentación se empleó una batería de 10 resistencias tipo abrazadera (200 W cada una) montadas en la tubería y por medio de un controlador (Chromalox mod.3910) fue regulado a la temperatura deseada.

Cerrando las válvulas de alimentación y descarga, **h** y **j**, el equipo puede operar en forma intermitente. La válvula **h**, se diseñó de tal forma que permitiera la inyección de trazador al mismo tiempo que interrumpe momentáneamente la alimentación del grano fresco. Una vez inyectado el pulso del trazador, la válvula se abre para seguir alimentando el material en forma continua.

Para controlar la alimentación de granos al equipo, en el extremo inferior del tubo de alimentación, se empleó una reducción, la cual limitó el flujo de alimentación a 0.001 kg/s.

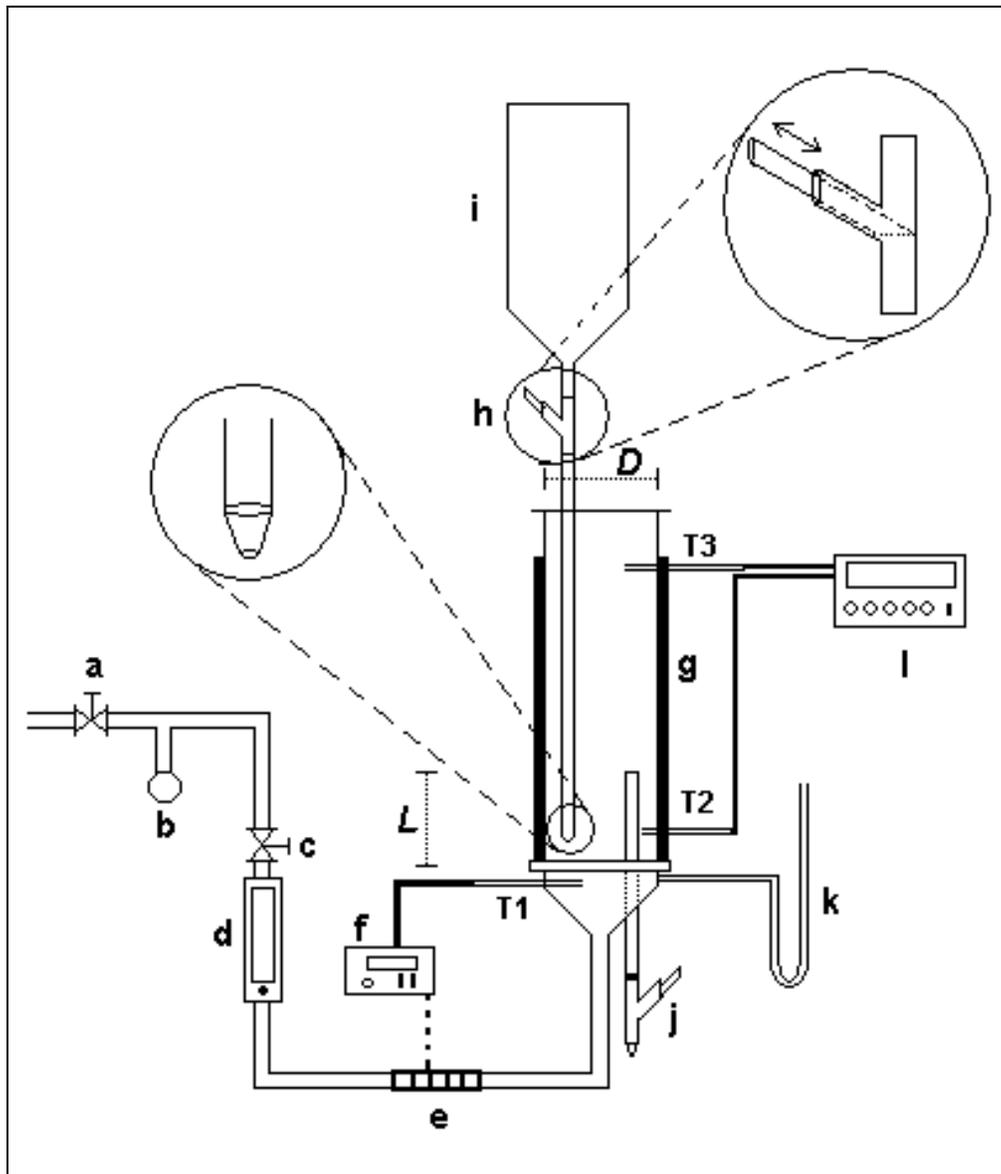


Figura 5.1.- Secador Continuo de lecho fluidizado. a) y c) Válvulas, b) Manómetro, d) Rotámetro, e) Batería de resistencias eléctricas, f) Control de la temperatura de alimentación del aire, g) Secador de acrílico aislado, i) Contenedor para sólidos, j) y h) válvulas para el control de entrada y salida de sólidos, k) Manómetro, l) Registrador de temperaturas, L Altura del vertedero, D Diámetro del secador, $T1, T2$ y $T3$ Puertos para medición de temperatura.

6. DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS

6.1 Diámetro de partícula (dp).

Se obtuvo a partir de mediciones con un calibrador Vernier.

6.2 Fracción de espacios vacíos.

Con semillas secas empacadas en una probeta volumétrica de 500 ml, se desplazó el aire de la probeta con un líquido, etanol en este caso, hasta lograr el afore, obteniendo el volumen de los espacios vacíos con la siguiente fórmula:

$$\varepsilon = \frac{\text{volumen del líquido de afore}}{\text{volumen total}} \quad (6.1)$$

6.3 Esfericidad.

Al ser el amaranto una partícula esférica, se considero: $\phi_s = 1$

6.4 Densidad empacada.

Se obtiene al dividir el peso de la muestra entre el volumen total ocupado por el sólido

$$\rho_E = \frac{\text{peso del amaranto}}{\text{volumen total}} \quad (6.2)$$

6.5 Densidad aparente.

Esta densidad se obtiene dividiendo el peso de la muestra entre el volumen corregido, obtenido al eliminar el volumen correspondiente a los espacios vacíos entre partículas:

$$\rho_B = \frac{\text{peso del amaranto}}{\text{volumen de la probeta}(1 - \varepsilon)} \quad (6.3)$$

7. DETERMINACIÓN DE PROPIEDADES HIDRODINÁMICAS.

7.1 Velocidad mínima de fluidización

Esta propiedad se obtuvo vía el dispositivo mostrado en la fig. 5.1 donde el aire se reguló mediante la válvula **c** determinando el flujo de aire a alimentar a partir del rotámetro, y la caída de presión en el manómetro **k**. En el lecho fluidizado se cargaron 0.90 kg de amaranto. Al inicio de la prueba la válvula de alimentación del aire estaba totalmente cerrada, de tal forma que se fue aumentando gradualmente el flujo hacia el lecho.

7.2 Fracción de espacios vacíos mínimo de fluidización (ϵ_{mf}).

Simultáneamente a la determinación de u_{mf} es posible obtener ϵ_{mf} a partir del volumen del lecho en condiciones mínimas de fluidización (V_{mf}) de acuerdo a la siguiente expresión (Kunni y Levenpiel, 1991):

$$V_{mf} = \frac{\pi}{4} d_l^2 L_{mf} \quad (7.1)$$

$$\epsilon_{mf} = \frac{V_{mf} (1 - x_s)}{V_{mf}} \quad (7.2)$$

donde, x_s es la fracción volumen de la muestra determinada a partir del lecho fijo.

8. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

8.1 Preparación del grano.

El amaranto adquirido para la realización de este proyecto, ya se encontraba relativamente seco, alrededor del 13 % de humedad (base seca), por lo que fue necesario realizar una humectación del mismo hasta valores tales que representaran la humedad reportada al momento de su cosecha, es decir, entre 16 y 17 % (base seca).

Para el caso de la experimentación por lotes, para cada experimento se colocaron 0.6 Kg de amaranto repartidos en 4 charolas de aluminio y se mantuvieron en una cámara de humedad con atmósfera de 80% de humedad relativa a temperatura ambiente. El grano se mezcló periódicamente con el fin de tener una humedad más homogénea. Este proceso se detuvo cuando el grano alcanzó una humedad promedio de 21-22 % (base seca). Esto se logró después de 5 días de mantener al amaranto en la cámara de humedad.

Para el caso de la operación en continuo, para cada experimento, se colocaron cerca de 5 Kg de amaranto repartidos en 4 charolas de aluminio y se mantuvieron en una atmósfera de 80% de humedad relativa y a temperatura ambiente. Debido a la cantidad de grano que se estaba humectando, el proceso tardó cerca de 7-8 días alcanzando humedades de entre 16-17 % (base seca). El grano no se dejó más tiempo en las cámaras de humedad porque empezaban a aparecer signos de contaminación en los mismos. El grano se mezcló periódicamente para mantenerlo lo más homogéneo posible.

Con el fin de agilizar el proceso de “rehumectación” de los granos, se probó la humectación directa, rociando agua sobre los mismos mediante un atomizador, sin embargo, esto provocó que la humedad en los granos no fuera homogénea, ya que, había unos muy secos 13 % y otros demasiado húmedos cerca del 25 % (base seca), humedades que no permitían el libre flujo de los sólidos a través del tubo de alimentación porque se quedaban pegados en las paredes del mismo.

8.2 Determinación de Distribución de Tiempos de Residencia (DTR).

Para la obtención de las **DTR** se utilizó la técnica de estímulo - respuesta. Una vez que el secador se encuentra operando en estado estacionario se “inyecta” una cantidad de trazador (semillas de amaranto coloreadas) en la corriente de alimentación y la concentración del mismo se monitorea a la salida del secador como una función del tiempo. Para esto se tomaron muestras a la salida del secador de aproximadamente 0.030 Kg cada 30 s. A estas muestras se les determinó la concentración de trazador a partir de la masa de trazador en cada muestra tomada.

8.3 Determinación de cinética de secado en la operación por lotes.

El secador se estabiliza térmicamente a una de las temperaturas previamente establecida, 60, 70 u 80 °C y a la velocidad del aire, que se estableció previamente a 0.77 m/s que corresponde a 2.8 veces la velocidad mínima de fluidización. Alcanzado este equilibrio se adicionan al secador 0.6 Kg de amaranto con humedad inicial conocida. Este momento es considerado como el tiempo inicial de experimentación. A partir de esto se toman muestras de aproximadamente 0.002 Kg y se almacenan herméticamente para posteriormente determinar su contenido de humedad. Asimismo se monitorea la temperatura en el lecho y la del aire de salida del secador mediante un registrador Digi-Sense marca Cole Parmer modelo 92000-00.

8.4 Determinación de curvas de secado en la operación continua.

El secador se estabiliza a una de las temperaturas previamente establecida, 60, 70 u 80 °C y a la velocidad de alimentación del aire establecida de 2.8 veces la velocidad mínima de fluidización. A continuación se carga al secador una cierta cantidad de amaranto (correspondiente al parámetro L/D de 1.0, 1.5 y 2.0) y se comienza a alimentar el amaranto en forma continua y constante a razón de 0.001 kg/s aproximadamente. A partir de este punto se toman muestras de amaranto a la salida del secador a diferentes tiempos,

éstas se almacenan herméticamente para posteriormente determinar el contenido de humedad.

La temperatura se monitorea en forma continua en el lecho y en el aire de salida del secador, mediante un registrador Digi-Sense marca Cole Parmer modelo 92000-00.

8.5 Determinación del porcentaje de humedad en los granos de amaranto.

Para la determinación de humedad en las partículas se utilizó una estufa de convección forzada (marca Felisa) y una balanza analítica (marca Ohaus, Modelo B200). El procedimiento consiste en pesar muestras pequeñas de las semillas obtenidas a diferentes tiempos de experimentación y secarlas en la estufa a 100° C por 24 hrs, posteriormente se vuelven a pesar las semillas para determinar su masa final y por diferencias de peso antes y después del secado se obtiene la humedad de la muestra. Para esto se emplea la ecuación (8.1).

$$\%H = \frac{m_{in} - m_f}{m_f} * 100 \quad (8.1)$$

9. DISEÑO EXPERIMENTAL

9.1 El diseño factorial 2^k

El diseño factorial 2^k describe los experimentos más adecuados para conocer simultáneamente que efectos tienen k factores sobre un parámetro de respuesta y descubrir si interaccionan entre ellos. Estos experimentos están planeados de forma que se varían simultáneamente varios factores, pero se evita que cambien siempre en la misma dirección. Al no haber factores correlacionados se evitan experimentos redundantes. Además, los experimentos se complementan de tal modo que la información buscada se obtiene combinando las respuestas de todos ellos. Esto permite obtener la información con el mínimo número de experimentos y con la menor incertidumbre. (Ferré, 2002)

Existe un método para hacer una réplica de ciertos puntos de un diseño factorial 2^k que ofrecerá protección contra los efectos de segundo orden o cuadráticos a la vez que permitirá una estimación independiente del error que va a obtenerse. El método consiste en agregar n experimentos en puntos centrales en el diseño 2^k . Una razón para esto es que los puntos centrales no afectan las estimaciones usuales de los efectos en un diseño 2^k . Cuando se agregan puntos centrales, se supone que los k factores son cuantitativos. (Montgomery, 2007)

Un modelo lógico por considerar en este caso es uno de primer orden o de efectos principales representado por:

$$y = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j x_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \varepsilon \quad (9.1)$$

La forma de obtener los parámetros (β_0 , β_j , y β_{ij}) y el análisis de varianza, se presentan en el Apéndice C

9.2 Diseño factorial 2^2 con repeticiones en un punto central

Para este caso de estudio se eligió un diseño factorial 2^2 con tres repeticiones en un punto central. Se eligieron como factores el tiempo de residencia de los sólidos en el lecho, (mediante la manipulación de la relación L/D) y la temperatura de alimentación del aire al secador.

En general, en el secado de granos se maneja un amplio intervalo de temperaturas que van desde los 35° C hasta los 90° C, eligiéndose la misma dependiendo del uso final que se le dará a los mismos y del tipo de grano (Rodríguez, 2005). Para este caso de estudio, se eligió operar en temperaturas medias a altas.

El intervalo del parámetro L/D se eligió en base a experiencias previas en el secador, ya que, relaciones menores a 1.0 no permiten una buena distribución del aire en el lecho y para el límite superior se observó que L/D mayores a 2.5 provocaba acanalamiento en el lecho y expulsión de los granos fuera del secador.

Los factores y el dominio experimental se muestran en la tabla 9.1 y gráficamente se observan en la figura 9.1.

Tabla 9.1 Factores y dominio experimental. Operación en continuo.

Factores	Dominio Experimental			Variable de respuesta
	Nivel -	0	Nivel +	
x1: L/D (-)	1.0	1.5	2.0	y : Humedad de salida
x2: Temperatura (° C)	60	70	80	

En todos los casos se manejó un solo flujo de sólidos alimentados (operación continua) y el mismo flujo de aire alimentado, siendo la velocidad del aire tal, que el sistema operó en régimen de fluidización burbujeante.

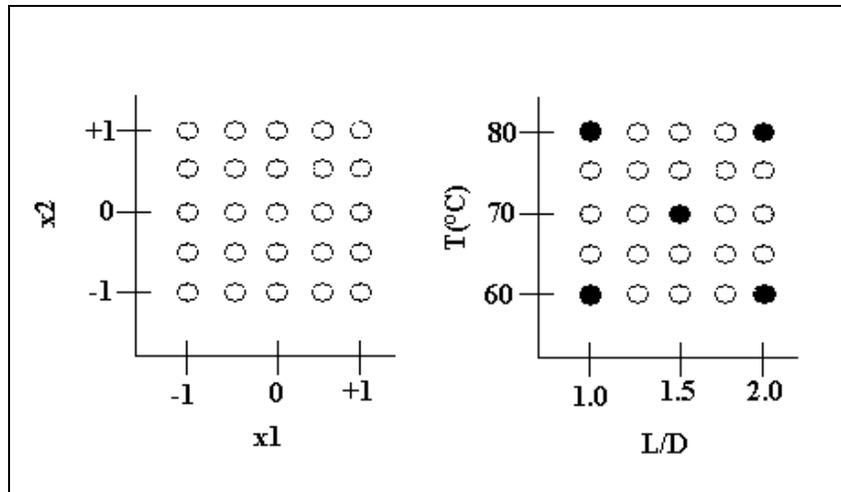


Figura 9.1. Dominio experimental para dos factores, expresado en variables codificadas (izquierda) y variables reales (derecha). Los puntos negros representan los experimentos del diseño factorial 2^2 con repetición en un punto central.

La tabla anterior también muestra la notación codificada más usual para factores continuos, se asigna el valor -1 al extremo inferior del dominio experimental y el valor +1 al extremo superior, mientras que al punto central se le asigna 0. Para simplificar sólo se indica - y +. La correspondencia entre variables reales y variables codificadas (x_1 y x_2) se relaciona mediante:

$$x_i = \frac{V_i - 0.5(V_- + V_+)}{0.5(V_+ - V_-)} \quad (9.2)$$

Para la operación en continuo, se decidió realizar un experimento adicional al diseño factorial, aumentando la temperatura del aire de entrada a 100°C (la máxima posible en el equipo experimental) y variando la relación L/D en sus dos niveles. Esto se hizo con el fin de obtener una mayor temperatura de secado en el lecho, y así tener más datos que nos ayudaran a concluir sobre la tendencia de los mismos al variar los parámetros.

Para la obtención de las cinéticas de secado en la operación por lotes se realizó un experimento para cada una de las temperaturas elegidas previamente ($60, 70$ y 80°C), mismas que se realizaron con la misma cantidad de sólidos en el secador correspondientes a la relación $L/D = 1.5$.

10. RESULTADOS Y DISCUSION

10.1 Propiedades físicas e hidrodinámicas del amaranto.

Tabla 10.1. Propiedades físicas e hidrodinámicas del amaranto.

Humedad inicial (b.s)	d_p (m)	Densidad empacada (kg/m^3)	Densidad de la partícula (kg/m^3)	Esfericidad (-)	Velocidad mínima de fluidización (m/s)
0.16-0.17	0.001	858.6	1371.6	1.0	0.27

10.2 Distribución de Tiempos de Residencia (DTR).

En la tabla 10.2 se muestran los valores de los parámetros empleados en cada experimento. Estos se realizaron a temperatura ambiente, es decir, entre 22-25 °C.

Tabla 10.2. Parámetros empleados en la determinación de DTR.

L/D	Humedad de los sólidos, b.s. (Kg/Kg)	Velocidad del aire (m/s)	Flujo de sólidos (kg/s)	Masa de sólidos retenidos (kg)
1.0	0.13	$2.8U_{mf} = 0.77$	0.001	0.286
2.0	0.13	$2.8U_{mf} = 0.77$	0.001	0.569

En las figuras 10.1 y 10.2 se presentan los datos experimentales obtenidos para la determinación de la función de distribución de tiempos de residencia del amaranto en el secador para L/D = 1.0 y 2.0 respectivamente. Los registros experimentales se muestran en el apéndice D.

Para la relación, Altura del vertedero con respecto al Diámetro del secador ($L/D = 1.0$)

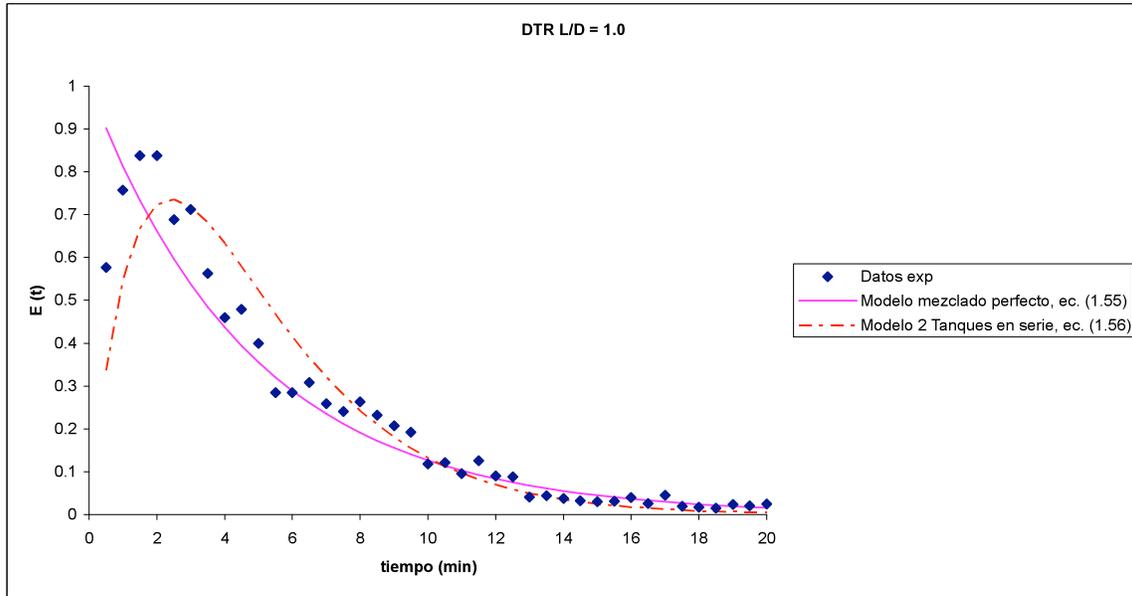


Figura 10. Comparación Datos experimentales y modelo de 1 y 2 tanques en serie.

En la figura 10.1 se observa que el patrón de flujo que siguen los datos experimentales a partir del primer minuto de experimentación, es semejante al patrón seguido para mezclado perfecto. El comportamiento de los dos primeros puntos experimentales puede ser reflejo de la inyección del trazador, ya que, la totalidad del mismo no ingresaba de manera inmediata al secador. Para justificar el ajuste de los datos experimentales al modelo de mezclado perfecto se utilizó el método propuesto por Vanecek y col. (1966) representado por la ecuación (1.59) y mediante la determinación de la varianza (mediante la ecuación 1.57) y la media. Estos datos se compararon con los de mezclado perfecto y de 2 tanques en serie y se presentan en la tabla 10.3.

Tabla 10.3. Comparación de la varianza experimental con la varianza de los modelos de 1 y 2 tanques en serie.

L/D	τ_{exp} (min)	$\tau_{calculado}$ (min)	τ a partir del ajuste lineal (min)	σ^2_{exp} (min ²)	$\sigma^2_{Modelo N=1}$ (min ²)	$\sigma^2_{Modelo N=2}$ (min ²)
1.0	4.7795	4.8331	4.4791	15.22	16.12	10.78

Donde los diferentes tiempos de residencia se definen como:

Tiempo de residencia medio experimental (τ_{exp}):

$$*** \tau_{exp} = (\text{masa de sólidos retenidos} / \text{flujo másico de sólidos alimentados})$$

Tiempo de residencia medio calculado a partir de la distribución de tiempos de residencia ($\tau_{calculado}$):

$$*** \tau_{calculado} = \frac{\sum(C_i \cdot t_i \cdot \Delta t_i)}{\sum(C_i \cdot \Delta t_i)}$$

Tiempo de residencia medio a partir del ajuste lineal (τ a partir del ajuste lineal):

$$*** \tau \text{ a partir del ajuste lineal} = (\mathbf{Z/G}) \text{ que es un parámetro obtenido de la ecuación (1.59)}$$

A partir del cálculo de varianzas y del tiempo de residencia (media), se puede concluir que el patrón de flujo en este caso es mejor representado por el modelo de mezclado perfecto.

Para la relación, Altura del vertedero con respecto al Diámetro del secador ($L/D = 2.0$)

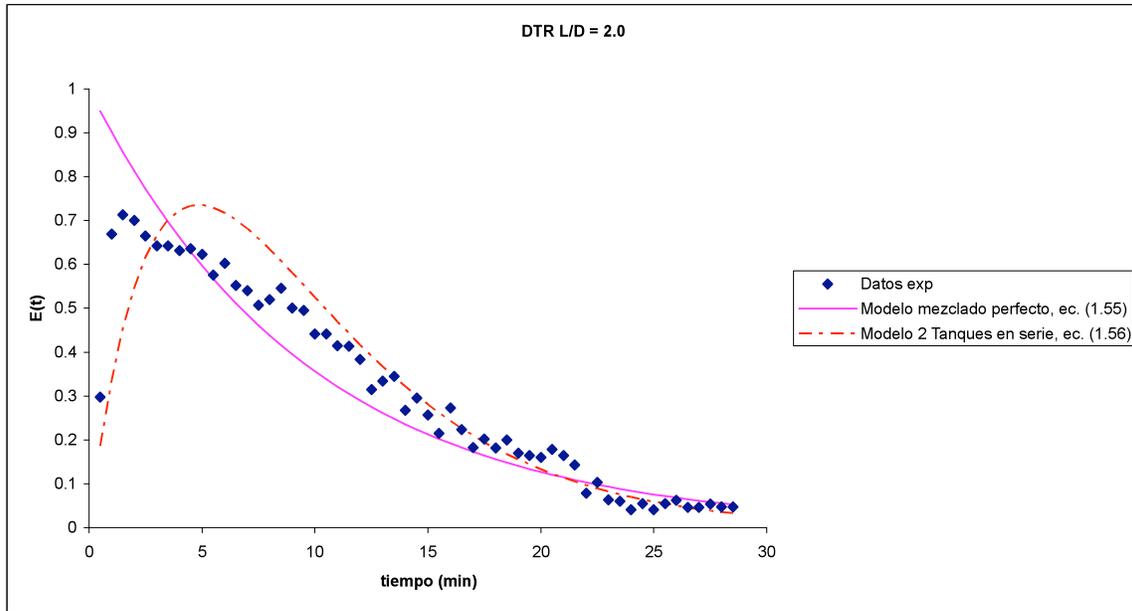


Figura 10.2 Comparación Datos Experimentales y modelo de 1 y 2 tanques en serie.

En este caso se observa que los datos experimentales podrían ajustarse al comportamiento de 2 tanques conectados en serie, aunque el comportamiento inicial de los datos puede deberse a la forma de inyección del trazador, el valor máximo de $E(t)$ es semejante al que se obtiene con el modelo de 2 tanques en serie. Para justificar el ajuste al modelo de 2 tanques en serie, se procedió a realizar el ajuste propuesto por Vanecek y col. (1966) y calcular la varianza para compararla con los de mezclado perfecto (1 Tanque) y la de 2 tanques en serie. En la tabla 10.4 se muestra una comparación de los tiempos de residencia calculados de distintas formas así como la varianza experimental y la de los modelos de 1 y 2 tanques en serie.

Tabla 10.4. Comparación de la varianza experimental con la varianza de los modelos de 1 y 2 tanques en serie.

L/D	τ_{exp} (min)	$\tau_{calculado}$ (min)	τ a partir del ajuste lineal (min)	σ^2_{exp} (min ²)	$\sigma^2_{Modelo N=1}$ (min ²)	$\sigma^2_{Modelo N=2}$ (min ²)
2.0	9.4925	9.57	8.958	32.165	24.235	29.405

Por lo tanto, a partir del cálculo de varianza (ecuación 1.57) para cada modelo y comparándola con la experimental, se concluye que el mejor ajuste es el modelo de 2 tanques en serie.

De lo anterior se puede concluir parcialmente lo siguiente:

Para $L/D = 1.0$ El mejor ajuste es de modelo de mezclado perfecto. Ecuación (1.55)

Para $L/D = 2.0$ El mejor ajuste es el modelo de dos tanques en serie. Ecuación (1.56)

El ajuste lineal propuesto por Vanecek y col. (1966) para los dos casos de estudio ($L/D = 1.0$ y 2.0) se presenta en el Apéndice A.

10.3 Cinéticas de secado por lotes. (Curvas de Secado adiabáticas)

En la figura 10.3 se muestran las cinéticas de secado obtenidas en la experimentación por lotes, se observa el efecto positivo del incremento de temperatura, ya que la mayor cantidad de humedad removida se obtuvo a la mayor temperatura de aire alimentado. La forma de la curva muestra que existen los dos periodos de velocidad de secado, el constante y el decreciente, el periodo constante se debe al exceso de humedad en los granos, mientras que el periodo decreciente es controlado por fenómenos difusionales dentro de las partículas. El secado de amaranto como el de muchos otros granos, está controlado por fenómenos difusivos.

Como en los tres experimentos se manejó la misma cantidad de masa de sólidos y la misma velocidad de aire, se puede observar que el tiempo en que se estabilizan las temperaturas es prácticamente el mismo. En el Apéndice D se muestran los registros experimentales. Estos experimentos se realizaron con una relación de $L/D = 1.5$

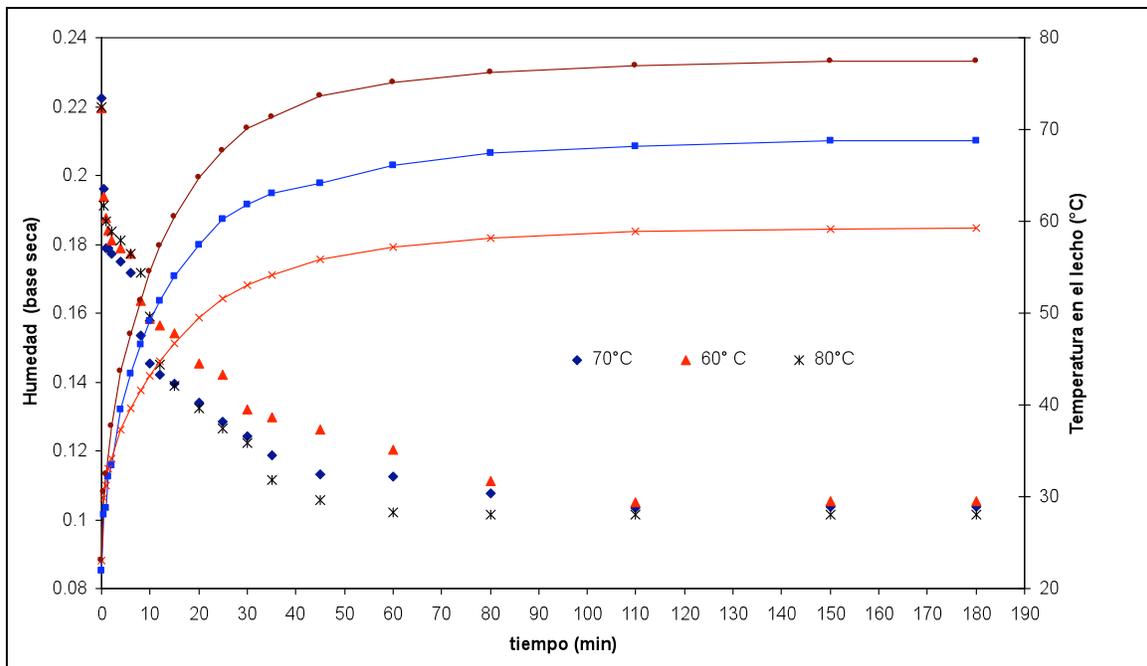


Figura 10.3- Curvas de secado adiabáticas de amaranto a diferentes temperaturas de alimentación del aire y perfiles de temperatura en el lecho fluidizado.

En la tabla 10.5 se muestran las condiciones de operación del sistema y la cantidad de humedad removida al final de cada experimento.

Tabla 10.5 Parámetros empleados en la experimentación por lotes y % de humedad removida en cada caso.

Masa de sólidos en el secador (kg)	Velocidad del aire (m/s)	T alimentación del aire (°C)	T máxima en el lecho (°C)	Humedad removida (b. s.)
0.600	2.8u _{mf}	60	59.1	0.1145
0.600	2.8u _{mf}	70	68.8	0.1187
0.600	2.8u _{mf}	80	77.5	0.1210

10.4 Operación del secador en continuo.

En las figuras 10.4 a 10.7 se presenta la humedad promedio a la salida del secador, obtenidas de la experimentación en continuo (los registros experimentales se anexan en el apéndice D).

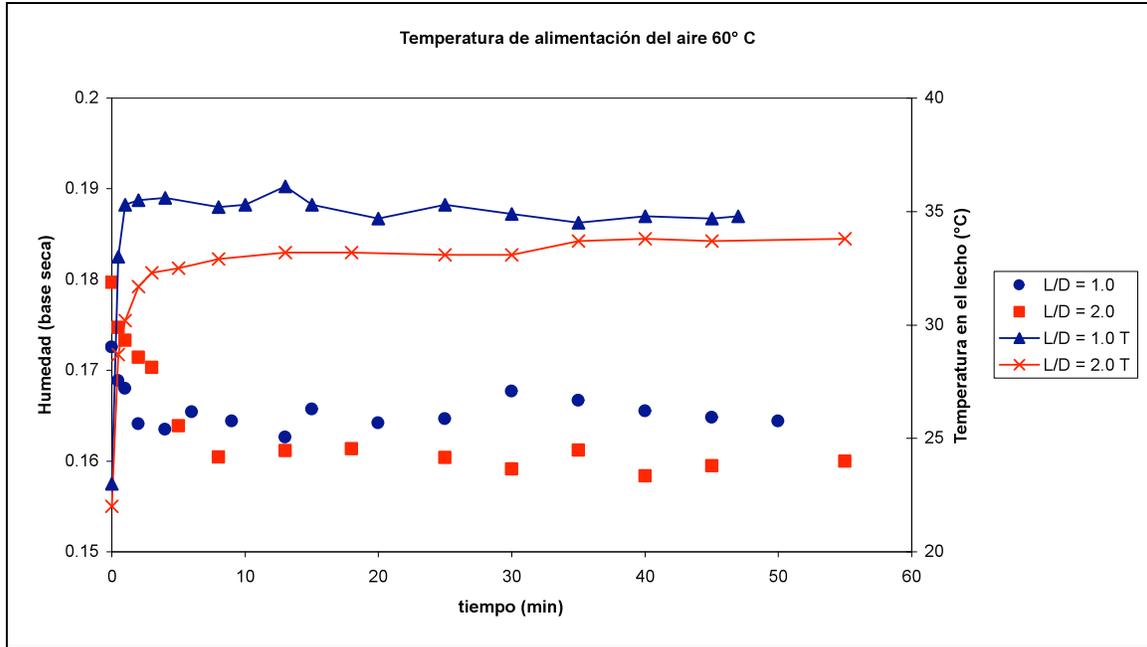


Figura 10.4. Humedad promedio del amaranto a la salida del secador y perfil de temperatura a la salida del lecho a diferentes relaciones L/D y 60 °C del aire alimentado.

En la figura 10.4 se observa que, para las condiciones de temperatura y L/D más bajas, el secado del amaranto es prácticamente nulo, mientras que para esa misma temperatura pero aumentando la relación L/D al doble (mayor tiempo de residencia), aumenta la remoción de humedad de las partículas.

En relación a la temperatura, a pesar de que el secador se encontraba completamente aislado, la temperatura en el lecho sólo alcanzó 34°C, esto se debe al choque térmico que se da en el secador debido a la temperatura de entrada del aire y la temperatura de los sólidos alimentados en contraflujo, ya que, esta última era muy baja, alrededor de 22°C.

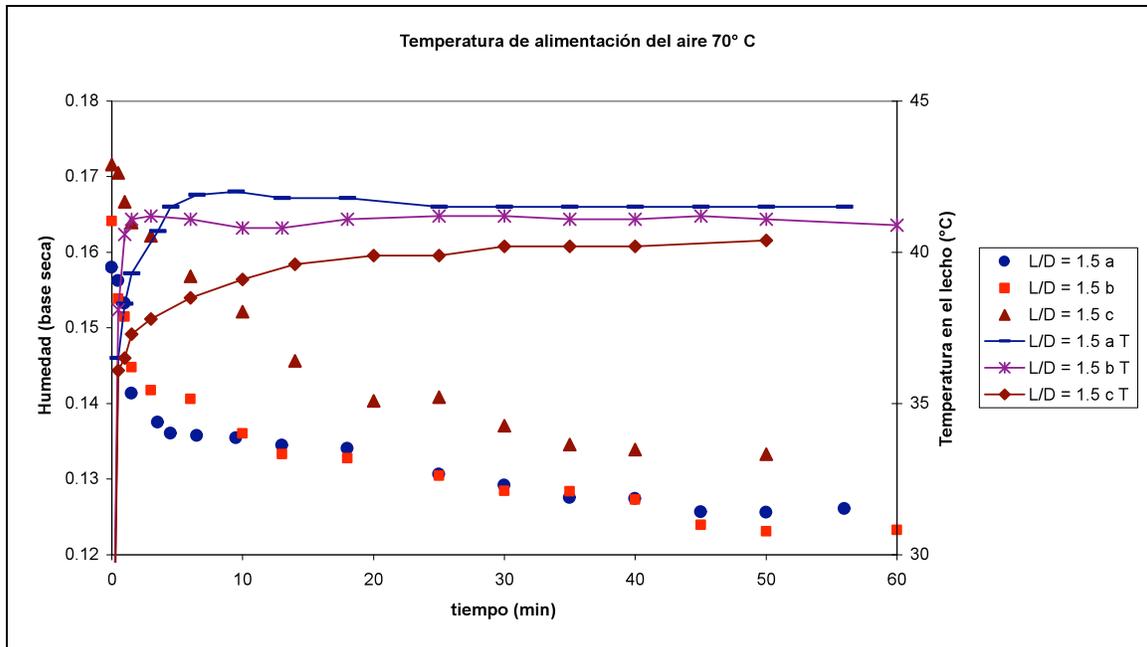


Figura 10.5. Humedad promedio del amaranto a la salida del secador y perfil de temperatura a la salida del lecho a la relación $L/D = 1.5$ y 70°C

La figura 10.5 muestra las repeticiones de la experimentación para el punto central ($L/D=1.5$ y $T_{\text{aire}}=70^{\circ}\text{C}$), se observa que al menos para dos de ellos los resultados son similares mientras que en el otro los resultados varían, principalmente debido a que la temperatura en el lecho disminuyó, observándose con esto una disminución en la humedad removida promedio. Esta disminución se puede deber a factores tales como variaciones en la temperatura de alimentación del aire (debido al desempeño del control de temperatura) o a variaciones en la humedad de los granos alimentados al lecho, ya que, estos provenían de diferentes lotes y en consecuencia su humedad inicial pudo haber variado.

En la figura 10.6, se observa que el incremento del tiempo de residencia para una misma temperatura de alimentación del aire se refleja en un aumento de la humedad removida, en este caso, la temperatura de alimentación de los sólidos provocó que la temperatura en el lecho alcanzara sólo 43.8°C .

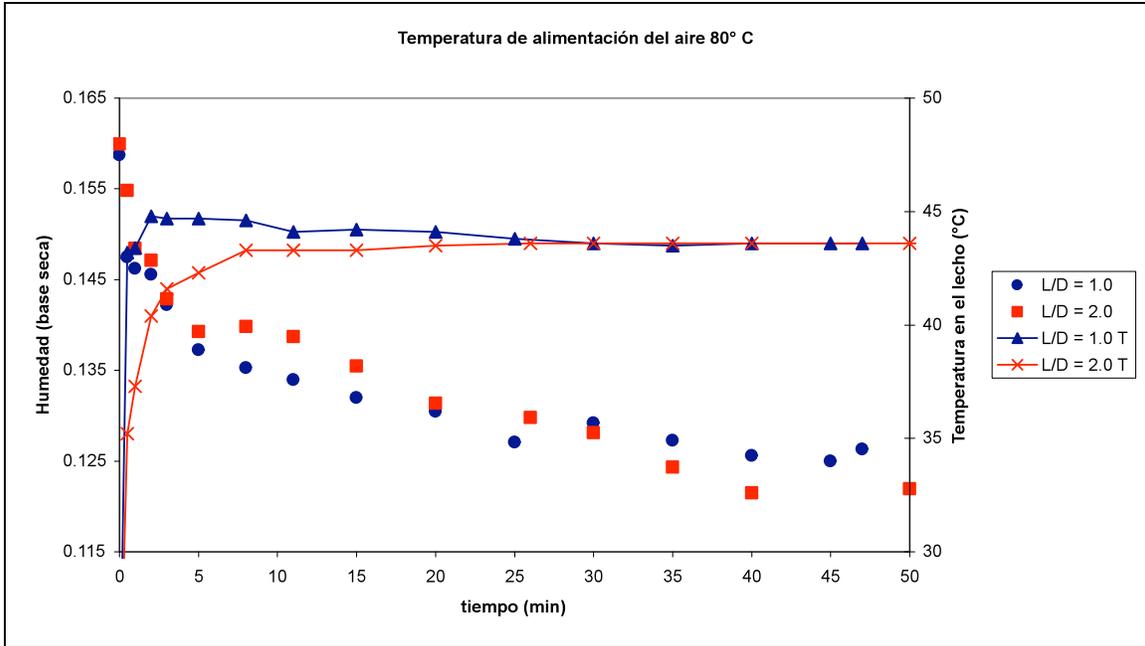


Figura 10.6 Humedad promedio del amaranto a la salida del secador y perfil de temperatura a la salida del lecho a diferentes relaciones L/D y 80 °C del aire alimentado.

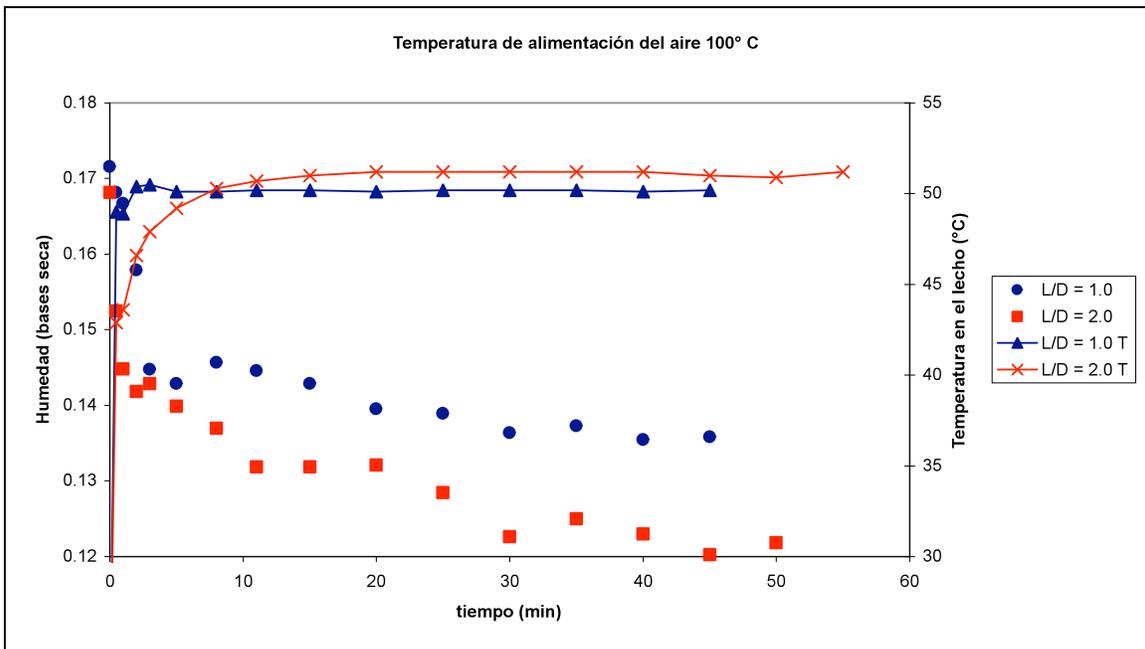


Figura 10.7. Humedad promedio del amaranto a la salida del secador y perfil de temperatura a la salida del lecho a diferentes relaciones L/D y 100 °C del aire alimentado.

En la figura 10.7 se muestran la humedad promedio de salida obtenida para la temperatura de alimentación del aire de 100°C , a pesar de esta temperatura del aire, se observa que la temperatura en el lecho apenas alcanza 51.2°C .

En todos los casos el aumento del tiempo de residencia se traduce en aumento en la humedad removida y la temperatura en el lecho se ve afectada fuertemente por la temperatura de alimentación de los sólidos. La diferencia en la forma de las curvas de temperatura en el lecho para una misma temperatura de alimentación de aire es debida a la cantidad de sólidos en el lecho, ya que, para una menor cantidad de sólidos en el lecho la temperatura de los sólidos se incrementa más rápido, mientras que al aumentar la masa de sólidos estos aumentan su temperatura más lentamente.

10.5 Resumen de resultados en la operación continua del secador.

En la tabla 10.6 se muestran la temperatura de alimentación del aire al secador, la temperatura máxima en el lecho y el tiempo aproximado en el que las partículas en el lecho se estabilizan térmicamente.

Tabla 10.6 Temperatura máxima en el lecho y tiempo de estabilización térmica.

L/D	T _{entrada} del aire (°C)	T _{máxima} en el lecho (°C)	Tiempo en que se estabiliza la temperatura del lecho (min)	Tiempo de residencia (min)
1.0	60	35.3	2	4.83
2.0	60	33.8	8	9.57
1.5	70	41.5	4.5	7.25
1.0	80	43.8	3	4.83
2.0	80	43.6	8	9.57
1.0	100	49.3	4.5	4.83
2.0	100	51.2	11	9.57

En la tabla 10.7 se muestra la humedad inicial y la humedad removida, así como el tiempo aproximado en el que el equipo empieza a operar en estado estacionario, es decir, el tiempo en el que la humedad promedio de salida del amaranto fue constante.

Tabla 10.7 Resultados de la operación continua, en función de la Humedad.

L/D	T _{entrada} del aire (°C)	Humedad inicial Ho (b.s)	Humedad Removida (b.s)	Tiempo aprox. en el que se alcanza el estado estacionario (min)	Tiempo de residencia (min)
1.0	60	0.1725	0.0074	13	4.83
2.0	60	0.1796	0.0202	18	9.57
1.5	70	0.1579	0.0395	25	7.25
1.0	80	0.1586	0.0331	20	4.83
2.0	80	0.1566	0.0366	35	9.57
1.0	100	0.1715	0.0359	30	4.83
2.0	100	0.1681	0.0475	40	9.57

El tiempo en el que se estabiliza el equipo térmicamente es más rápido que el tiempo en el que se obtiene una humedad constante en la salida del secador, esto puede obedecer a que los experimentos se inician con el equipo ya estabilizado térmicamente a la temperatura de alimentación del gas, es decir, las paredes del secador, la placa distribuidora e incluso los tubos de alimentación y descarga del grano al estar a la misma temperatura del gas, ayudan a que los granos aumenten de temperatura rápidamente hasta que finalmente se estabiliza. Aun así, como ya se mencionó, la temperatura en el lecho no alcanzó la temperatura de alimentación del gas, debido a la baja temperatura de alimentación de los granos de amaranto.

Respecto al contenido de humedad, el tiempo en el que se alcanza el estado estacionario es de 3 hasta 5 veces el tiempo de residencia. Y se obtiene más rápido para los casos en los que hay menos material en el lecho, es decir $L/D = 1.0$ y para temperaturas bajas.

En las figura 10.8 y 10.9, se presenta gráficamente el efecto que tienen la temperatura de alimentación del aire y el tiempo de residencia (a partir de la relación L/D), sobre la humedad removida.

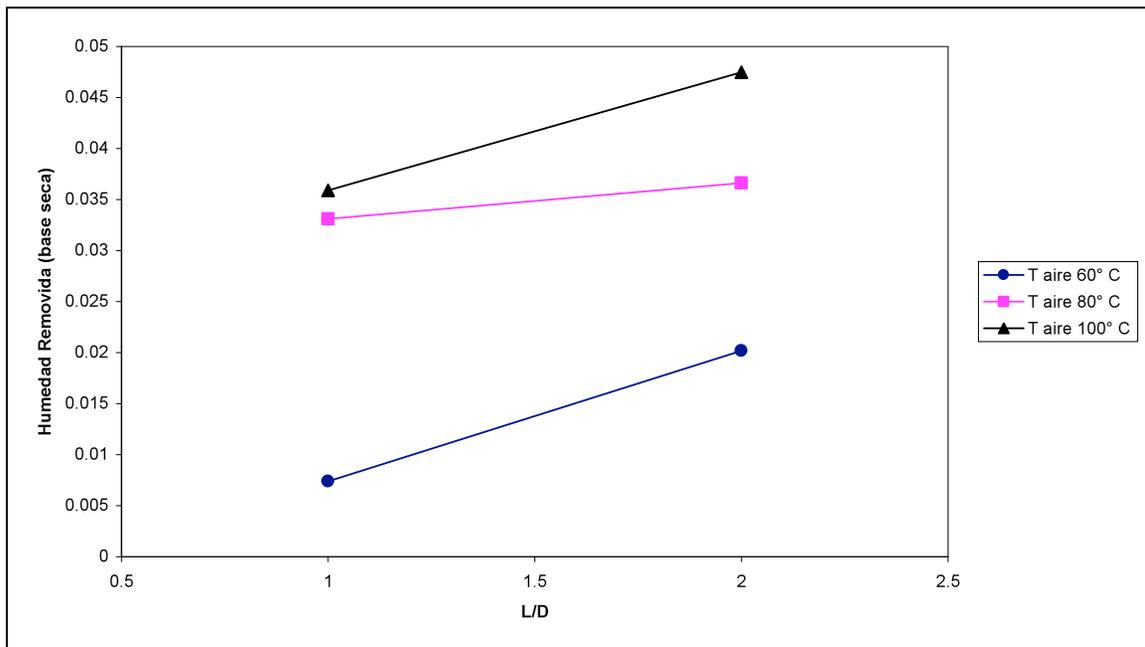


Figura 10.8 Comparación de la cantidad de humedad removida al sólido a diferentes L/D para cada temperatura de alimentación del aire.

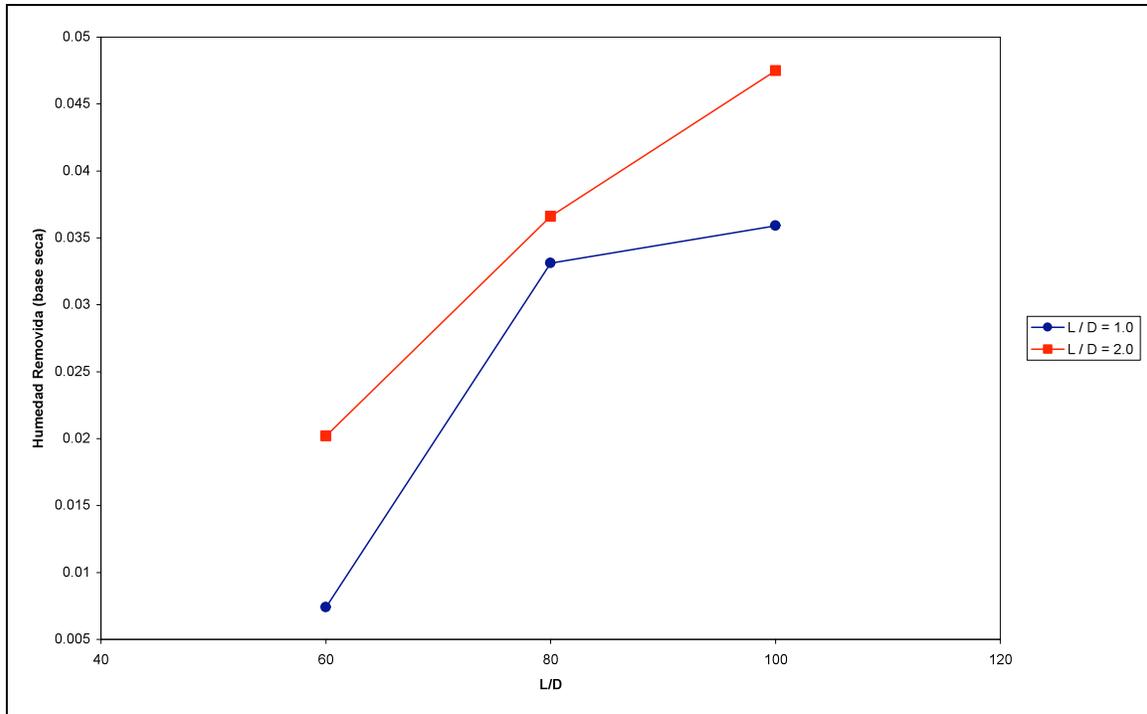


Figura 10.9 Comparación de la cantidad de humedad removida al sólido a diferentes temperaturas de alimentación del aire para cada L/D.

El efecto significativo de la temperatura es entre la temperatura de 60° C y las temperaturas de 70, 80 y 100° C, ya que en este caso la temperatura en el lecho alcanza diferencias de entre 10 y 16° C, mientras que la diferencia entre 70, 80 y 100° C se refleja en una diferencia en el lecho de sólo 6 o 7° C, por esto es que las humedades removidas entre 70, 80 y 100° C son tan cercanas y las diferencias de humedades (aunque pequeñas) son debidas a la diferencia en el tiempo de residencia de los sólidos en el lecho. En todos los casos se observa que la mayor cantidad de humedad removida es con $L/D = 2.0$. Sin embargo, el efecto de L/D para una misma temperatura de alimentación no alcanza a ser tan significativa como lo es la temperatura para una misma relación de L/D . Hay que hacer notar que este efecto positivo de la temperatura alcanza un limite, ya que, como se observó experimentalmente, aumentos de 20°C en la temperatura de alimentación del aire no necesariamente se traducen en aumentos de temperatura en el lecho, en este caso debido a la temperatura tan baja con la que se alimentaban los granos al lecho, haciendo que la mayor cantidad de energía se empleara en calentar los granos y a posibles deficiencias en el aislado del secador.

10.6 Comparación de la humedad promedio teórica y la humedad experimental en el secado en continuo.

A partir de la cinética de secado determinada en la operación por lotes y la determinación de la distribución de tiempos de residencia y aplicando la ecuación (1.50), se puede predecir la humedad promedio a la salida del secador en continuo operando a las condiciones del lecho en lotes de la siguiente manera:

$$M_{salteorico} = \int_0^{\infty} \bar{M}(t)E(t)dt \quad (10.1)$$

Donde:

$\bar{M}(t)$ es la función de secado obtenida de la experimentación por lotes.

$E(t)$ es la correspondiente función de Distribución de tiempos de residencia.

Como ejemplo, para las condiciones de $L/D = 1.0$ y Temperatura de alimentación del aire de 60°C se resuelve:

$$M_{saldateorico} = \int_0^{\infty} \left(0.07866 * \exp\left(-\frac{t}{14.22823}\right) + 0.11129 \right) \left(\frac{1}{\tau} * \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right) dt \quad (10.2)$$

Con $\tau = 4.83 \text{ min.}$

La ecuación 10.1 se resolvió para todos los casos de estudio mediante un programa en FORTRAN, el cual se anexa en el Apéndice E

Los ajustes matemáticos para cada una de las curvas experimentales, tanto para condiciones adiabáticas como para isotérmicas se presentan en el Apéndice B.

En la tabla 10.8 se presenta una comparación entre la humedad promedio a la salida del secador obtenida experimentalmente y la humedad teórica promedio, en este primer caso se emplearon las curvas de secado adiabáticas.

Tabla 10.8 Comparación humedad promedio a la salida del secador con Humedad teórica. Empleando curvas adiabáticas.

T _{aire entrada} (°C)	T _{lecho} (°C)	L/D	τ calculada (min)	M ₀ (b.s.)	M _{salida exp} (b.s.)	M _{salida teórico} (b.s.)	Error Relativo (%)
60	33.8	1.0	4.83	0.1725	0.1651	0.1696	-2.75
		2.0	9.57	0.1796	0.1595	0.1514	5.07
70	41.5	1.5	7.2	0.1579	0.1257	0.1467	-16.70
80	43.6	1.0	4.83	0.1586	0.1252	0.1496	-19.48
		2.0	9.57	0.1566	0.1206	0.1420	-17.35

El cálculo de la humedad de salida del secador a partir de las cinéticas por lotes y la DTR, presenta errores relativos altos, si consideramos que un error relativo $\leq 10\%$ es un resultado aceptable.

En el segundo caso se emplearon las curvas de secado isotérmicas, y los resultados se presentan en la tabla 10.9. (Los datos para obtener las curvas isotérmicas se anexan en el apéndice D)

Tabla 10.9 Comparación humedades, empleando curvas isotérmicas para el cálculo.

T _{aire entrada} (°C)	T _{LECHO} (°C)	L/D	τ calculada (min)	M ₀ (b.s.)	M _{salida exp} (b.s.)	M _{salida teórico} (b.s.)	Error Relativo (%)
60	33.8	1.0	4.83	0.1725	0.1651	0.1700	-2.96
		2.0	9.57	0.1796	0.1595	0.1551	2.75
70	41.5	1.5	7.2	0.1579	0.1257	0.1281	-1.90
80	43.6	1.0	4.83	0.1586	0.1252	0.1440	-15.01
		2.0	9.57	0.1566	0.1206	0.1220	-1.16

Cuando se emplean las curvas de secado adiabáticas, la humedad teórica en todos los casos es más alta que la experimental, al hacer el cálculo con las curvas isotérmicas la predicción mejora, ya que, con esto se supone que el secado se realiza a una mayor temperatura desde el inicio del experimento y por lo tanto las partículas tendrán un menor contenido de humedad.

Los errores son comparables con los obtenidos por Zahed y col. (1992) en los que obtuvo errores de hasta 15 % para el cálculo de la Humedad removida, calculada a partir de la predicción de humedad en la salida del secador.

Como en la mayoría de los estudios en los que se emplea la ecuación propuesta por Vanecek y col. (1966) para calcular la humedad promedio teórica de salida de un secador continuo se acepta de manera general que el lecho siempre opera en mezclado perfecto, se procedió a realizar el cálculo para todos los casos de estudio haciendo la suposición de mezclado perfecto. Los resultados se muestran en la tabla 10.10.

Tabla 10.10. Cálculo de la humedad teórica, suponiendo mezclado perfecto en todos los casos de estudio.

T _{aire entrada} (°C)	T _{LECHO} (°C)	L/D	τ calculada (min)	M _o (b.s.)	M _{salida exp} (b.s.)	M _{salida teórico} (b.s.)	Error Relativo (%)
60	33.8	1.0	4.83	0.1725	0.1651	0.1700	-2.96
		2.0	9.57	0.1796	0.1595	0.1583	0.75
70	41.5	1.5	7.2	0.1579	0.1257	0.1476	-17.42
80	43.6	1.0	4.83	0.1586	0.1252	0.1440	-15.01
		2.0	9.57	0.1566	0.1206	0.1448	-20.06

Los resultados muestran que la suposición de mezclado perfecto, no siempre es adecuada, ya que, de manera general, el error relativo aumenta y el cálculo de la humedad teórica se queda muy por encima de la humedad obtenida experimentalmente.

Estos resultados concuerdan con lo reportado por Zahed y col (1992), ya que al hacer el cálculo de humedad teórica suponiendo mezclado perfecto obtuvo errores relativos de hasta 15 %, mientras que al hacer uso de una DTR obtenida experimentalmente, (en la que no había mezclado perfecto) los errores relativos fueron de entre 7 y 12 %.

10.7 Análisis del Diseño Factorial.

En la tabla 10.11, se presentan los valores de las variables codificadas junto con el plan de experimentación y el valor de la variable de respuesta para cada experimento, con estos datos se obtienen los parámetros del modelo lineal que se está probando.

Tabla 10.11- Matriz de experimentos del diseño 2² con repeticiones en el centro, plan de experimentos y respuestas medidas.

N° Exp	Matriz de Experimentos		Plan de Experimentación		Respuesta	
	x1	x2	L/D (-)	T aire (°C)	Humedad de salida promedio (b.s)	
1	-	-	1.0	60	0.1651 (y1)	Puntos factoriales (y _F)
2	+	-	2.0	60	0.1595 (y2)	
3	-	+	1.0	80	0.1252 (y3)	
4	+	+	2.0	80	0.1203 (y4)	
5	0	0	1.5	70	0.1257 (y5)	Puntos centrales (y _C)
6	0	0	1.5	70	0.1234 (y6)	
7	0	0	1.5	70	0.1250 (y7)	

A partir de las ecuaciones C.3. a C.5., se procede a calcular los efectos o parámetros del modelo.

Tabla 10.12 Cálculo de los efectos

Efecto	Coficiente	Valor
Promedio	β_0	0.1349
L/D	β_1	-0.0026
T	β_2	-0.0197
L/D x T	β_{12}	$1.75 \cdot 10^{-04}$

A partir de esto, el modelo lineal queda como:

$$y = 0.1349 - 0.0026 * x1 - 0.0197 * x2 + 0.000175 * x1 * x2 \quad (10.3)$$

Cálculo del error experimental.

A partir de los puntos centrales se calcula el error experimental de la siguiente manera.

Tabla 10.13.- Determinación del error experimental.

N° Exp	H salida (y)	y _{promedio}	s _e ²	s _e
5	0.1257	0.1247	1.39x10 ⁻⁰⁶	0.0011
6	0.1234			
7	0.1250			

A continuación es necesario saber cual de los coeficientes del modelo son realmente significativos, esto se realiza mediante el análisis de varianza para diferentes niveles de significancia (10, 5 y 2.5 % respectivamente). En la tabla 10.14 se señalan (mediante puntos negros) los efectos que son significativos para cada análisis de confianza.

Tabla 10.14.- Análisis de varianza y prueba de significancia.

	Varianza muestral	Media de cuadrados	F ₀	F ₀	F ₀
Coefficiente	s ²	s ² /s _e ²	F(1,2) _{0.10} (8.526)	F(1,2) _{0.05} (18.513)	F(1,2) _{0.025} (38.506)
β ₁	1.16x10 ⁻⁰³	19.83	•	•	--
β ₂	4.98x10 ⁻⁰³	1125.32	•	•	•
β ₁₂	1.52x10 ⁻⁰²	0.088	--	--	--

Por lo tanto del análisis anterior se concluye que los efectos de L/D y T son significativos para este caso de estudio y para los porcentajes de confianza elegidos.

El modelo para F(1,2)_{0.10} y F(1,2)_{0.05} en sus variables reales queda expresado como:

$$H_{\text{sal}} = 0.1349 - 0.00262 * \left(\frac{L/D - 1.5}{0.5} \right) - 0.01977 * \left(\frac{T - 70}{10} \right) \quad (10.4)$$

Mientras que para $F(1,2)_{0.05}$:

$$H_{\text{sal}} = 0.1349 - 0.01977 * \left(\frac{T - 70}{10} \right) \quad (10.5)$$

Reduciendo términos, la ecuación (10.4) queda como:

$$H_{\text{sal}} = 0.2806 - 5.24 \times 10^{-03} * \left(\frac{L}{D} \right) - 1.97 \times 10^{-03} * (T) \quad (10.6)$$

Y la ecuación (10.5) se expresa mediante:

$$H_{\text{sal}} = 0.2728 - 1.97 \times 10^{-03} * (T) \quad (10.7)$$

Para los niveles de confianza de 0.9 y 0.95 los efectos de la relación L/D y la temperatura de alimentación del aire son significativos, siendo el modelo el representado por la ecuación (10.6), mientras que para un nivel de confianza de 0.975 sólo el efecto de la temperatura es significativo, el modelo se presenta mediante la ecuación (10.7).

Estos resultados se pueden corroborar con lo obtenido experimentalmente, ya que, como se explicó en el análisis de la figura 10.8, el efecto de la temperatura sobre la humedad removida y por ende en la humedad de salida del secador en el estado estacionario, es el más significativo.

El uso del modelo con los dos efectos, produce errores relativos de entre 5 y 7 %, mientras que el representado por un solo efecto significativo, presenta errores relativos de entre 4 y 6 %

11. CONCLUSIONES

Se obtuvieron las funciones de DTR para diferentes relaciones L/D y cinéticas de secado por lotes y en continuo, se modeló el fenómeno a partir de un modelo de regresión considerando efectos lineales y de interacción concluyendo que ambos efectos contribuyen a la remoción de humedad. Siendo el efecto más significativo, la temperatura de alimentación del aire.

La predicción de humedad promedio en estado estacionario a la salida del secador continuo a partir de cinéticas de secado por lotes y DTR produce errores significativos pero comparables con los reportados en la literatura. Se observó que la operación por lotes es más eficaz en cuanto a remoción de humedad que la operación en continuo y en el caso de la operación en continuo, la operación con más tiempo de residencia es la más efectiva para cada temperatura de entrada del aire.

A partir de las mediciones de temperatura en el lecho y la temperatura en el aire de salida, se puede ratificar que para los efectos de cálculo y solución de modelos, asumir que el lecho y el aire de salida están en equilibrio térmico, es una buena suposición.

Las DTR mostraron que la operación del secador fluidizado es modelado de diferente forma, según la relación L/D con que se opere. Para la relación $L/D = 1$, se comporta como un mezclado perfecto, sin embargo para $L/D = 2$ el comportamiento es más similar al de 2 tanques en serie. Es decir, aceptar que el lecho siempre está en mezclado perfecto es una buena aproximación pero no es general y puede no representar el verdadero patrón de flujo en el lecho.

A partir de los experimentos realizados en una etapa se puede predecir el comportamiento de un secador multietapas y con esto determinar el número de etapas necesarias para obtener la humedad deseada en el producto.

Como la temperatura de alimentación del aire no es necesariamente la que alcanza el lecho, puede operarse a temperaturas de entre 70 y 80 °C y con el fin de alcanzar humedades promedio más bajas optar por incrementar el tiempo de residencia, mediante el aumento de etapas en el secador. Así, la etapa inicial podría servir como precalentador del grano con el objetivo de que en una etapa sucesiva menos energía se ocupe para calentar el grano.

Si bien la humedad removida en la operación por lotes es considerablemente mayor que la removida en la operación continua, la humedad promedio a la salida del secador continuo, permite un almacenamiento seguro de los granos.

Aunque el secado por lotes ofrece una mayor cantidad de humedad removida, pueden existir ciertas restricciones en su uso, ya que, al permanecer los granos por un periodo largo de tiempo en el secador, la temperatura de los mismos puede elevarse de forma considerable, causando posibles daños en la calidad del producto. El inconveniente de la operación por lotes del secador es que la cantidad de material que se puede secar es considerablemente menor que en la operación continua del mismo.

Tanto la temperatura como el tiempo de residencia son factores que favorecen la remoción de humedad, sin embargo, los límites para estos deben ser tales, que no dañen los valores nutricionales y físicos del grano a secar.

NOMENCLATURA

A	Área expuesta al secado, perpendicular al flujo de aire (m^2)
C_i	Concentración del trazador al tiempo t_i
D	Diámetro interno del secador. (m)
D_m	Coefficiente de difusión de humedad (m^2/s)
D₀	Constante de ajuste en la ecuación de Arrhenius (m^2/s)
d_s	Diámetro de una esfera con el mismo volumen de la partícula. (m)
d_e	Diámetro efectivo (m)
d_s	Diámetro de una esfera con el mismo volumen de la partícula. (m)
dN_i(τ)	Número de partículas por unidad de masa del lecho que han permanecido en la etapa i entre τ y $d\tau$
E₀	Energía de activación para difusión de la humedad
E_{θ}	Distribución de tiempos de residencia.
g	Aceleración de la gravedad (m/s^2)
G	Flujo masico de sólidos alimentados al secador. (kg)
h	Coefficiente de transferencia de calor ($J/m^2s K$)
k_y	Coefficiente de transferencia de masa (kg/m^2s)
l	Distancia perpendicular a la dirección transversal.
L	Longitud del vertedero del secador (m)
m	Masa de trazador. (kg)
m_{in}	Masa inicial de granos húmedos. (g)
m_f	Masa final de granos después del secado en estufa. (g)
M	Humedad en la ecuación de difusión.
M_A	Masa molecular del agua
M_B	Masa molecular del aire.
n_i(τ)	Densidad de población de partículas que han permanecido un tiempo τ en la etapa i
n₀	Densidad de partículas frescas introducidas al secador.
n^t	Densidad de población de partículas total.
n_v	Flux masico de vapor de agua de la superficie hacia el aire (kg/m^2s)

n_C	Numero de puntos centrales
n_F	Numero de puntos factoriales
P	Presión de operación (Pa)
p_v	Presión de vapor del agua (Pa)
p_i	Presión parcial del agua en el aire de entrada al secador (Pa)
q	Flujo de calor (J/s)
Q_s	Flujo de sólidos alimentados al secador. (g/s)
R_c	Velocidad de secado (kg agua/s)
R_v	Constante de los gases entre el peso molecular de vapor de agua.(J/kg K)
R	Constante universal de los gases (J/kg-mol K)
R_p	Radio de partícula (m)
s_e^2	Varianza del error
s_e	Desviación estándar del error
s^2	Varianza muestral
T	Temperatura del lecho/del grano (K o °C)
T_S	Temperatura en el secador. Ecs (1) y (4)
T_w	Temperatura de bulbo húmedo. Ecs (1) y (4)
t	Tiempo (s o min)
u_{mf}	Velocidad mínima de fluidización (m/s)
$V_{p,s}$	Volumen de la partícula (m ³)
V_i	Variable (L/D o T)
V_-	Valor mínimo de la variable.
V_+	Valor máximo de la variable
W_i	Masa de sólidos retenidos en la etapa i (kg)
$\dot{X}(\tau)$ o $M(\tau)$	Humedad predicha en la operación continua del secador (b.s)
$\bar{X}(\tau)$	Cinética de secado obtenida en la experimentación por lotes (b.s)
x_s	Fracción volumen de la muestra determinada a partir del lecho fijo.
x_i	Variable i codificada
x_j	Variable j codificada
X o M	Contenido de humedad final de la muestra (b.s)

y	Variable de respuesta
$\overline{y_C}$	Promedio de las respuestas de los puntos centrales
$\overline{y_F}$	Promedio de las respuestas en los puntos factoriales
Y_w	Humedad absoluta a condiciones de saturación
Y_s	Humedad absoluta en el aire en el secador
Z	Masa de sólidos retenidos en el secador (kg)

Símbolos Griegos.

$\alpha_{12\dots i-1,i}$	Fracción de densidad de partículas que han permanecido τ_1 en la 1er etapa, τ_2 en la segunda, ..., τ_{i-1} en la i-1 etapa y las que han permanecido τ_i en la etapa i.
β_j	Efecto de la variable j
β_{ij}	Efecto de la interacción de la variable i con j
β_0	Promedio de las n respuestas
ε	Error
ε_{mf}	Fracción de espacios vacíos a las condiciones mínimas de fluidización. (-)
η	Número de partículas introducidas al secador por unidad de tiempo.
θ	Tiempo adimensional (t/τ)
λ_w	Calor latente de vaporización a T_w (J/kg)
μ	Viscosidad del gas. (kg/ms)
ρ_B	Densidad empacada (kg/m^3)
ρ_g	Densidad del gas. (kg/m^3)
$\rho_{s,p}$	Densidad del sólido o de las partículas. (kg/m^3)
τ	Tiempo de residencia promedio (s o min)
$\bar{\tau}_i$	Tiempo de residencia promedio en la etapa i
φ	Factor de resistencia a la difusividad (-)
ϕ_s	Esfericidad de la partícula. (-)
i,j,k	Contadores.

BIBLIOGRAFIA

Abdel-Jabbar N. M., Rami, Jumah. *Dynamic Analysis of Continuous Well-Mixed fluidized/Spouted Bed dryers*. *Drying Technology*, 2002, 20(1), 37-54

Baker C.G. J, *Predicting the Energy Consumption of Continuous Well Mixed Fluidized Bed Dryers from Drying Kinetic Data*, *Drying Technology*, 1991, 17(7&8), 1533-1555

Baléo J-N, Le Cloirec P., *Validating a Prediction Method of Mean Residence Time Spatial Distributions*, *AIChE Journal*, 2000, Vol 46, No. 4

Caballero, F.V. *Secado de Amaranto: Simulación y Modelado en Lechos Fluidizados*
Tesis de Maestría en Ingeniería Química UAM-I, 1999

Chandran A.N., Subba R.S., Varma Y.B.G., *Fluidized Bed Drying of Solids*, *AIChE Journal*, 1990, Vol 36, 29-38

Crank J. *The Mathematics of Difusión*, 2nd Ed. Oxford Univ. Press, Oxford. 1975

Danckwerts P.V., *Continuous Flow Systems: Distribution of Residence Times*, *Chemical Engineering Science*. 1953, 2, 1-9

Ergun S. *Fluid Flow Through Packed Columns* *Chemical Engineering Progress*, 1952, Vol 48, No. 2.

Ferré J., *Técnicas de Laboratorio*, ISSN 0371-5728, N° 287, 2003

Fyhr C., Kemp I. C., *Mathematical modeling of batch and continuous well-mixed fluidized bed dryers*, *Chemical Engineering and Processing*, 1999, 38.

Geldart D., *Types of Gas Fluidization*, *Powder Technology*, 1973, 19(7), 285-294.

Kannan C., Thomas P.P., Y.G. Varma. *Drying of Solids in Fluidized beds*, Ind. Eng. Chem. Res. 1995, 34, 3068-3077.

Kunni D., Levenspiel O., *Fluidization Engineering*, Second Edition, 1991, Butterworth Heinsmann

Lema A.I., Pontin M.I., *Análisis del efecto de variables de diseño en el comportamiento de una secadora de granos de amaranto*. Información Tecnológica, 2005, Vol 16 No. 5, 43-48

Levespiel O., *Ingeniería de las Reacciones Químicas*, Segunda Edición, 2002, Reverté

Marreto R. N., Peixoto M. P. G., Tacon, L. A., Freitas L. A. P. , *Paste Residence Time in a Spouted Bed Dryer. I: The Stimulus-Response Methodology*, Drying Technology, 2007, 25(5), 821 – 830

Mathur, K.B., P.E. Gishler, *Wheat Drying Using the Spouted-Bed Technique*, unnumbered National Research Council of Canada Report, Ottawa, Ont. ,1953.

Mazza M. G. G., Brandão, L. E. B. and Wildhagen G. S., *Characterization of the Residence Time Distribution in Spray Dryers*, Drying Technology, 2003, 21(3), 525 – 538

McCabe W.L, Smith J.C., Harriott P. *Operaciones Unitarias en Ingeniería Química*, Cuarta Edición, Mc Graw Hill, 1998

McKenzie, K.A. Bahu, R.E., *Material Model for Fluidized Bed Drying*, Drying 91, 1991, Ed. Mujumdar, A.S., Filková, I., Elsevier Science Publ., Amsterdam, 130-141

Montgomery D. C., *Diseño y Análisis de Experimentos*, Segunda Edición, 2007 Limusa S.A. de C.V.

Reay D., Baker C.G. J., *Drying In Fluidization*, 1985, Academic Press: London, 529-562

Renauld M., Thibault J., Alvarez P.I., *Influence of solids moisture content on the average residence time in a rotatory dryer*, *Drying Technology*, 2001, 19(9),2131-2150

Reyes A., Castro H., *Residence Time Distribution in a Fluidized Bed Dryer*, 14th International Drying Symposium Sao Paolo, Brazil, 22-25 August 2004

Rodriguez J.C. *Calidad en el almacenamiento de granos* 1^{er} Jornada de trigo de la Región Centro, 2005. EEA Balcarce, INTA

Tosi.E,A; Re.E.D. *Amaranth Grain Drying in a Fluidized Bed*. *Drying Technology*, 1999, 17 (4 & 5), 909-914

Treybal Robert E., *Operaciones de Transferencia de Masa*, Segunda Edición. Mc Graw-Hill 1988

Vanecek V., Markvart M., Drbohlav R., *Fluidized Bed Drying*, 1966, Leonard Hill, London.

www.amaranto.org.mx

Zahed A. H., Epstein N.. *Batch and Continuous Spouted Bed Drying of Cereal Grains. The Thermal Equilibrium Model*. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 1992, Vol 70, 945-953,

Zahed A.H., Zhu J.H, Grace J.R.. *Modelling and Simulation of Batch and Continuous Fluidized bed Dryers*. *Drying Technology*, 1995, 13, (1&2), 1-28

APENDICE A

Ajuste de los datos experimentales de DTR al Modelo de mezclado perfecto.

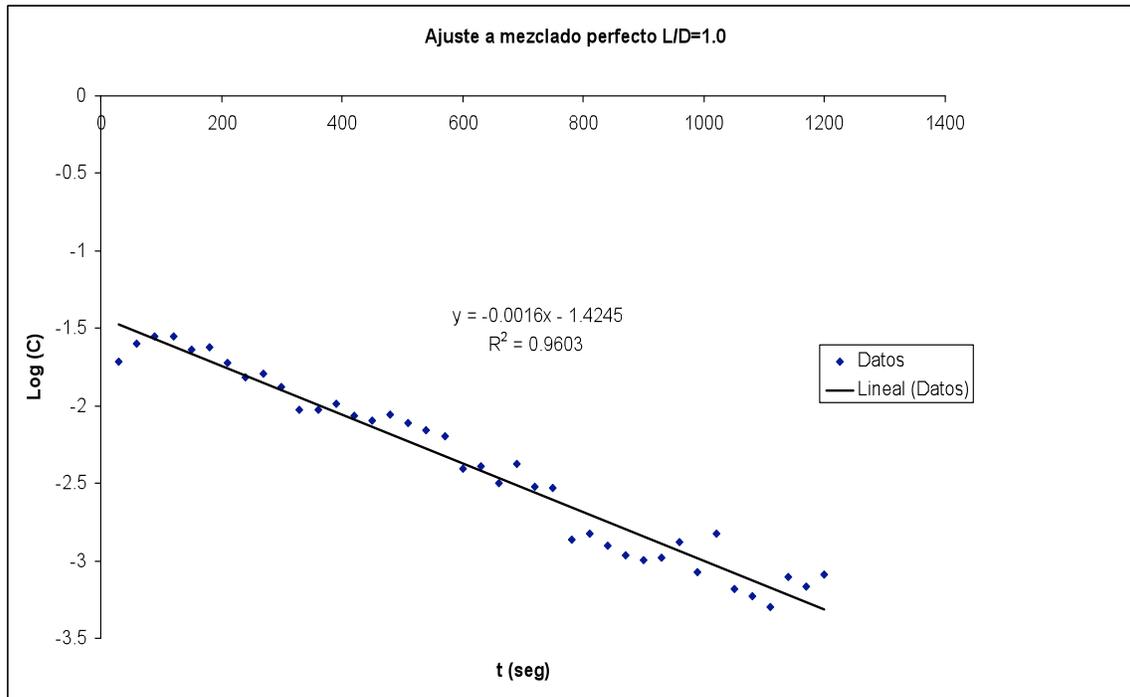


Figura A.1

A partir del ajuste se obtiene la siguiente ecuación

$\log(C(t)) = -0.0016t - 1.4245$ en la que:

$\log(m/Z) = -1.4245$ entonces $m/Z = 0.03762$

$-0.0016 = -0.43(G/Z)$ entonces $G/Z = 0.00372 \text{ seg}^{-1}$

Entonces el tiempo de residencia medio a partir del ajuste lineal es $\tau = 4.4791 \text{ min}$

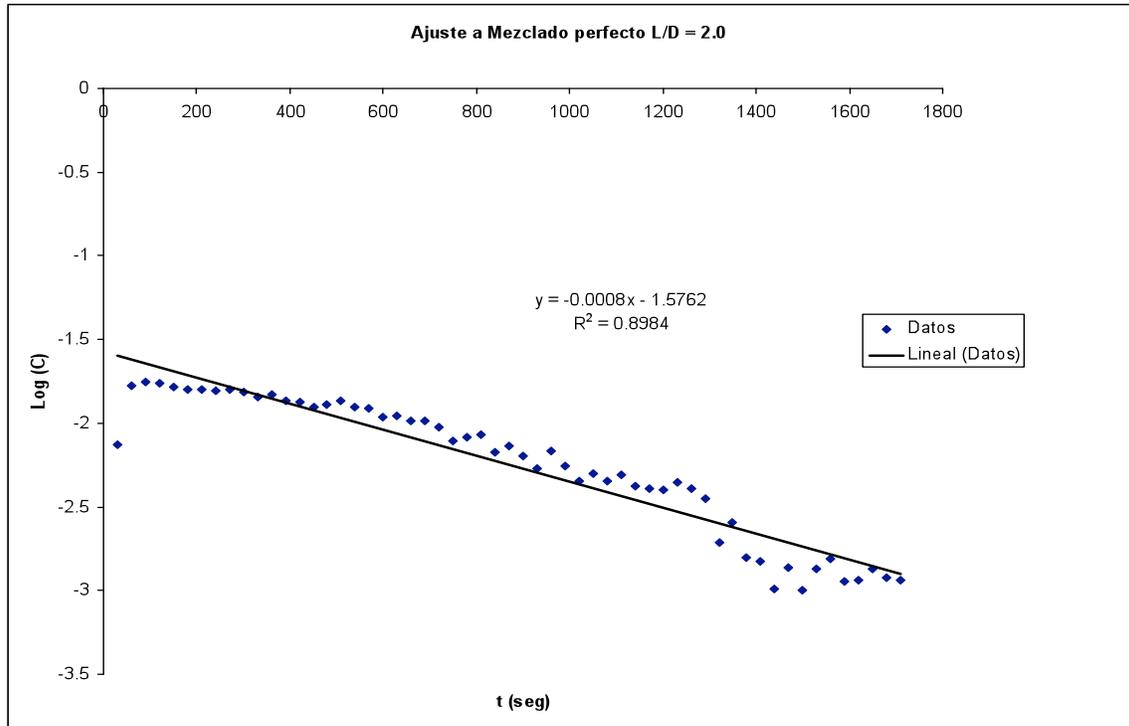


Figura A.2

A partir del ajuste se obtiene la siguiente ecuación

$\log(C(t)) = -0.0008t - 1.5762$ en la que:

$\log(m/Z) = -1.5762$ entonces $m/Z = 0.02653$

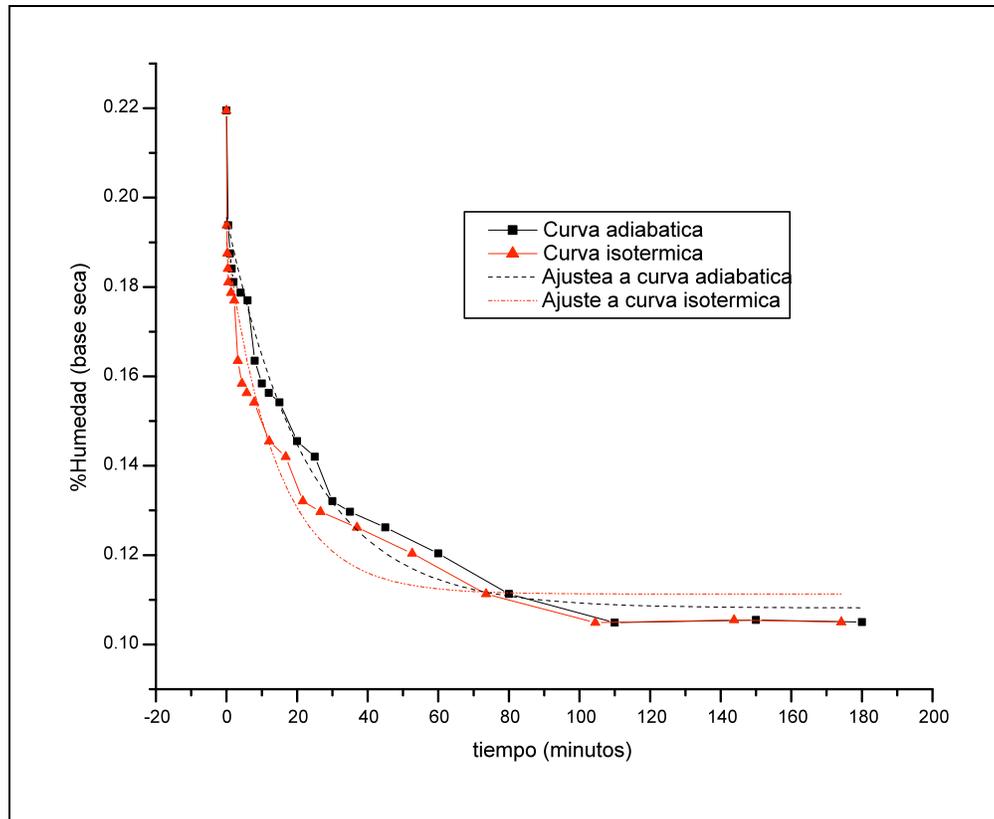
$-0.0008 = -0.43(G/Z)$ entonces $G/Z = 0.001860 \text{ seg}^{-1}$

Entonces el tiempo de residencia medio a partir del ajuste lineal es $\tau = 8.9583 \text{ min}$

APENDICE B

Ajustes de las cinéticas de secado por lotes.

Para la Temperatura de alimentación del aire de 60°C



Para la curva adiabática de secado.

$$M(t) = 0.08727 * \exp(-t / 22.8517) + 0.10834$$

$$R^2 = 0.9539$$

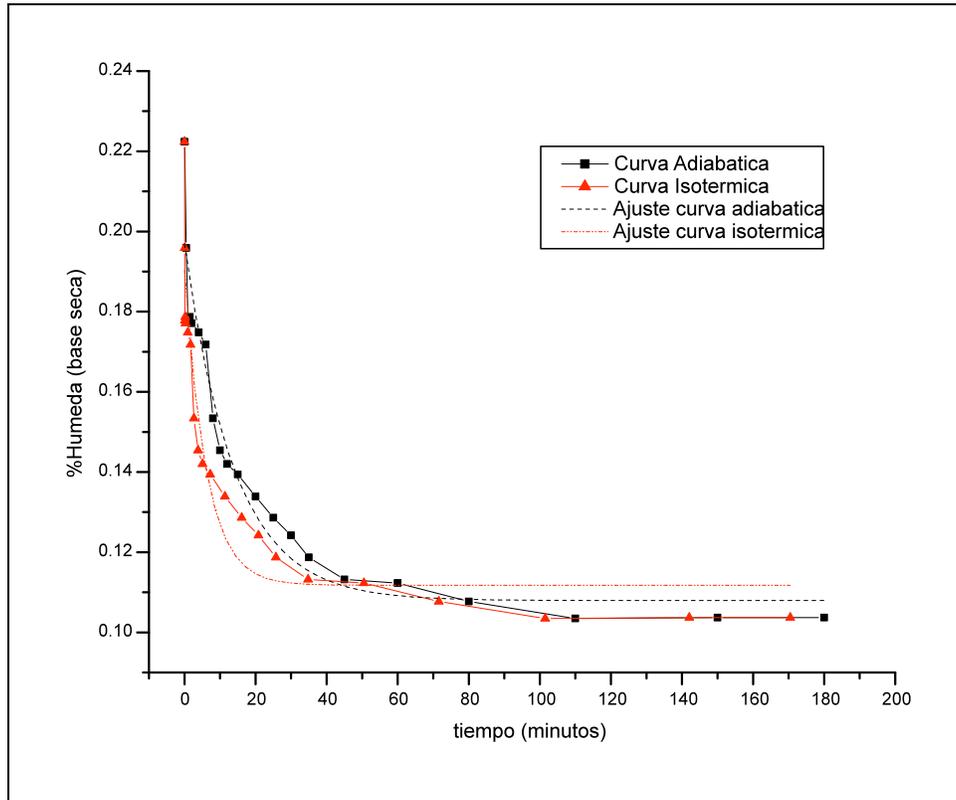
Para la curva isotérmica de secado.

$$M(t) = 0.07866 * \exp(-t / 14.2282) + 0.11129$$

$$R^2 = 0.9271$$

Donde t = tiempo en minutos.

Para Temperatura de alimentación del aire de 70°C



Para la curva adiabática de secado.

$$M(t) = 0.08899 * \exp(-t / 14.0215) + 0.1079$$

$$R^2 = 0.9471$$

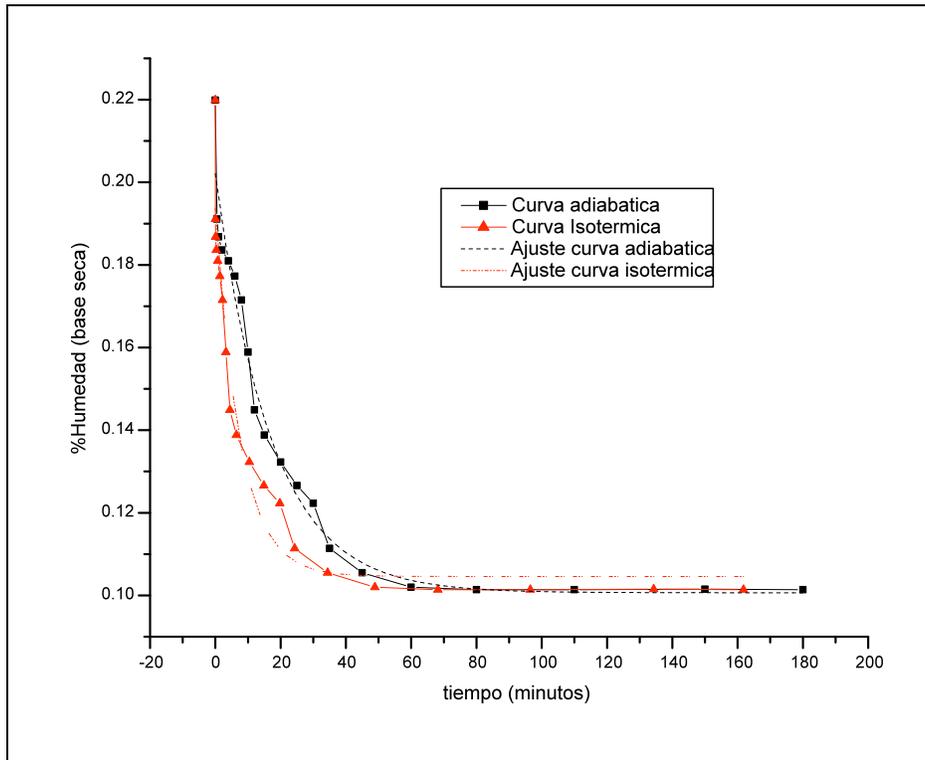
Para la curva isotérmica de secado.

$$M(t) = 0.07853 * \exp(-t / 6.04851) + 0.11176$$

$$R^2 = 0.9103$$

Donde t = tiempo en minutos.

Para Temperatura de alimentación del aire de 80°C



Para la curva de secado adiabática.

$$M(t) = 0.10144 * \exp(-t / 17.0472) + 0.10072$$

$$R^2 = 0.97423$$

Para la curva de secado isotérmica.

$$M(t) = 0.08919 * \exp(-t / 7.66348) + 0.10459$$

$$R^2 = 0.9103$$

Donde t = tiempo en minutos.

APENDICE C

Diseño Factorial 2^2 con repeticiones en un punto central.

El método consiste en agregar **puntos centrales** en el diseño 2^k . Estos consisten en n replicas que se corren en los puntos $x_i = 0$ ($i = 1, 2, \dots, k$).

Sea \bar{y}_F el promedio de las cuatro corridas en los cuatro puntos factoriales y sea \bar{y}_C el promedio de las n_C corridas en el punto central. Si la diferencia $\bar{y}_F - \bar{y}_C$ es pequeña, entonces los puntos centrales caen en el plano (o cerca de él) que pasa por los puntos factoriales y no hay curvatura cuadrática, es decir puede ser modelada por la ecuación:

$$\mathbf{y} = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j \mathbf{x}_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} \mathbf{x}_i \mathbf{x}_j + \varepsilon \quad (\text{C.1})$$

Por otra parte, si $\bar{y}_F - \bar{y}_C$ es grande, entonces está presente una curvatura cuadrática y entonces se modelara mediante la ecuación:

$$\mathbf{y} = \beta_0 + \sum_{j=1}^k \beta_j \mathbf{x}_j + \sum_{i < j} \beta_{ij} \mathbf{x}_i \mathbf{x}_j + \sum_{j=1}^k \beta_{jj} \mathbf{x}_j^2 + \varepsilon \quad (\text{C.2})$$

Donde los coeficientes se calculan mediante las ecuaciones:

$$\beta_0 = \frac{1}{n_F + n_C} \sum_{i=1}^{n_T} \mathbf{y}_i \quad (\text{C.3})$$

$$\beta_i = \frac{1}{n_F} \sum_{j=1}^{n_F} \mathbf{x}_{ji} \mathbf{y}_j \quad (\text{C.4})$$

$$\beta_{ij} = \frac{1}{n_F} \sum_{k=1}^{n_F} \mathbf{x}_{ki} \mathbf{x}_{kj} \mathbf{y}_k \quad \text{con } i < j \quad (\text{C.5})$$

La varianza del error se calcula a partir de los puntos centrales de acuerdo a la siguiente formula:

$$\mathbf{s}_e^2 = \frac{\sum_{\text{puntoscentrales}} (\mathbf{y}_i - \overline{\mathbf{y}_c})^2}{n_c - 1} \quad (\text{C.6.})$$

Y la varianza muestral se calculó mediante la ecuación:

$$\mathbf{s}_i^2 = n_F \beta_i^2 \quad (\text{C.7.})$$

$$\mathbf{s}_{ij}^2 = n_F \beta_{ij}^2 \quad (\text{C.8.})$$

Y finalmente la media de cuadrados se obtiene de la relación entre varianzas, es decir:

$$\text{Media de cuadrados} = \frac{\mathbf{s}^2}{\mathbf{s}_e^2} \quad (\text{C.9})$$

APENDICE D

Datos de la función de tiempos de residencia, obtenidos en la operación continua del secador empleando la relación $L/D = 1.0$

Tabla D.1 Registros experimentales para DTR con $L/D=1.0$

$L/D = 1.0$

t (min)	E(t)	t (min)	E(t)
0.5	0.57707	12.5	0.08836
1	0.75725	13	0.04075
1.5	0.83771	13.5	0.04451
2	0.83752	14	0.03767
2.5	0.68901	14.5	0.03248
3	0.71217	15	0.03009
3.5	0.56330	15.5	0.03155
4	0.45939	16	0.03957
4.5	0.47901	16.5	0.02541
5	0.39935	17	0.04471
5.5	0.28419	17.5	0.01980
6	0.28448	18	0.01759
6.5	0.30836	18.5	0.01499
7	0.25897	19	0.02364
7.5	0.24044	19.5	0.02042
8	0.26354	20	0.02427
8.5	0.23187		
9	0.20736		
9.5	0.19199		
10	0.11854		
10.5	0.12159		
11	0.09511		
11.5	0.12550		
12	0.09064		

Datos de la función de tiempos de residencia, obtenidos en la operación continua del secador empleando la relación $L/D = 2.0$

Tabla D.2 Registros experimentales para DTR con $L/D=2.0$

L/D=2.0

t (min)	E(t)	t (min)	E(t)
0.5	0.29795	16	0.27324
1	0.66952	16.5	0.22379
1.5	0.71355	17	0.18228
2	0.69990	17.5	0.20243
2.5	0.66473	18	0.18118
3	0.64255	18.5	0.19942
3.5	0.64281	19	0.16973
4	0.63189	19.5	0.16442
4.5	0.63574	20	0.15985
5	0.62322	20.5	0.17824
5.5	0.57547	21	0.16455
6	0.60236	21.5	0.14285
6.5	0.55182	22	0.07837
7	0.54071	22.5	0.10329
7.5	0.50670	23	0.06324
8	0.51941	23.5	0.06037
8.5	0.54559	24	0.04090
9	0.50085	24.5	0.05496
9.5	0.49528	25	0.04081
10	0.44146	25.5	0.05444
10.5	0.44197	26	0.06265
11	0.41475	26.5	0.04598
11.5	0.41401	27	0.04630
12	0.38365	27.5	0.05422
12.5	0.31520	28	0.04779
13	0.33361	28.5	0.04684
13.5	0.34430		
14	0.26796		
14.5	0.29576		
15	0.25699		
15.5	0.21484		

Datos experimentales obtenidos en la operación por lotes del secador.

Tabla D.3 Datos Exp. $T_{\text{aire}} 60^{\circ} \text{C}$

$T_{\text{aire}}=60^{\circ}\text{C}$

t(min)	H(base seca)	$T_{\text{Lecho}} \text{ }^{\circ}\text{C}$
0	0.2195122	23
0.5	0.19387755	29.9
1	0.1875	31.2
1.5	0.18414322	33.1
2	0.18112245	34.1
4	0.17877095	37.3
6	0.17708333	39.6
8	0.16352201	41.6
10	0.15844156	43.2
12	0.15633423	44.8
15	0.15424165	46.7
20	0.14550265	49.5
25	0.14209115	51.6
30	0.13216958	53.1
35	0.12977099	54.2
45	0.12626263	55.8
60	0.12041885	57.2
80	0.11138015	58.2
110	0.10498688	58.9
150	0.10552764	59.1
180	0.10541311	59.3

Tabla D.4 Datos exp. $T_{\text{aire}} 70^{\circ} \text{C}$

$T_{\text{aire}}=70^{\circ}\text{C}$

t (min)	H(base seca)	$T_{\text{lecho}} \text{ }^{\circ}\text{C}$
0	0.2224531	22
0.5	0.19596542	28
1	0.17886179	28.8
1.5	0.17877095	32.2
2	0.17711172	33.4
4	0.17484663	39.5
6	0.17183099	43.4
8	0.15340909	46.6
10	0.14540816	49.2
12	0.1420765	51.3
15	0.13941019	54
20	0.13395639	57.5
25	0.12860892	60.2
30	0.12427746	61.8
35	0.11873351	63.1
45	0.11320755	64.2
60	0.11239193	66.1
80	0.10776942	67.5
110	0.10353535	68.2
150	0.10379747	68.8
180	0.10377358	68.8

Tabla D.5 Datos exp. T_{aire} 80° C

T_{aire}=80°C

t (min)	H(base seca)	T _{Lecho} °C
0	0.21991387	23
0.5	0.19113573	30.5
1	0.18681319	32.5
2	0.18361582	37.7
4	0.18103448	43.7
6	0.17732558	47.7
8	0.17159763	51.3
10	0.15890411	54.5
12	0.14492754	57.3
15	0.1388102	60.5
20	0.13235294	64.7
25	0.12664908	67.7
30	0.12239583	70.1
35	0.11142857	71.3
45	0.10555556	73.6
60	0.10209424	75.1
80	0.10148515	76.2
110	0.10149254	76.9
150	0.1015625	77.4
180	0.10148515	77.5

Datos experimentales obtenidos en la operación en continuo del secador.

Tabla D.6 Datos exp. $T_{\text{aire}} 60^{\circ}\text{C}$ y $L/D=1$

$T_{\text{aire}}=60^{\circ}\text{C}$		$L/D=1.0$
t (min)	H(base seca)	$T_{\text{lecho}} (^{\circ}\text{C})$
0	0.1725	23
0.5	0.16880	33
1	0.1680	35.3
2	0.1640	35.5
4	0.1634	35.6
6	0.1654	35.2
9	0.1643	35.3
13	0.1626	36.1
15	0.1657	35.3
20	0.1641	34.7
25	0.1646	35.3
30	0.1677	34.9
35	0.1666	34.5
40	0.1655	34.8
45	0.1647	34.7
50	0.1643	34.8

Tabla D.7 Datos exp. $T_{\text{aire}} 60^{\circ}\text{C}$ y $L/D=2$

$T_{\text{aire}}=60^{\circ}\text{C}$		$L/D=2.0$
t (min)	H(base seca)	$T_{\text{lecho}} (^{\circ}\text{C})$
0	0.17969868	22
0.5	0.17473684	28.7
1	0.17330211	30.2
2	0.17142857	31.7
3	0.17029703	32.3
5	0.16390424	32.5
8	0.16043956	32.9
13	0.16113744	33.2
18	0.16135458	33.2
25	0.16037736	33.1
30	0.15913978	33.1
35	0.16119403	33.7
40	0.15835777	33.8
45	0.15944882	33.7
55	0.16	33.8

Tabla D.8 Datos exp. $T_{\text{aire}} 70^{\circ}\text{C}$, $L/D=1.5$

$T_{\text{aire}}=70^{\circ}\text{C}$	$L/D=1.5$
--------------------------------------	-----------

t (min)	H(base seca)	$T_{\text{lecho}} (^{\circ}\text{C})$
0	0.15800787	22
0.5	0.15625	36.5
1	0.15322581	38.3
1.5	0.14136126	39.3
3.5	0.1375	40.7
4.5	0.13605442	41.5
6.5	0.13574661	41.9
9.5	0.13541667	42
13	0.13445378	41.8
18	0.13402062	41.8
25	0.13063063	41.5
30	0.1291866	41.5
35	0.12751678	41.5
40	0.12738854	41.5
45	0.12568306	41.5
50	0.12560386	41.5
56	0.12605042	41.5

Tabla D.9 Datos exp. $T_{\text{aire}} 70^{\circ}\text{C}$, $L/D=1.5$

$T_{\text{aire}}=70^{\circ}\text{C}$	$L/D=1.5$
--------------------------------------	-----------

t (min)	H(base seca)	$T_{\text{lecho}} (^{\circ}\text{C})$
0	0.16414808	22
0.5	0.15384615	38.1
1	0.15151515	40.6
1.5	0.14482759	41.1
3	0.14179104	41.2
6	0.140625	41.1
10	0.13605442	40.8
13	0.13333333	40.8
18	0.13274336	41.1
25	0.13043478	41.2
30	0.12844037	41.2
35	0.12837838	41.1
40	0.12727273	41.1
45	0.12396694	41.2
50	0.12307692	41.1
60	0.12328767	40.9

Tabla D.10 Datos exp. $T_{\text{aire}} 70^{\circ}\text{C}$, $L/D=1.5$

$T_{\text{aire}}=70^{\circ}\text{C}$	$L/D=1.5$
--------------------------------------	-----------

t (min)	H(base seca)	$T_{\text{lecho}} (^{\circ}\text{C})$
0	0.1715966	21
0.5	0.17054264	36.1
1	0.16666667	36.5
1.5	0.16393443	37.3
3	0.16216216	37.8
6	0.15686275	38.5
10	0.15217391	39.1
14	0.14563107	39.6
20	0.14035088	39.9
25	0.14084507	39.9
30	0.13709677	40.2
35	0.13461538	40.2
40	0.13392857	40.2
50	0.13333333	40.4

Tabla D.11 Datos exp. $T_{\text{aire}} 80^{\circ}\text{C}$, $L/D=1$

$T_{\text{aire}}=80^{\circ}\text{C}$	$L/D=1.0$
--------------------------------------	-----------

t (min)	H(base seca)	T lecho ($^{\circ}\text{C}$)
0	0.15873424	22
0.5	0.14746544	43.2
1	0.14619883	43.4
2	0.14553991	44.8
3	0.14220183	44.7
5	0.1372549	44.7
8	0.1352657	44.6
11	0.13392857	44.1
15	0.1319797	44.2
20	0.13043478	44.1
25	0.12704918	43.8
30	0.12916667	43.6
35	0.12727273	43.5
40	0.1255814	43.6
45	0.125	43.6
47	0.12631579	43.6

Tabla D.12 Datos exp. $T_{\text{aire}} 80^{\circ}\text{C}$, $L/D=2$

$T_{\text{aire}}=80^{\circ}\text{C}$	$L/D=2.0$
--------------------------------------	-----------

t(min)	H(base seca)	T lecho ($^{\circ}\text{C}$)
0	0.15992235	22
0.5	0.15479876	35.2
1	0.14845938	37.3
2	0.1471173	40.4
3	0.14285714	41.6
5	0.13928571	42.3
8	0.13984169	43.3
11	0.13868613	43.3
15	0.13545817	43.3
20	0.13134328	43.5
26	0.12979351	43.6
30	0.1281337	43.6
35	0.12432432	43.6
40	0.12149533	43.6
50	0.12195122	43.6
60	0.12075472	43.6

Tabla D.13 Datos exp. $T_{\text{aire}} 100^{\circ}\text{C}$, $L/D=1$ Tabla D.14 Datos exp. $T_{\text{aire}} 100^{\circ}\text{C}$, $L/D=2$

$T_{\text{aire}}=100^{\circ}\text{C}$	$L/D=1.0$
---------------------------------------	-----------

t (min)	H(base seca)	$T_{\text{lecho}} (^{\circ}\text{C})$
0	0.17155074	21
0.5	0.16814159	49
1	0.16666667	48.9
2	0.15789474	50.4
3	0.14473684	50.5
5	0.14285714	50.1
8	0.14563107	50.1
11	0.14457831	50.2
15	0.14285714	50.2
20	0.13953488	50.1
25	0.13888889	50.2
30	0.13636364	50.2
35	0.1372549	50.2
40	0.13541667	50.1
45	0.13580247	50.2

$T_{\text{aire}}=100^{\circ}\text{C}$	$L/D=2.0$
---------------------------------------	-----------

t (min)	H(base seca)	$T_{\text{lecho}} (^{\circ}\text{C})$
0	0.16814713	21
0.5	0.15243902	42.9
1	0.14482759	43.6
2	0.14184397	46.6
3	0.14285714	47.9
5	0.13986014	49.2
8	0.1369863	50.3
11	0.13186813	50.7
15	0.13186813	51
20	0.13207547	51.2
25	0.12844037	51.2
30	0.12264151	51.2
35	0.125	51.2
40	0.12299465	51.2
45	0.12021858	51
50	0.12179487	50.9
55	0.12107623	51.2

Datos para obtener las curvas de secado isotérmicas.

Tabla D.15 Datos para determinar la curva de secado isotérmica a 60 °C

A temperatura de alimentación del aire de 60 °C

T adiab (°C)	H base seca	tadiab (min)	Tadiab (K)	Pv (bars)	t isot (min)
23	0.2195	0	296.15	0.02813476	0
29.9	0.1938	0.5	303.05	0.04227483	0.10600508
31.2	0.1875	1	304.35	0.04553732	0.22837174
33.1	0.1841	1.5	306.25	0.05069744	0.38137492
34.1	0.1811	2	307.25	0.05361113	0.53772443
37.3	0.1787	4	310.45	0.0639297	1.28244137
39.6	0.177	6	312.75	0.07236571	2.1775039
41.6	0.1635	8	314.75	0.08046396	3.22824331
43.2	0.1584	10	316.35	0.08749237	4.38778163
44.8	0.1563	12	317.95	0.09504169	5.71966061
46.7	0.1542	15	319.85	0.10472617	7.87809722
49.5	0.1455	20	322.65	0.1205331	12.0895783
51.6	0.142	25	324.75	0.13368738	16.7612065
53.1	0.1321	30	326.25	0.14381645	21.63738
54.2	0.1297	35	327.35	0.15165367	26.6192492
55.8	0.1262	45	328.95	0.16370072	36.9434931
57.2	0.1204	60	330.35	0.17490016	52.6279315
58.2	0.1113	80	331.35	0.18329242	73.5375824
58.9	0.1049	110	332.05	0.18936823	104.465922
59.1	0.1055	150	332.25	0.19113522	143.782765
59.3	0.105	180	332.45	0.19291618	174.147002

Tabla D.16 Datos para determinar la curva de secado isotérmica a 70 °C

A temperatura de alimentación del aire de 70 °C

T adiab (°C)	H base seca	tadiab (min)	Tadiab (K)	PV (bars)	t isot (min)
22	0.2224	0	295.15	0.02647433	0
28	0.1959	0.5	301.15	0.03787188	0.06071157
28.8	0.1778	1	301.95	0.03967462	0.12720303
32.2	0.1787	1.5	305.35	0.04819334	0.23177303
33.4	0.1771	2	306.55	0.05155679	0.33059822
39.5	0.1748	4	312.65	0.07197994	0.9231156
43.4	0.1718	6	316.55	0.08840692	1.70067812
46.6	0.1534	8	319.75	0.10419618	2.67255353
49.2	0.1454	10	322.35	0.11874742	3.80722742
51.3	0.142	12	324.45	0.13173637	5.068408
54	0.1394	15	327.15	0.15020227	7.22357828
57.5	0.1339	20	330.65	0.17738285	11.3743414
60.2	0.1286	25	333.35	0.20110562	16.1193988
61.8	0.1242	30	334.95	0.21639246	20.8136379
63.1	0.1187	35	336.25	0.22952637	25.7564062
64.2	0.1132	45	337.35	0.24115995	34.7938374
66.1	0.1123	60	339.25	0.26242721	50.4829507
67.5	0.1077	80	340.65	0.27909082	71.5846921
68.2	0.1035	110	341.35	0.28775115	101.483252
68.8	0.1037	150	341.95	0.29535321	142.042264
68.8	0.1037	180	341.95	0.29535321	170.450716

Tabla D.17 Datos para determinar la curva de secado isotérmica a 80 °C

A temperatura de alimentación del aire de 80 °C

T adiab (°C)	H base seca	tadiab (min)	Tadiab (K)	PV (bars)	tisot(min)
23	0.2199	0	296.15	0.02813476	0
30.5	0.1911	0.5	303.65	0.04375448	0.04616425
32.5	0.1868	1	305.65	0.04901586	0.10343081
37.7	0.1836	2	310.85	0.06533272	0.27572365
43.7	0.181	4	316.85	0.08979414	0.75791631
47.7	0.1773	6	320.85	0.11015435	1.3946531
51.3	0.1715	8	324.45	0.13173637	2.22386784
54.5	0.1589	10	327.65	0.15385314	3.24653172
57.3	0.1449	12	330.45	0.17572442	4.44965834
60.5	0.1388	15	333.65	0.20390006	6.45389499
64.7	0.1323	20	337.85	0.24661026	10.4076919
67.7	0.1266	25	340.85	0.2815425	14.8524215
70.1	0.1223	30	343.25	0.31240526	19.7766572
71.3	0.1114	35	344.45	0.32887229	24.2889429
73.6	0.1055	45	346.75	0.36247399	34.4193492
75.1	0.102	60	348.25	0.3859009	48.8585223
76.2	0.1014	80	349.35	0.4038742	68.1788058
76.9	0.1014	110	350.05	0.41567188	96.4842946
77.4	0.1015	150	350.55	0.42427383	134.292203
77.5	0.1014	180	350.65	0.42601193	161.810819

APENDICE E

! PROGRAMA PARA RESOLVER LA ECUACIÓN (1.50) Y CALCULAR LA HUMEDAD TEORICA.

INTEGER IRULE, NOUT

REAL A, ABS, B, ERRABS, ERREST, ERROR, ERRREL, EXACT, EXP, M, S, RESULT

INTRINSIC ABS, EXP

EXTERNAL M, QDAG, UMACH

! Get output unit number

CALL UMACH (2, NOUT)

! Set limits of integration

A = 0.0 ! minutos

B = 180.0 ! minutos

! Set error tolerances

ERRABS = 0.0

ERRREL = 0.001

! Parameter for non-oscillatory

! function

IRULE = 1

CALL QDAG (M, A, B, ERRABS, ERRREL, IRULE, RESULT, ERREST)

! Print results

WRITE (*,*) RESULT !, EXACT, ERREST, ERROR

!99999 FORMAT (' Computed =', F8.3, 13X, ' Exact =', F8.3, /, /,

!& ' Error estimate =', 1PE10.3, 6X, 'Error =', 1PE10.3)

END

!

REAL FUNCTION M (t)

REAL t,S

REAL EXP

INTRINSIC EXP

S=4.83 !Tiempo de residencia en minutos para el caso L/D = 1.0

! Mcont(t)=Integral[Mlotes(t)*E(t)]

! M= Humedad

$$M = (((0.07866*EXP(-0.07028*t))+0.11129))*((1/S)*EXP(-t/S))$$

RETURN

END

!Ajuste de las Curvas de secado adiabáticas

$$! ((0.08727*EXP(-0.04376*t))+0.10834) \quad A \ 60^{\circ}C$$

$$! ((0.08899*EXP(-0.07131*t))+0.1079) \quad A \ 70^{\circ}C$$

$$! ((0.10144*EXP(-0.0586*t))+0.10072) \quad A \ 80^{\circ}C$$

! Ajuste de las Curvas de secado isotérmicas

$$! ((0.07866*EXP(-0.07028*t))+0.11129) \quad A \ 60^{\circ}C$$

$$! ((0.07853*EXP(-0.1653*t))+0.11176) \quad A \ 70^{\circ}C$$

$$! ((0.08919*EXP(-0.13048*t))+0.10459) \quad A \ 80^{\circ}C$$

! Funciones de DTR

$$! (1/S)*EXP(-t/S) \quad N=1$$

$$! (t/(S*S))*EXP(-t/S) \quad N=2$$

UNIVERSIDAD AUTONOMA METROPOLITANA

UNIDAD IZTAPALAPA

**“ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DE UN SECADOR DE LECHO
FLUIDIZADO CONTINUO DE SEMILLAS DE AMARANTO OPERADO CON
UNA SOLA ETAPA.”**

TESIS QUE PRESENTA:

I.Q. LUIS ALBERTO VERDUZCO MORA

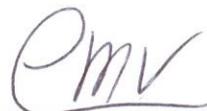
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERIA QUIMICA

ASESORES



DR. MARIO G. VIZCARRA MENDOZA



M. en I. CARLOS MARTINEZ VERA

ABRIL 2009