

Universidad Autónoma Metropolitana

Unidad Iztapalapa

Ciencias Básicas e Ingeniería

Departamento de Ingeniería de Procesos e Hidráulica

MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA

***Estudio del proceso de Secado de trigo
en un sistema de lecho vibrofluidizado***

Tesis que presenta

I.Q. CÉSAR PEREZ ALONSO

Asesor: DR. MARIO G. VIZCARRA MENDOZA

TESIS DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA QUÍMICA

***ESTUDIO DEL PROCESO DE SECADO DE TRIGO
EN UN SISTEMA DE LECHO VIBROFLUIDIZADO***

I.Q. CÉSAR PÉREZ ALONSO

MARZO DEL 2000

RESUMEN

En este trabajo se desarrolla una metodología experimental que conduce al estudio del comportamiento de los sistemas vibrofluidizados aplicados al secado continuo de trigo común blando (*Triticum aestivum*). Se utilizó un secador de lecho vibrofluidizado a nivel planta piloto (marca Niro) de sección transversal de 0.3 m². Se llevó a cabo experimentalmente la deshidratación del trigo en operación por lotes en un intervalo de temperatura de 40 a 100 °C y en continuo a 100 °C con un contenido de humedad entre 0.25 y 0.30 kg H₂O/kg sólido seco. Se simularon los procesos de secado, por lotes y en continuo, de los perfiles de humedad y de temperatura utilizando dos modelos matemáticos, uno, que se desarrolló de la teoría del secado y de la experimentación y que se denominó modelo de parámetros ajustables, y el otro, propuesto de la literatura denominado modelo homogéneo, que se caracteriza por no distinguir entre las fases emulsión y burbuja.

Los modelos mencionados demandaron parámetros que al no encontrarse en la literatura se evaluaron de forma experimental, dividiéndose en físicos, hidrodinámicos y termodinámicos. Algunos otros parámetros como la difusividad efectiva se determinaron en base a correlaciones propuestas por diferentes autores.

De los resultados obtenidos se pudo comprobar una mejor predicción con el modelo de parámetros ajustables en el dominio experimental estudiado, aunque las predicciones alcanzadas por el modelo homogéneo pueden considerarse confiables para temperaturas altas de alimentación constante de aire (100 °C). El consumo específico de energía del proceso de secado en continuo se incrementa al aumentar la temperatura de alimentación del aire y disminuye cuando aumenta la cantidad de sólidos en el lecho.

AGRADECIMIENTOS

Al **Dr. Mario G. Vizcarra Mendoza**, por todo su apoyo e interés mostrado en la realización de este trabajo. También quiero agradecerle por haber sido más que un asesor, por ser un buen amigo.

Al **M.C. Carlos Martínez Vera**, por toda la ayuda prestada en la realización del presente trabajo, sobre todo en la elaboración de los modelos matemáticos utilizados en el trabajo, por haberme enseñado a programar en Fortran y por la música de Led Zeppelin. Y por ser parte del jurado.

Al **Dr. Jaime Vernon Carter**, por sus correcciones y comentarios en la revisión final del trabajo. Asimismo quiero agradecerle sus valiosos consejos y experiencias en el campo profesional, por haber podido trabajar con usted y por formar parte del jurado.

Al **Dr. Luis Cedeño Caero (U.N.A.M.)**, cuyas observaciones, correcciones y comentarios contribuyeron en el presente trabajo. Por supuesto, agradecerle por ser parte integrante del jurado.

A la **U.A.M. Iztapalapa**, en especial al Área de Ingeniería Química por haberme dado la oportunidad y las facilidades de haber recibido, primero, una educación superior, y posteriormente un postgrado.

Al **CONACyT**, por su apoyo financiero en la elaboración de este trabajo, mediante el contrato 118644/120342.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer en especial a dos personas, que han sido los mejores amigos que he tenido en la vida, por contar siempre con su apoyo y por ser mis padres **Catalina Alonso y Felipe Pérez**.

A mis hermanos **Olga, Graciela y Aurelio** porque siempre me han apoyado y ayudado en todo momento de mi vida. A sus bonitas familias (**Yolanda, Bernardo** y las temibles Holligans: **Natalia, Miroslava y Joselyn**).

Con todo cariño y respeto deseo agradecer a tres personas que me han brindado por siempre su amistad, su apoyo incondicional. Así como sus consejos y experiencias. Gracias por todo **Sr. Aurelio Hinojosa, Dr. Francisco Ramos y Sr. Fernando González**.

A cada uno de mis familiares, no quiero mencionarlos individualmente por temor a omitir a alguno de ellos, pues sería algo francamente imperdonable.

A mis amigos del **I.P.N.**, en especial a: Esther, **Guadalupe**, Margarita, **Alejandro Vera** (gran amigo, americanista y vaquero de corazón, así como curemaniatico), **Efraín, Jerónimo, Víctor, Juan José Soto y Ruben Islas** (metalero 100 %).

A mis amigos y compañeros de la UAM-I de la Licenciatura (Generación poshka): **René, Juan Gabriel, Abel, Gudelio, Pedro** (Flinstone), Salvador (Poshko), **Eloy, Elías, Raúl, Richard, José Juan** y demás poshkos (as).

A mis amigos del Inglés: **Adriana, Yolanda, Rosa Aurora, Claudia, Juan Carlos y Francisco**.

A mis amigos y compañeros de la UAM-I: **Martha, Alex Campos, Alex Avila, Jorge, Ezequiel, Manuel, Roberto, Omar y César**.

A mis amigos del laboratorio de fluidización: Paty, Tina, Horacio, Francisco y Arturo.

A mis amigos y compañeros de la UAM-I de la Maestría: **Rosa María**, Guillermina, Fernando, Ignacio, Iván, Pacheco, Héctor y Gustavo.

Sobretudo, un super especial agradecimiento a la famosísima banda de los Shacks: Sarita, Mayela, Adrián (primero él), Everín, Eduardo (Fayucas), Hugo (rígoso), Hugo Adán, Nicolás, Epifanio (recién integrante) y por supuesto, Hectorín. A cada uno de ellos por ser los mejores amigos que pude haber encontrado en el posgrado.

ÍNDICE

RESUMEN

	Págs.
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. El trigo en México	3
1.2. Coeficiente de actividad de agua.....	7
1.3. Clasificación de los diferentes tipos de humedad en los materiales.....	8
1.4. Importancia del trigo.....	9
1.5. Periodos de secado.....	10
1.6. Mecanismos de secado.....	11
1.7. Operaciones de secado.....	11
1.8. Clasificación de secadores.....	12
1.9. La tecnología de los lechos fluidizados.....	13
1.9.1. Diámetro promedio de partícula.....	13
1.9.2. Densidad de la partícula.....	14
1.9.3. Velocidad mínima de fluidización.....	14
1.9.4. Clasificación de partículas.....	15
1.9.5. Regímenes de fluidización.....	16

	Págs.
1.10. La tecnología de los lechos vibrofluidizados.....	16
1.10.1. Amplitud.....	18
1.10.2. Frecuencia de vibraciones.....	18
1.10.2. Frecuencia angular.....	18
1.10.3. Intensidad vibracional.....	18
1.10.4. Velocidad mínima de vibrofluidización.....	19
2. ANTECEDENTES DEL SECADO DE TRIGO.....	21
2.1. Definición del problema.....	21
2.2. Revisión bibliográfica.....	22
3. MÉTODOS TEÓRICOS.....	27
3.1. Modelo de parámetros ajustables.....	27
3.2. Modelo homogéneo.....	31
3.3. Consumo específico de energía en el proceso de secado.....	37
3.4. Justificación.....	38
3.5. Objetivos.....	39
3.6. Hipótesis.....	39
4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	40
4.1. Material.....	40

	Págs.
4.2. Secador de lecho vibrofluidizado.....	40
4.3. Parámetros vibratoriales.....	42
4.3.1. Frecuencia de vibración.....	42
4.3.2. Amplitud.....	42
4.4. Determinación de propiedades físicas de los granos de trigo.....	43
4.4.1. Densidad empacada.....	43
4.4.2. Densidad aparente.....	44
4.4.3. Diámetro promedio de partícula.....	44
4.4.4. Diámetro efectivo de partícula.....	44
4.5. Caracterización hidrodinámica-vibratorial.....	44
4.5.1. Velocidad mínima de fluidización.....	44
4.5.2. Fracción de espacios vacíos.....	45
4.5.3. Velocidad mínima de vibrofluidización.....	46
4.6. Determinación de propiedades termodinámicas.....	46
4.6.1. Capacidad calorífica del grano.....	46
4.7. Secado en lecho vibrofluidizado.....	47
4.7.1. Determinación de las curvas de secado en operación por lotes.....	47
4.7.2. Distribución del tiempo de residencia del trigo en continuo.....	48
4.7.3. Determinación de las curvas de secado en operación continua.....	49
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	51
5.1. Propiedades físicas	51
5.2. Propiedades hidrodinámicas-vibratoriales.....	51

	Págs.
5.3. Cinéticas de secado por lotes.....	56
5.4. Simulaciones del comportamiento del secado de lecho vibrofluidizado por lotes y en continuo.....	60
CONCLUSIONES.....	67
NOMENCLATURA.....	69
BIBLIOGRAFÍA.....	73
 APÉNDICES	
Apéndice A. Propiedades físicas de los granos de trigo.....	78
Apéndice B. Hidrodinámica del sistema sólido-aire.....	81
Apéndice C. Propiedades termodinámicas del trigo.....	82
Apéndice D. Distribución de tiempos de residencia del trigo.....	83
Apéndice E. Operación por lotes.....	85
Apéndice F. Operación continua.....	87
Apéndice G. Programas de los modelos de parámetros ajustables y no ajustables.....	88

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1.

En este capítulo se presentan las principales características morfológicas, físicas y químicas del trigo, se mencionan los principales Estados de la República Mexicana productores de este alimento y la importancia que tiene este cereal como alimento básico y necesario en la dieta humana. Finalmente se hace una descripción de los principales conceptos teóricos y prácticos que se manejan en la operación de secado y más concretamente en las tecnologías de lecho fluidizado y vibrofluidizado.

INTRODUCCIÓN

El secado se puede considerar como una amalgama de ciencia, tecnología y arte, basado en observaciones y prácticas experimentales (Mujumdar, 1987). El secado de sólidos es una de las operaciones unitarias más antiguas y comunes en los procesos industriales agrícolas, químicos, farmacéuticos, alimenticios y textiles. También es una de las operaciones más complejas y menos entendibles debido a las dificultades y deficiencias que se tienen para poder describir matemáticamente los fenómenos de transporte simultáneos de transferencia de calor y masa que se presentan. Es por ello, que es necesario desarrollar nuevos métodos y tecnologías que permitan tener un mejor entendimiento del proceso de secado, un alto control de calidad de producto y un mínimo consumo de energía.

Este trabajo se enfoca al estudio del secado de trigo, que es uno de los cereales más cultivados y consumidos en México por su alto contenido nutricional. Debido a la fuerte demanda de este producto y a los altos costos de importación, las industrias agrícola y de alimentos han buscado nuevas tecnologías que les permitan almacenar los granos por periodos de tiempo prolongados.

Mujumdar (1987) señala que si el trigo contiene una humedad mayor al 19%, sólo se puede almacenar por algunos días, si tiene entre 16 y 18%, se puede almacenar por algunas semanas, con un 15% se puede guardar por un año y con 13 a 14% puede durar mucho más tiempo.

Existen dos tipos de secado que se han utilizado para la deshidratación del trigo: el secado natural y el secado artificial. El secado natural necesita un clima con elevada temperatura y baja humedad, que en México serían las regiones de trópico seco o aquellas con verano caliente y seco. Para exponer el producto al sol se requiere mucho espacio al aire libre. El secado al sol es lento y no reduce el contenido de humedad a menos del 16%, por lo que no resulta apto para la conservación e industrialización del trigo.

Para evitar el sobrecalentamiento por los rayos del sol y proteger el producto contra la lluvia, polvo, insectos, roedores y la humedad nocturna, se tiende a secar el material por medios artificiales. El secado de trigo lo han llevado a cabo principalmente por medio de secadores de lecho borboteante, (Viswanathan y col., 1986; Zahed y Epstein, 1992) y de lecho fluidizado (Reay y Allen, 1982; Zahed y col., 1995). El inconveniente que tienen estos dos métodos de secado es que requieren flujos de aire elevados para conseguir la deshidratación. La tecnología de los lechos vibrofluidizados ofrece en cambio, menores gastos de energía para el secado y mejora la transferencia de calor entre el material y el gas (Mujumdar, 1987).

Los lechos vibrofluidizados se distinguen de otros tipos de secadores porque en estos lechos hay una combinación entre el flujo de gas y las vibraciones, lo que provoca que exista un mejor contacto sólido-gas (Mujumdar, 1987). Las vibraciones sirven para mantener a cualquier material en un estado de movimiento. Una vez que el material alcanza el punto de fluidización libre, el efecto de las vibraciones en la velocidad de secado es despreciable.

Por lo anterior, el objetivo principal de este trabajo es estudiar el comportamiento de los sistemas vibrofluidizados, aplicados al secado de trigo a nivel planta piloto, para lo cuál se propone una metodología experimental que conduce al planteamiento de un modelo de parámetros ajustables y a la validación de un modelo de parámetros no ajustables conocido como modelo homogéneo.

1.1. El trigo en México

Desde hace 9000 años, se tuvo conocimiento de la existencia del trigo (*Triticum*) en Asia Occidental. Este cereal se cultivaba en la región del Cáucaso, en Turquía e Irán. La introducción del cultivo de trigo en la Nueva España se atribuye a Juan Garrido, soldado de Hernán Cortés. Para 1524, el trigo ya era muy abundante en la Ciudad de México y en el interior del país.

El trigo pertenece a la familia de las gramíneas. Esta familia está dividida en dos grupos, el primero es el grupo de los granos chicos. El otro es el grupo de los granos grandes y a éste pertenecen los cereales como el trigo, la avena, la cebada, el maíz, el arroz, el sorgo y el mijo.

En el grupo de los trigos, se distinguen varias especies. En la producción actual sobresalen las especies de trigo macarrón y de trigo común. En la Figura 1.1 se presenta la morfología de la planta de trigo, y sus principales características son:

1. La altura que varía entre 30 y 180 cm.
2. El tallo es recto y cilíndrico. Tiene nudos.
3. El nudo es sólido. La mayoría de los trigos tienen seis nudos, aproximadamente.
4. La hoja es lanceolada, con un ancho de 0.5 a 1 cm y una longitud de 15 a 25 cm. Cada planta tiene de cuatro a seis hojas.
5. La lígula es de longitud media.
6. La aurícula es despuntada y tiene pelos. La lígula y la aurícula sirven en la identificación de las plántulas.
7. La plántula. En ella, las hojas se despliegan al nacer, girando en el sentido de las manecillas del reloj.
8. Amacollamiento. Esta es otra característica entre los cereales, las plántulas producen de dos a siete macollos.
9. Las raíces del trigo son semejantes a las de la cebada y de la avena.
10. Las raíces permanentes o secundarias nacen en el primer nudo.
11. Raíces que nacen a partir de la semilla. Normalmente existen cinco raíces seminales, una radical o primaria y cuatro laterales, que funcionan durante toda la vida de la planta.

12. La espiga del trigo macarrón es densa y corta. Consiste en una infinidad de espiguillas que terminan en una arista o barba.
13. Los granos de trigo macarrón son generalmente alargados, puntiagudos, durísimos y de color ámbar rojizo.
14. Espiga del trigo común.
15. Los granos del trigo común pueden ser blandos o duros.

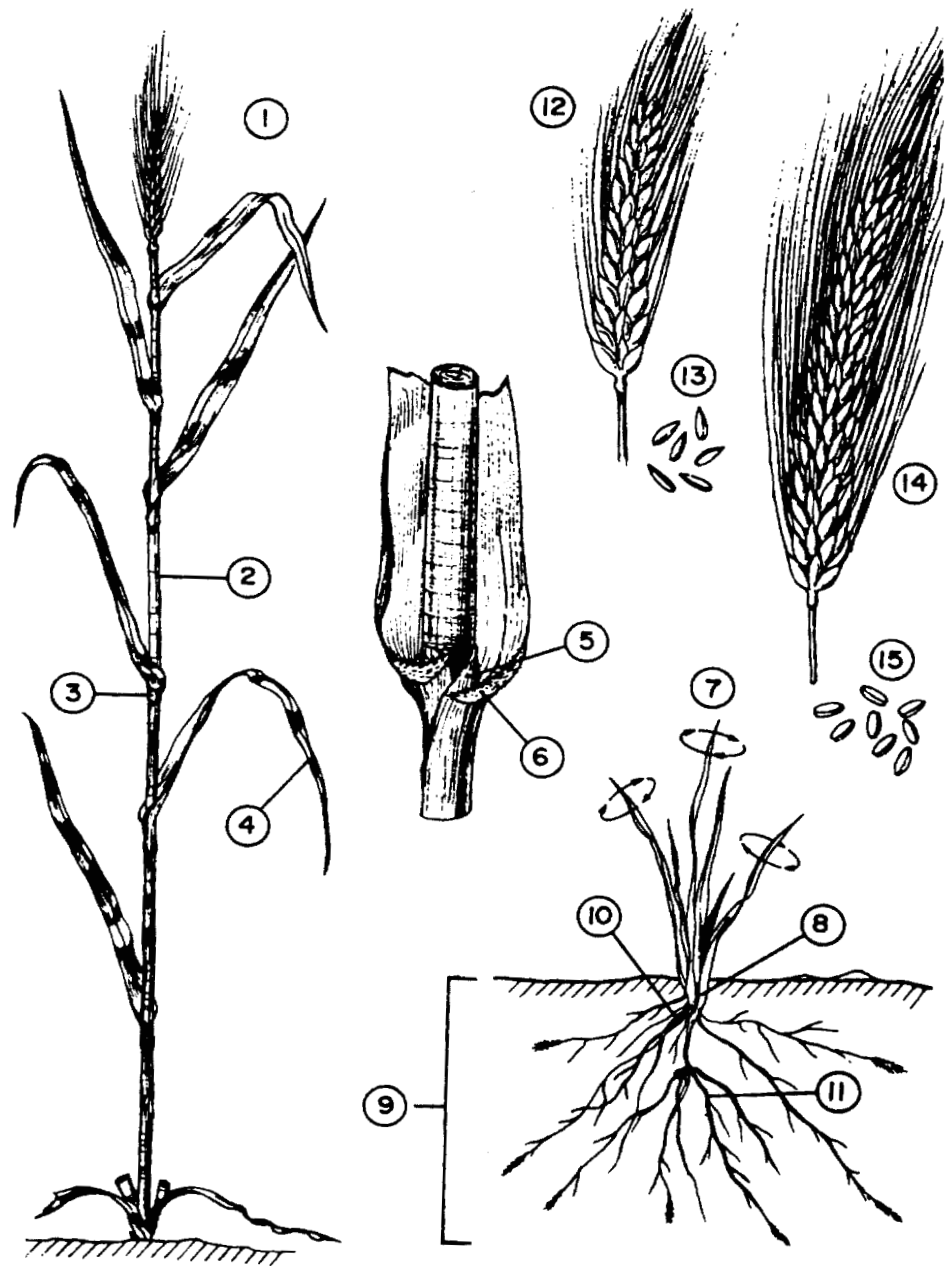


Figura 1.1. Morfología del trigo.

El trigo tiene una compleja y heterogénea estructura de diferentes partes anatómicas y compuestos bioquímicos. Boizán e Ivanovich (1986) han mostrado que los granos tienen varias capas, embrión y endosperma. En la Tabla 1.I se muestra la composición química del trigo común blando (*Triticum aestivum*).

Tabla 1.I Composición química de las partes anatómicas del trigo en % peso (Datos promedio), Boizán e Ivanovich (1986)

Parte del Grano	Relación peso	Albumen	Almidón	Azúcares	Celulosa	Pentosanos	Grasa	Ceniza
Grano Completo	100.00	16.06	63.07	4.32	2.76	8.10	2.24	2.18
Endosperma	81.60	12.91	78.82	3.54	0.15	2.72	0.68	0.45
Embrión	3.20	41.30	0.00	25.12	2.46	9.74	15.04	6.32
Cobertura	15.20	28.75	-----	4.18	16.20	36.65	7.78	10.51

El albumen desempeña un papel muy importante en la evaluación de la sensibilidad térmica del grano durante el secado de éste (Boizán e Ivanovich, 1986). Como se observa en la tabla 1.I, el contenido fundamental de albumen se encuentra en el embrión y en el endosperma. Sin embargo, el albumen de un cereal se diferencia mucho del albumen de otro, y por eso, cada uno manifiesta diferentes características durante su tratamiento térmico (secado).

Los cereales como el trigo, de acuerdo a sus propiedades físicas y coloidales, se clasifican en el grupo de los coloides capilar-porosos de naturaleza viva, los cuales se caracterizan porque las paredes de sus capilares son elásticas. Al absorber un líquido se hinchan, independientemente de su composición química (Boizán e Ivanovich, 1986).

Los granos, como todos los organismos vivos, respiran, crecen, envejecen y mueren. En estos procesos desempeña un papel muy importante el agua. Esto se debe a dos causas fundamentales: el agua no sólo viene a ser un constituyente físico-químico del grano, sino también es un agente activo que toma parte en los procesos bioquímicos que tienen lugar continuamente en el tejido vegetal.

Una de las manifestaciones vitales más importantes de los granos, es la respiración, la cual puede ser considerada como la oxidación de los hidratos de carbono de los sólidos, produciéndose dióxido de carbono y agua. Simultáneamente a la oxidación se liberan 2819.18 kJoule por cada gramo-mol de glucosa (Boizán e Ivanovich, 1986). Durante la respiración se consume parte de la sustancia seca y disminuye la masa del grano. La respiración es una de las causas de las pérdidas biológicas observadas durante la recolección y conservación del grano.

La intensidad de la respiración depende de la humedad y temperatura del grano. La intensidad de la respiración aumenta al incrementarse la humedad y la temperatura (Boizán e Ivanovich, 1986), provocando el ennegrecimiento y desnaturalización del albumen del embrión y el endosperma. La desnaturalización es un cambio estructural que sufre el grano debido a incrementos de temperatura en éste (40-50 °C), con lo cual queda inutilizado como semilla y, a veces, también como alimento.

Al aumentar la humedad del grano, en la masa de éste se desarrollan intensamente los microorganismos, diferentes insectos y otros parásitos, cuya existencia conduce a mayores pérdidas del grano. El trigo puede sufrir daños de tipo físico o químico durante la cosecha, durante el secado, o bien, en el almacenamiento. Sin embargo, el principal factor que puede alterar a los granos es la temperatura de calentamiento del sólido durante la deshidratación.

A través de investigaciones se ha encontrado que el contenido en proteínas del trigo es del 6 al 20 % en peso dependiendo de la variedad y clase (Pomeranz, 1978). Al secar los granos no se recomienda hacerlo a temperaturas excesivamente altas porque sufre un deterioro el gluten, el cual es el principal componente para la elaboración de levaduras de alta calidad, que son necesarias en la elaboración de harinas. Existen dos pruebas que se pueden realizar para determinar el grado de calidad del gluten, una prueba de fermentación y una prueba de sedimentación.

El principal componente del trigo es el almidón, que al ser calentado a temperaturas por arriba de los 60 °C provoca un cambio físico-químico en el trigo duro y a los 85 °C en el trigo blando (Pomeranz, 1978), conocido como gelatinización. La gelatinización provoca que el grano

sufra un hinchamiento, se incremente su viscosidad y se forme una especie de gel en el interior del sólido provocando posibles dificultades en la migración del agua del interior a la superficie del grano durante el secado.

1.2. Coeficiente de actividad de agua

En la industria alimenticia este parámetro determina la estabilidad de un alimento, tal que la investigación hacia estos ámbitos es basta; termodinámicamente se presenta como el cociente de la fugacidad del agua en una mezcla (f_{wi}) sobre la fugacidad de esta como componente puro a la misma temperatura (f_w^0)

$$a_w = \frac{f_{wi}}{f_w^0} \quad (1.1)$$

De la misma termodinámica se conoce que la fugacidad es una presión que se corrige y de esta forma se representa realmente a esta variable de estado; para temperaturas alrededor de la ambiente se justifica que el vapor de agua se comporta idealmente, así que las fugacidades de la Ecuación (1.1) se sustituyen por la presión de vapor del agua en el sistema (p_w) dividida por la presión de vapor del agua como componente puro a la misma temperatura (p_w^0). La presión de operación es generalmente la ejercida por la atmósfera

$$a_w = \frac{p_w}{p_w^0} \quad (1.2)$$

La actividad de agua se refiere a un estado de equilibrio real, y lamentablemente no siempre se alcanza en los alimentos (Strumillo y Adamiec, 1996). No obstante lo anterior, la actividad de agua en los alimentos se ha relacionado con sus propiedades físicas, químicas y biológicas más que con el contenido de humedad presente; cambios específicos en color, aroma, sabor, estabilidad y calidad se relacionan a rangos reducidos de actividad de agua.

1.3. Clasificación de los diferentes tipos de humedad en los materiales

La humidificación de un material se puede efectuar por sorción de vapor de agua contenido en el aire o por contacto directo de la superficie del material con agua. El agua al penetrar en el sólido se enlaza con las moléculas de éste, y la energía del enlace depende de la naturaleza y estructura del material (Boizán e Ivanovich, 1986). Por esto, tiene gran interés para los procesos de transferencia de calor y masa, analizar las diferentes formas de cómo es absorbida el agua en los cuerpos capilar-porosos. Existen dos grandes grupos que se utilizan en la técnica de secado: enlace químico y físico-químico.

Enlace químico

La humedad ligada químicamente se subdivide en agua ligada en forma de iones hidroxilo y de cristalohidratos. La primera es el resultado de reacciones químicas entre el agua y el material. Esta humedad sólo puede ser eliminada a través de una acción química o por calcinación. La humedad contenida en forma de hidratos cristalinos se puede extraer sólo por calcinación. La humedad ligada químicamente por su estabilidad no puede ser extraída durante el secado, la cual tiene una energía de enlace de $1-100 \times 10^5$ Joule/mol.

Enlace físico-químico

El enlace físico-químico es característico de la humedad adsorbida en la superficie activa del material y de la humedad retenida en el interior del material. En todo el proceso de adsorción de humedad se puede distinguir dos estados: adsorción de la humedad con desprendimiento de calor e hinchamiento del material y adhesión del líquido sin desprendimiento de calor y sin hinchamiento.

El humedecimiento de un material de estructura y composición homogénea ocurre uniformemente a través de toda su masa. En los granos, debido precisamente a la diferente estructura y composición bioquímica de sus partes integrantes, el humedecimiento ocurre irregularmente. No obstante, debe aclararse que el humedecimiento se produce en toda la superficie del sólido, pero el transporte de humedad en su interior, a través de sus diferentes capas, tiene lugar a velocidades diferentes.

En la tabla 1.II se presenta la cantidad de agua absorbida por los granos de trigo en sus diferentes capas constituyentes:

Tabla 1.II Cantidad de agua absorbida en el trigo en % peso (Datos promedio), Boizán e Ivanovich (1986)

	Cantidad de agua en el trigo (% peso)
Capa exterior del grano	4
Capa intermedia del grano	19
Capa intermedia próxima al embrión	20
Capa profunda del grano junto con el embrión	57

1.4. Importancia del trigo

El secado de alimentos es uno de los procedimientos más antiguos usados por el hombre para preservarlos durante épocas de abundancia y consumirlos durante temporadas de escasez. El trigo es importante en la dieta humana por su alto valor alimenticio, es rico en proteínas, minerales y vitaminas. Una parte de la proteína del trigo se llama gluten. El gluten facilita la elaboración de levaduras de alta calidad, que son necesarias en la panificación. El trigo es el principal ingrediente en la fabricación del pan, también se usa en la elaboración de bebidas alcohólicas y en la alimentación animal. Actualmente el trigo es el principal cereal consumido en el mundo (Banco de México, 1999).

La importancia del trigo estriba en que:

- Contiene nutrientes en forma concentrada
- Es fácil de almacenar
- Es fácil de transportar
- Se puede conservar por mucho tiempo
- Se puede utilizar como materia prima o como producto elaborado

En los últimos años los principales estados de la República Mexicana que siembran el trigo son: México, Guanajuato, Morelos, e Hidalgo, siendo éste último el que concentra

aproximadamente el 60 % de la producción total. En la Tabla 1.III se presenta la producción del trigo con relación a la superficie sembrada.

Tabla 1.III Producción del trigo con respecto a la superficie sembrada (SAGAR, 1999)

Periodo	Superficie sembrada (ha)	Superficie cosechada (ha)	Producción obtenida (Ton)
1997 Invierno	702788	247550	500313
1998 Primavera	527091	425453	825290
1998 Invierno	679732	146471	246696
1999 Primavera	509799	486093	822715

1.5. Periodos de secado

El secado es una operación en la cual tienen lugar simultáneamente la transferencia de calor y masa para eliminar humedad de un sólido. Cuando un sólido se deseca experimentalmente, se obtienen datos que asocian el contenido de humedad en base seca (X) en función del tiempo (t) (Perry y Chilton, 1987), como se ilustra en la Figura 1.2. La porción AB representa un lapso de calentamiento y se conoce como periodo inicial.

La sección BC representa el periodo de velocidad constante, el cual se caracteriza porque el movimiento de la humedad dentro del sólido es lo suficientemente rápido para mantener una condición saturada en la superficie, y la velocidad de desecación se controla por medio de la velocidad de transmisión de calor a la superficie de evaporación.

La sección CD se denomina periodo de velocidad decreciente debido a que la resistencia interna al transporte de humedad es mayor dentro del material que en la superficie de este y existe además una disminución continua de la velocidad de secado a lo largo del resto del ciclo de secado.

El punto C , donde concluye la velocidad constante y comienza a descender el índice de desecación, se conoce como contenido crítico de humedad y depende de la geometría, tamaño y naturaleza interna del sólido.

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.

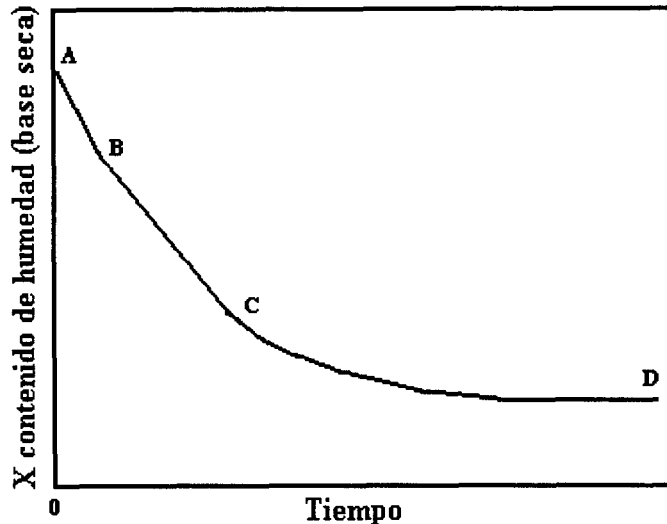


Figura 1.2 Contenido de humedad en función del tiempo.

1.6. Mecanismos de secado

En general, existen diferentes mecanismos de secado que describen la transferencia de humedad (Treybal, 1988) en los materiales capilar-porosos de naturaleza biológica como los cereales.

- Flujo capilar. La humedad contenida en los intersticios de los sólidos, como líquido en la superficie o como humedad libre en las cavidades celulares, se desplazan por gravedad y capilaridad, a condición de que existan pasadizos para un flujo continuo.
- Difusión del vapor. 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 gas.

1.7. Operaciones de secado

Las operaciones de secado pueden clasificarse según sean por lotes o continuas (Treybal, 1988). Estos términos pueden aplicarse específicamente desde el punto de vista de la sustancia

que se está secando. Así, la operación denominada secado por lotes, generalmente es un proceso donde una cierta cantidad de material húmedo se expone a una corriente de gas que fluye continuamente, en la cual se evapora la humedad. El secado por lotes es una operación relativamente cara; en consecuencia, se limita a operaciones a pequeña escala, a plantas piloto, a trabajos de investigación y para secar materiales valiosos cuyo costo total será poco alterado por el costo agregado en la operación de secado.

En la operación continua, el material que se va a secar y el gas pasan continuamente a través del equipo. Los secadores continuos generalmente se operan en estado estacionario. El secado continuo ofrece las siguientes ventajas: generalmente el equipo necesario es pequeño en comparación con la cantidad de producto, el producto tiene un contenido más uniforme de humedad, y el costo de secado por unidad de producto es relativamente pequeño.

1.8. Clasificación de secadores

La siguiente es una clasificación de secadores (Perry y Chilton, 1987) basada en el método de transferencia de calor:

Secadores Directos. La transferencia de calor para el secado se logra por contacto directo entre los sólidos húmedos y los gases calientes. El líquido vaporizado se arrastra con el medio de secado, es decir, con el gas caliente. Las características generales de operación de los secadores directos son:

- El contacto directo entre el gas caliente y los sólidos se aprovecha para calentar a estos últimos y separar el vapor.
- Un secador directo consume más combustible por kilogramo de agua evaporada, mientras más bajo sea el contenido de humedad.

Secadores indirectos. El calor de secado se transfiere al sólido húmedo a través de una pared de retención. El líquido vaporizado se separa independientemente del medio de calentamiento. La velocidad de secado depende del contacto que se establezca entre el material húmedo y las superficies calientes. Estos secadores difieren de los directos, en la transmisión de calor y la separación del vapor, y sus principales características son:

- Son apropiados para secar a presiones reducidas y en atmósferas inertes, para recuperar disolventes y evitar la formación de mezclas explosivas, para la oxidación de materiales que se descomponen con facilidad.
- La recuperación de polvos y materiales finamente pulverizados se manejan de un modo más satisfactorio en comparación con los secadores directos.

1.9. La tecnología de los lechos fluidizados

Los sólidos granulares como el trigo, se pueden secar en lechos fluidizados utilizando aire caliente. Las características principales de estos lechos son su temperatura uniforme y una alta eficiencia de contacto entre el sólido y el gas, lo cual conduce a un secado homogéneo (Mujumdar, 1987). La fluidez que adquieren los sólidos permite que estos secadores operen en forma continua. El mantenimiento de estos equipos es barato en comparación con los de lecho borboteante, entre otros.

Dentro de las desventajas se pueden mencionar:

- Los sólidos a secar en estos equipos deben ser resistentes a la atrición, de lo contrario, se deberá de contar con un ciclón para recolectar los finos formados por el contacto entre los sólidos y las paredes del recipiente.
- Entre más grande sea el secador, las caídas de presión aumentan y esto trae como consecuencia que la potencia del ventilador se tenga que incrementar y los costos de equipo y accesorios aumenten, así como también los de energía.

1.9.1. Diámetro promedio de partícula

El tamaño de partícula puede definirse de varias maneras. Kunii y Levenspiel (1991) lo definen como un diámetro efectivo d_e , donde para partículas en forma regular se puede determinar el diámetro efectivo utilizando calibradores micrométricos. Si las partículas son irregulares y no porosas se utiliza el método de desplazamiento de fluido.

La esfericidad de partícula se define como:

$$\phi_s = \left(\frac{\text{superficie de la esfera}}{\text{superficie de la partícula}} \right)_{\text{al mismo volumen}} \quad (1.3)$$

donde $\phi_s = 1$ para partículas esféricas y, $0 < \phi_s < 1$ para las demás geometrías.

Para partículas irregulares el diámetro equivalente se define como:

d_{esf} = diámetro de una esfera obtenido del volumen de la partícula irregular.

El concepto anterior permite determinar el diámetro efectivo de la siguiente manera:

$$d_e = \phi_s d_{esf} \quad (1.4)$$

donde para partículas isotrópicas de forma como el trigo, la ecuación (1.4) se transforma en:

$$d_e = \phi_s d_p \quad (1.5)$$

Siendo d_p el diámetro promedio de partícula.

1.9.2. Densidad de la partícula

Se conocen tres tipos de densidades:

- La densidad empacada, que se obtiene considerando a los sólidos y los espacios vacíos entre ellos, referidos al mismo volumen que los contiene.
- La densidad aparente, que se obtiene considerando a los sólidos, referidos al volumen que los contiene, corregido por el volumen correspondiente a los espacios interpartículas.
- La densidad real, que es la densidad formada únicamente por los sólidos, referidos al volumen que los contiene, corregido por el volumen correspondiente a los espacios inter e intrapartícula.

1.9.3. Velocidad mínima de fluidización

La velocidad mínima de fluidización se obtiene al relacionar la caída de presión ejercida por el gas al atravesar el lecho en función de la velocidad superficial del gas (Kunii y Levenspiel 1991). En la Figura 1.3 se muestra una gráfica de caída de presión contra velocidad del gas donde puede observarse, en una primera zona, una relación lineal entre estos dos parámetros. Esta zona corresponde al lecho fijo. A una determinada velocidad se observa un cambio brusco en la pendiente, y es ahí donde se localiza la velocidad mínima de fluidización (punto A). A partir de este punto, el aumento en la velocidad superficial del gas se traduce en una caída de presión constante en el lecho. Esta zona corresponde al lecho fluidizado.

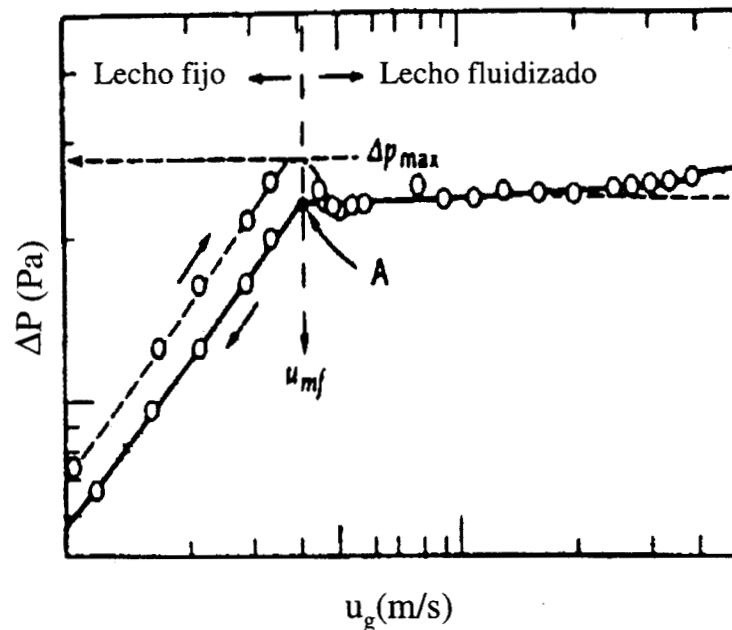


Figura 1.3 Curva característica de la velocidad mínima de fluidización.

1.9.4. Clasificación de partículas

El comportamiento de la fluidización depende del tipo de partículas que se van a estudiar. Geldart (1973) las clasificó en términos de la diferencia de densidades (gas-partícula) y el diámetro promedio de las partículas. Existen cuatro grupos, que son:

- Grupo A. Son materiales que tienen un diámetro promedio de partícula pequeño ($30 < d_p < 100 \mu\text{m}$), o bien, una densidad aparente baja ($< \sim 1400 \text{ kg/m}^3$).
- Grupo B. Son partículas que tienen un diámetro de ($4 < d_p < 500 \mu\text{m}$), y una densidad de ($1400 < \rho_p < 4000 \text{ kg/m}^3$). Estos sólidos son de fácil fluidización.
- Grupo C. Son partículas muy finas y extremadamente difíciles de fluidizar por la presencia de fuerzas interpartículas muy grandes en el lecho.
- Grupo D. Son partículas grandes y densa ($d_p > 1 \text{ mm}$) que no permiten la expansión del lecho; muchos cereales se clasifican en este grupo.

1.9.5. Regímenes de fluidización

Los posibles regímenes de fluidización que se pueden presentar en un sistema son:

- Régimen corpuscular. Se presenta en partículas tipo *A*, el gas pasa por los huecos interpartículas sin formar burbujas, el lecho se observa como una fase, las condiciones de velocidad del gas son estrechas.
- 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. Al aumentar la velocidad del aire se forman dos fases, la fase burbuja y la fase densa. En la fase densa se localiza la mayor parte de las partículas.
- Régimen turbulento. Al aumentar la velocidad del gas 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.
- Régimen borboteante. Este régimen surge cuando el gas se inyecta verticalmente por una abertura pequeña en el fondo del lecho, las partículas se arrastran por el chorro de gas hasta la superficie del secador y regresan al lecho, pegándose a las paredes del equipo, esto provoca un mezclado más homogéneo.
- 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 agujeros por donde éste pasa y abandona el lecho.

1.10. La tecnología de los lechos vibrofluidizados

Davidson y col. (1985) estudiaron que el secado en lecho vibrofluidizado puede ser un proceso continuo o por lotes, el cual combina las tecnologías de transporte vibracional y de secado en lecho fluidizado. El material a tratar se mantiene en un estado fluidizado como resultado de la acción combinada del flujo de aire y de las vibraciones. La única función de las vibraciones es distribuir a los sólidos en la sección de alimentación y mantenerlos en movimiento de tal forma que se tenga una mejor área de contacto entre el flujo de gas y los sólidos.

Los posibles materiales que se pueden utilizar en los lechos vibrofluidizados son aquellos que presentan una amplia distribución de tamaño de partícula, materiales que al estar húmedos se

aglomeran, forman pastas pegajosas, o bien, materiales grandes y densos que requieren de grandes cantidades de flujo de gas para fluidizarlos por métodos tradicionales. Davidson y col. (1985) hicieron una recopilación de los posibles materiales que se pueden secar en los lechos vibrofluidizados y se muestran en la Tabla 1.IV.

Tabla 1.IV Aplicaciones industriales para secadores de lecho vibrofluidizado, Davidson (1985)

Químicos	Alimentos	Minerales	Plásticos
Sulfato de sodio	Maíz	Arena	Acetato de polivinilo
Urea	Azúcar	Cuarzo	Polipropileno
Detergente en polvo	Trigo	Carbón	Nylon
Acido cítrico	Soya	Piedra caliza	
Sal común	Café	Arcilla	

Los lechos vibrofluidizados normalmente son de sección rectangular, y vibran a frecuencias de 5-25 Hz con amplitudes medias de varios milímetros. El plato distribuidor se coloca entre 0 y 45° con respecto a la vertical para que el material sea fácilmente transportado a través del lecho. Las velocidades de aire requeridas para tener un buen movimiento de sólidos están por abajo del 20% de la velocidad mínima de fluidización.

Gupta y Mujumdar (1980) observaron tres regímenes de operación de los lechos vibrofluidizados que se pueden definir dependiendo de la magnitud de la intensidad vibracional ($A\omega^2/g$).

1. Cuando $A\omega^2/g < 1$, el lecho funciona como un lecho fluidizado normal y las vibraciones únicamente sirven para mejorar la estabilidad y homogeneidad del lecho.
2. Cuando $A\omega^2/g \cong 1$, el flujo de gas y las vibraciones contribuyen a la fluidización y el funcionamiento del lecho es influenciado por ambas magnitudes.
3. Cuando $A\omega^2/g > 1$, el efecto de las vibraciones domina el funcionamiento dinámico del lecho y el flujo de gas sirve como medio de calentamiento y transporte de masa, por lo que existe un mejor contacto gas-sólido.

1.10.1. Amplitud

Cuando las partículas vibran, con respecto a sus posiciones de equilibrio, se produce un movimiento ondulatorio desplazándose una onda de energía. La amplitud (A) es el máximo desplazamiento o elongación de la partícula con respecto a su posición de equilibrio.

1.10.2. Frecuencia de vibraciones

La frecuencia (f) del oscilador es el número de vibraciones completadas por unidad de tiempo y está dada por

$$f = \frac{1}{\Theta} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (1.6)$$

donde Θ es el período de una partícula en vibración, y no es más que el tiempo que emplea en completar una oscilación o vibración.

1.10.3. Frecuencia angular

La frecuencia angular ω es igual al número de revoluciones por unidad de tiempo desde un punto de referencia. De aquí que

$$\omega = 2\pi f \quad (1.7)$$

Tiene las dimensiones del recíproco del tiempo y su unidad es el radian por segundo. La diferencia entre la frecuencia angular y la de vibraciones es el factor 2π .

1.10.4. Intensidad vibracional

Es un parámetro físico que engloba las dos fuerzas motrices que provocan el fenómeno de vibración, que son la fuerza mecánica conocida como aceleración vibracional ($A\omega^2$) y la fuerza gravitacional (g) por lo que la intensidad vibracional se define como:

$$\Gamma = A \omega^2 / g \quad (1.8)$$

1.10.5. Velocidad mínima de vibrofluidización

Gupta y Mujumdar (1980) clasificaron tres tipos de curvas de caída de presión del lecho en función de la velocidad del gas. Esta variedad de curvas aparece dependiendo de la amplitud y de la frecuencia angular de las vibraciones, de la altura del lecho y de la densidad del lecho. En la Figura 1.4 se muestran estas curvas, que son similares a la exhibida en los lechos fluidizados normales.

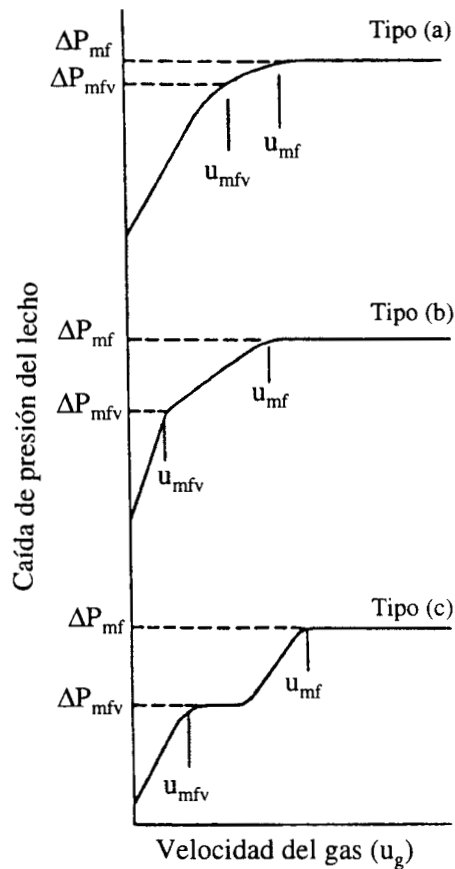


Figura 1.4 Curvas típicas de lechos vibrofluidizados.

Las curvas tipo (a) se obtienen con alturas de lecho grandes ($H > 5$ cm) y amplitudes pequeñas ($A < 0.03$ cm). Estas condiciones desfavorecen el efecto de las vibraciones, por lo que las gráficas son casi idénticas a las de lecho fluidizado.

Las curvas tipo (b) se generan cuando se operan rangos intermedios de amplitudes y alturas de lecho, por lo que existe una transición entre lecho fijo y lecho fluidizado.

Las curvas tipo (c) se obtienen cuando las vibraciones dominan la dinámica del lecho, y esto ocurre cuando se trabaja con amplitudes grandes y alturas de lecho pequeñas ($H < 5$ cm).

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES DEL SECADO DE TRIGO

CAPÍTULO 2

En este capítulo se mencionan algunos antecedentes importantes relacionados a la tecnología del secado de cereales, acerca de los lechos vibrofluidizados y los principales modelos que se han utilizado para simular el proceso de deshidratación de trigo.

ANTECEDENTES DEL SECADO DE TRIGO

2.1. Definición del problema

Este trabajo se enfoca a establecer un proceso de secado de granos de trigo, de fácil implementación, que sea económicamente rentable para ayudar así a reducir el alto desperdicio de este cereal en México.

Entre las técnicas que se aplican para conservar los granos, la operación de secado es con mucho la más importante y la más costosa, debido a los grandes volúmenes de producto que normalmente se manejan. Aún cuando en México, el secado al sol sigue siendo una técnica de mucho uso, la realidad es que por las inclemencias del tiempo, presencia de roedores, desechos de todo tipo, etc., su eficiencia es muy limitada. Otros aspectos relacionados con el problema del manejo de los granos, son por ejemplo, la presencia de microorganismos, desechos orgánicos, larvas, etc., los cuales favorecen su crecimiento por los altos contenidos de humedad, y el de su transportación al lugar donde se almacenará. Ante este panorama, la fluidización como tecnología aplicada al acondicionamiento de granos, previo a su almacenamiento, pudiera ser una magnífica alternativa, ya que por un lado, se tiene la enorme ventaja de que el grano será puesto en contacto eficientemente con el aire caliente y además, se someterá a un tratamiento homogéneo. Como la fluidización permite manejar a los sólidos como un fluido, estos pueden ser tratados en forma continua e inclusive transportarse. La gran desventaja se ubica en que es una tecnología cara, por sí sola.

Esto evidentemente plantea los siguientes retos:

Es necesario desarrollar una tecnología que permita acondicionar adecuadamente los granos que van a ser almacenados, con el fin de alargar su vida de anaquel.

Al tratar térmicamente a los granos, es necesario que se tome en cuenta el destino final de éstos, ya que si van a ser industrializados, las condiciones de secado pudieran ser más drásticas, con lo cual se lograría tratar una mayor cantidad de los mismos, en un menor tiempo. En cambio,

si su destino implica el que necesariamente se cuiden sus propiedades germinativas, entonces el tratamiento debe ser a temperaturas bajas.

Es evidente que el manejo de toneladas de granos por hora, impone la necesidad de concebir un proceso continuo para su tratamiento.

Debido a que la fluidización como tecnología es cara, es necesario pensar en algunas alternativas que permitan hacerla más atractiva. El sistema de lechos fluidizados vibrantes, pudiera ser una alternativa económicamente atractiva, ya que las cantidades necesarias de aire son sensiblemente menores, lo cual reduce a su vez los requerimientos energéticos para calentarlo.

Con base en lo anterior, se propone estudiar la deshidratación de trigo, empleando para ello la tecnología de lechos vibrofluidizados. Es por ello que se hizo una revisión crítica de la literatura para encontrar la metodología que se tenía que llevar a cabo para realizar la deshidratación del trigo.

2.2. Revisión bibliográfica

Una revisión del secado y sus fundamentos se pueden encontrar en trabajos como los de Vanecek (1966), Mujumdar (1987), Kunii y Levenspiel (1991). Un artículo pionero en el campo del secado de trigo fue el publicado por Becker y Sallans (1955). Brooker y Bakker (1974) realizaron un trabajo de secado de cereales donde mencionan a la difusión como paso controlante del proceso de secado.

Para saber si el trigo es un buen candidato para ser deshidratado en lechos vibrofluidizados, es necesario que sus propiedades físicas no se vean alteradas por el efecto de las vibraciones. Geldart (1990) y Kunii y Levenspiel (1991) describen cómo determinar propiedades físicas, como la densidad empacada, densidad aparente, el diámetro y esfericidad promedio de partícula, por métodos gravimétricos y volumétricos. En el trabajo de Geldart (1990) se hace una clasificación de partículas, donde los granos de trigo se clasifican como partículas tipo *D*, que se caracterizan por ser grandes y densas.

Szalay y col. (1995) hacen una selección del tipo de equipo vibracional que se puede utilizar para secar un material específico. Recomiendan que los materiales grandes y pesados, con un

bajo contenido de humedad como los cereales, pueden ser deshidratados en lechos vibrofluidizados sin temor a que sufran alguna degradación física.

Mujumdar (1987) señala que es importante determinar las características vibratorias del secador, con el objeto de llevar a cabo un análisis de sensibilidad del material con las vibraciones, para ello se determina la amplitud, la frecuencia angular y la intensidad vibratoria. Si la intensidad vibratoria es muy grande ($\Gamma > 10$) el material puede sufrir algún deterioro físico como la atrición.

Una vez obtenidas las propiedades físicas del trigo y los parámetros vibratorias del equipo, se realiza un estudio hidrodinámico-vibratorio del sistema gas-sólido en el lecho. Gupta y Mujumdar (1980) trabajaron en un lecho vibrofluidizado de área de sección transversal de 0.4 m^2 y con diferentes tipos de polímeros (polietileno tipo A y B) y gel de sílice para poder caracterizar el funcionamiento hidrodinámico en el lecho. Para ello variaron algunos parámetros como altura del lecho ($12.5 \times 10^{-3} - 100 \times 10^{-3} \text{ m}$), diámetro promedio de partícula ($900-3900 \text{ }\mu\text{m}$), amplitud ($0 - 5 \times 10^{-3} \text{ m}$), frecuencia angular ($0-105 \text{ s}^{-1}$), esfericidad de partícula ($0.55-1.00$) y densidad de partícula ($570-890 \text{ kg/m}^3$).

Gupta y Mujumdar (1980) propusieron diferentes correlaciones empíricas sobre la base de sus resultados experimentales para obtener la caída de presión del lecho vibrofluidizado, la velocidad mínima de fluidización y la velocidad mínima de vibrofluidización, dependiendo de si la intensidad de vibración es mayor o menor a la unidad. Aunque también la velocidad mínima de fluidización se puede determinar experimentalmente utilizando la metodología descrita por Kunii y Levenspiel (1991) y la velocidad mínima de vibrofluidización por Davidson y col. (1985).

Debido a que el secado es un proceso simultáneo de transferencia de calor y masa, es importante determinar las propiedades termodinámicas del trigo. La actividad de agua (a_w) ha sido reconocida como una propiedad termodinámica fundamental de los alimentos y que es importante en el control de calidad del producto, ya que permite analizar la durabilidad de los alimentos antes y después de la deshidratación, Rizvi y Benado (1984).

Existen diferentes expresiones matemáticas para determinar la actividad de agua, una de ellas es la propuesta por Chung y Pfof (1967) para cereales:

$$\ln a_w = -\frac{\alpha}{RT} \exp(-\beta X) \quad (2.1)$$

donde α y β son constantes y sus valores dependen de que tipo de cereal se está utilizando, T es la temperatura del cereal y X es el contenido de humedad del cereal en base seca.

Strumillo y Adamiec (1996) denotan que la actividad de agua (a_w) es un parámetro básico de secado, el cual describe el estado físico de un alimento. Los cambios específicos en el color, aroma, textura y estabilidad están relacionados con la actividad de agua. Los alimentos que tienen un porcentaje por encima del 60% de actividad de agua presentan problemas de microorganismos en su estructura, mientras que los alimentos que están por debajo del 60% de (a_w) no presentan proliferación de microorganismos.

Otra propiedad termodinámica importante es el calor isostérico (ΔH_{evap}) que determina la cantidad de energía que se requiere para deshidratar una unidad de masa de alimento; también es un parámetro que se utiliza en las ecuaciones de diseño para poder dimensionar el tamaño de los secadores industriales (Rizvi y Benado, 1984).

Dadas las propiedades físicas y termodinámicas del trigo, y las características hidrodinámicas-vibracionales en el lecho, se pueden analizar los modelos de secado utilizados en la deshidratación del trigo. Reay y Allen (1982) describen el efecto de la temperatura del lecho sobre las curvas de secado en operación por lotes de la deshidratación de resinas y trigo en un lecho fluidizado. Proponen una técnica que permite obtener curvas de lecho isotérmico en una operación por lotes a partir de curvas de secado a una temperatura constante de alimentación del gas.

Reay y Allen (1986) predicen el funcionamiento de un secador a nivel planta piloto de lecho fluidizado perfectamente mezclado en operación continua utilizando el modelo descrito por

Vanecek (1966). Este trabajo es una extensión del artículo publicado en 1982, y los materiales que utilizan son los mismos, resinas y trigo. Los resultados más importantes que encontraron fueron que la velocidad del gas y la altura del lecho tienen poca influencia en la deshidratación, pero la temperatura del lecho es la variable más importante en el secado de trigo.

Zahed y Epstein (1992) proponen un modelo de equilibrio térmico controlado por difusión interna, el cual da una buena representación del proceso de secado para tres tipos de cereales (arroz, maíz y trigo) en un lecho borbotante o fluidizado en operación continua y por lotes. Se hacen algunas suposiciones para simplificar el modelo. Algunas suposiciones se justifican experimentalmente. Las más importantes son:

- Los granos de cereal son uniformes en tamaño y cercanos a la forma esférica.
- Las partículas no sufren encogimiento durante el secado.
- La difusión interna controla el proceso de secado.
- La migración de la humedad de cada partícula es en dirección radial
- Los gradientes de temperatura dentro del cereal son despreciables en comparación con los gradientes de humedad.
- Las paredes del secador están aisladas.

Este modelo es de parámetros no ajustables, es decir, los parámetros físicos, termodinámicos y de transporte son obtenidos de experimentos independientes a la cinética de secado. Las ecuaciones gobernantes del secado por lotes y en continuo se resuelven numéricamente por el método de diferencias finitas.

El modelo predice con bastante exactitud la temperatura y el contenido de humedad del arroz en la operación por lotes, pero trabajando a temperatura constante del aire inicial relativamente baja (40 °C) y realizando simulaciones a intervalos de tiempo cortos (~35 min.). En cuanto a los resultados obtenidos para el trigo en continuo, sólo se reportan los perfiles de temperatura con un error del 10 % en comparación a los experimentales.

Vizcarra y col. (1998) realizaron la deshidratación del trigo (variedad Salamanca) en un secador a nivel laboratorio de lecho fluidizado. Modelaron el proceso de secado por lotes utilizando el modelo de Zahed y Epstein. Encontraron que el modelo comienza a tener deficiencias considerables cuando se trabaja a temperaturas de alimentación de gas elevadas ($T > 60$ °C), ya que los perfiles de humedad comienzan a estar muy por debajo de los datos experimentales a tiempos mayores de 30 min de secado. Los autores concluyen que el principal factor que altera los resultados, es la difusividad efectiva (D_m), por lo que proponen una correlación para determinar esta propiedad de transporte en el secado de trigo:

$$D_m = 0.0097 \exp \left[-\frac{4909.5}{T} + (35.1811 - 0.11256 \bar{X}) \right] \quad (2.2)$$

Baker (1999) predice en base a un algoritmo computacional el funcionamiento y el consumo específico de energía de un secador perfectamente mezclado. El algoritmo está planteado por los balances de materia y energía del proceso continuo de secado. El autor toma como datos, los reportados por Reay y Allen (1982), es decir, las cinéticas de secado del trigo y modela el contenido de humedad promedio del producto por la ecuación propuesta por Vanecek (1966):

$$X_{prom} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\infty} X(t) \exp \left(-\frac{t}{\tau} \right) dt \quad (2.3)$$

A diferencia del modelo de Zahed y Epstein (1992), en este trabajo se pueden tomar en cuenta las pérdidas de calor del equipo hacia los alrededores, por lo que el equipo puede no trabajar adiabáticamente. Los resultados obtenidos por el autor predicen que para un rango de temperaturas del lecho isotérmico entre 40 y 80 °C, el consumo específico de energía del secador está entre los 200,000 y 1,000,000 kJ/kg de agua evaporada, por lo que se concluye que el proceso de secado en lecho fluidizado es altamente ineficiente y no es económicamente rentable. El consumo específico de energía disminuye con el incremento de la cantidad de granos dentro del lecho y se incrementa con el aumento del flujo de aire.

CAPÍTULO 3

MÉTODOS

TEÓRICOS

CAPÍTULO 3

En este capítulo se analizan dos modelos matemáticos, uno, que llamaremos de parámetros ajustables, el cual se desarrolla tomando en cuenta el trabajo experimental realizado, y el otro, que es un modelo establecido en la literatura y que llamaremos, modelo homogéneo, ya que no distingue entre las fases burbuja y emulsión. También se presentan las principales ecuaciones de los modelos, se describe la metodología que se implementó para calcular el consumo específico de energía en el proceso de secado en continuo. Finalmente se presentan los objetivos e hipótesis de este trabajo.

MÉTODOS TEÓRICOS

3.1. Modelo de parámetros ajustables

La limitada existencia de modelos matemáticos relacionados con la operación de secado en sistemas de lecho vibrofluidizado, plantea la necesidad de realizar estudios experimentales para obtener información acerca de su comportamiento y de esta manera, sentar las bases que permitan establecer los modelos matemáticos que ayuden a simular el proceso.

En el caso específico de secado en sistemas vibrofluidizados, un buen número de parámetros pueden influir en el tratamiento de éstos, como pueden ser: temperatura y humedad de alimentación del gas, temperatura del lecho, flujos de sólidos y gas, altura del lecho y la intensidad vibracional, entre otros.

En este modelo de parámetros ajustables, se comienza por establecer experimentalmente la cinética de secado, utilizando para ello el secador de lecho vibrofluidizado operando sin circulación de sólidos (operación por lotes). De esta manera es posible contar con datos cinéticos obtenidos bajo condiciones similares a las que se tienen durante la operación continua del secador. De pruebas experimentales previas, se corrobora que el secado de trigo es afectado principalmente por la temperatura de operación del secador, y parámetros como la velocidad superficial del aire, altura del lecho, e intensidad vibracional, prácticamente no influyen en el comportamiento del secado de trigo.

Como es difícil, en la práctica, mantener constante la temperatura del lecho, ya que se requiere de un control sofisticado para lograrlo, que consiste en ajustar simultáneamente la temperatura de alimentación del aire, conforme se va secando el sólido, 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 en condiciones adiabáticas, manteniendo constante la temperatura de alimentación del aire y registrando la evolución de la temperatura de alimentación del aire y la evolución de la temperatura del lecho durante el tiempo que dura la operación.

$$\frac{(\Delta t)_{is}}{(\Delta t)_1} = \frac{\left[(P_s - P_v)(X - X_e) \right]_{T_1}}{\left[(P_s - P_v)(X - X_e) \right]_{T_u}} \quad (3.1)$$

Utilizando la ecuación (3.1) propuesta por Reay y Allen (1982) para obtener la curva de secado a temperatura constante del lecho, se puede obtener la curva isotérmica, que se presenta en la Figura 3.1a, a partir de la curva adiabática, representada en la misma figura. La gráfica 3.1b presenta la tasa de secado ($-dX/dt$) en función del contenido de humedad (X). Esta gráfica a su vez, permite comprobar cuantos periodos de secado existen, ya sea de rapidez constante de secado como de rapidez decreciente de secado. En este último caso puede existir más de un periodo de secado decreciente. Esta operación se repite para diferentes temperaturas de alimentación del aire al secador, obteniendo las respectivas curvas isotérmicas de secado.

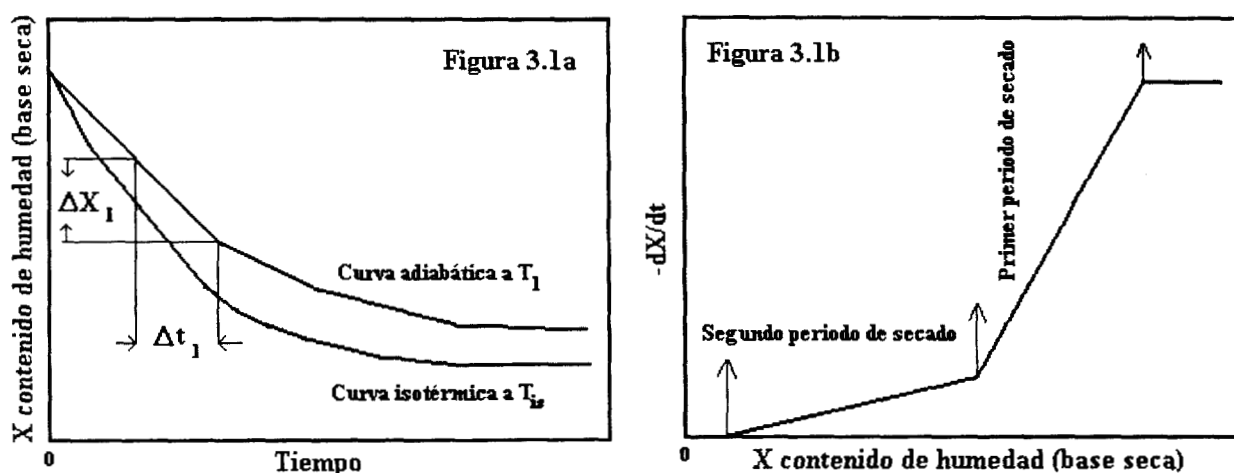


Figura 3.1 Cinética de secado de sólidos.

Del análisis de los periodos de secado del trigo, se supone una cinética de primer orden y se representa de la siguiente manera:

$$-\frac{dX}{dt} = k X \quad (3.2)$$

Esta expresión se integra, considerando que a $t = 0$, $X = X_0$:

$$X = X_0 \exp(-kt) \quad (3.3)$$

La constante de la velocidad de secado puede describirse por la ley de Arrhenius, para establecer así su dependencia con la temperatura,

$$k = A_0 \exp(-B_0/T) \quad (3.4)$$

El perfil experimental de temperatura del lecho, que se obtiene de cada prueba de secado por lotes, también se puede correlacionar ajustando los valores experimentales a una línea recta, o bien, a un polinomio de orden n :

$$T(t) = a + b t \quad (3.5)$$

$$T(t) = a + b t + c t^2 + d t^3 + \dots + z t^n \quad (3.6)$$

Sustituyendo las ecuaciones (3.4), (3.5) y/o (3.6) en (3.3), resulta la cinética de secado como:

$$X(t) = X_0 \exp \left[-A_0 \exp \left(\frac{-B_0}{T(t)} \right) t \right] \quad (3.7)$$

Finalmente, se modela el proceso de secado en lecho vibrofluidizado en continuo (Reay y Allen, 1986; Chandran y col.,1990), a partir de la cinética de secado y de la distribución de tiempos de residencia del trigo en el equipo, utilizando la siguiente expresión:

$$X_{prom} = \int_0^{\infty} X(t) E(t) dt \quad (3.8)$$

donde X_{prom} es la humedad promedio de partícula a la salida del secador al estar operando en continuo y $E(t)$ es la función de distribución de tiempos de residencia del trigo, la cual se determina experimentalmente.

La metodología de cálculo se puede resumir en los siguientes apartados:

- 1) Obtener la curva de secado en operación por lotes a temperatura constante de entrada del aire.
- 2) Dividir la curva de secado en incrementos de humedad (ΔX) y determinar el tiempo (Δt) en condiciones adiabáticas.
- 3) Calcular el tiempo requerido para alcanzar el mismo contenido de humedad que se obtuvo con la curva de temperatura constante de entrada del aire, pero ahora suponiendo temperatura de lecho constante y utilizando la ecuación (3.1).
- 4) Con los datos obtenidos en el inciso anterior, se construye la curva de temperatura de lecho isotérmico (Figura 3.1a).
- 5) Determinar la curva de velocidad de secado en función de la humedad (Figura 3.1b).
- 6) Determinar cuántos y qué tipos de periodos de secado existen en el secado de trigo en lecho vibrofluidizado.
- 7) A partir de una familia de curvas de secado a diferentes temperaturas de lecho constante, y graficando $(\ln k \text{ vs } 1/T)$ que es la forma linealizada de la Ecuación (3.4), se obtiene la constante de la velocidad de secado para cada periodo de secado.
- 8) Si la deshidratación del trigo presenta dos periodos de secado, la Ecuación (3.7) toma la forma siguiente:

$$X(t) = X_1 \exp \left[-A_1 \exp \left(\frac{-B_1}{T(t)} \right) t \right] + X_2 \exp \left[-A_2 \exp \left(\frac{-B_2}{T(t)} \right) t \right] \quad (3.9)$$

- 9) La función de distribución de tiempos de residencia de los sólidos $E(t)$ en el secador se determina en forma experimental como se describe en la sección 4.7.2. y se modela matemáticamente utilizando el método numérico de trazadores cúbicos (Burden y Faires, 1985).
- 10) Con las ecuaciones (3.9), (3.5) y/o (3.6) y la distribución de tiempos de residencia se calcula la humedad promedio del grano a la salida del equipo para la operación continua, mediante la siguiente expresión:

$$X_{prom} = \int_0^{t_1} X_1 \exp\left[-A_1 \exp\left(\frac{-B_1}{T(t)}\right)t\right] E(t) dt + \int_{t_1}^{\infty} X_2 \exp\left[-A_2 \exp\left(\frac{-B_2}{T(t)}\right)t\right] E(t) dt \quad (3.10)$$

3.2. Modelo Homogéneo

Se seleccionó el modelo homogéneo propuesto por Zahed y Epstein (1992) debido a que se usan parámetros no ajustables, lo que significa que el modelo requiere la introducción de valores provenientes de experimentos independientes, esto robustece el modelo a la vez que valida los parámetros utilizados.

Este modelo originalmente se desarrolló para utilizarlo en el secado de cereales en lecho borboteante y fluidizado. En el presente trabajo, se hicieron las siguientes suposiciones para caracterizar el secado en el lecho vibrofluidizado en la fase densa:

- Los granos de trigo son uniformes en tamaño, internamente homogéneos y con una esfericidad cercana a la unidad.
- Durante el secado las partículas no sufren encogimiento o atrición. Las propiedades físicas del trigo permanecen constantes en el tiempo.
- El paso controlante en el proceso de secado es la difusión interna de la humedad a la superficie del grano. La migración de la humedad se lleva a cabo en dirección radial.
- Los gradientes de temperatura dentro del sólido son despreciables en comparación con los gradientes de humedad.

- Los granos de trigo están lo suficientemente mezclados en el lecho, de tal forma que al muestrear cualquier partícula, ésta indica la temperatura y el contenido de humedad de los demás granos en el lecho.
- Las paredes del secador son esencialmente adiabáticas, para evitar la transferencia de calor entre las paredes del equipo y el medio ambiente.
- La vibrofluidización no introduce efectos particulares que deban ser tomados en cuenta al aplicar este modelo.

El modelo homogéneo consta de las siguientes ecuaciones:

Balance de masa y energía considerando la temperatura del aire igual a la del grano para cualquier tiempo t , como función de la humedad relativa del aire, el calor isostérico y la humedad de la partícula

$$\text{Balance de masa:} \quad m_A (Y - Y_1) = -m_B \frac{d\bar{X}}{dt} \quad (3.11)$$

Balance de energía:

$$m_A [(C_A + Y_1 C_V)(T_1 - T) - (Y - Y_1)\Delta H_{\text{evap}}] = m_B (C_B + \bar{X} C_W) \frac{dT}{dt} \quad (3.12)$$

$$\text{C.I.} \quad t=0; \quad T=T_0 \quad (3.13)$$

La forma de calcular \bar{X} proviene de la solución a la ecuación de difusión en coordenadas esféricas:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_m \left[\frac{\partial^2 X}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial X}{\partial r} \right] \quad (3.14)$$

Con las siguientes condiciones inicial y a la frontera:

$$\text{C.I} \quad t = 0; \quad 0 \leq r \leq R_p; \quad X = X_0 = \bar{X} \quad (3.15)$$

$$\text{C.F.I.} \quad t \geq 0; r = 0; X \rightarrow \text{finito}; \frac{dX}{dr} = 0 \quad (3.16)$$

$$\text{C.F.II.} \quad t > 0; r = R_p; -D_m A_s \frac{\partial(X\rho_p)}{\partial r} = \frac{m_B}{n} \left(-\frac{d\bar{X}}{dt} \right) \quad (3.17)$$

Donde n es el número de granos en el lecho y está definido como:

$$n = \frac{m_B}{\rho_p V_s} \quad (3.18)$$

Sustituyendo (3.11) y (3.18) en (3.17) se obtiene la segunda condición de frontera para la ecuación (3.14)

$$\text{C.F.II.} \quad r = R_p; \frac{\partial X}{\partial r} = -\frac{m_A(Y - Y_1)V_s}{m_B D_m A_s} \quad (3.19)$$

Como la humedad es función de la posición, se define un contenido volumétrico promedio de humedad en los granos:

$$\bar{X}(t) = \frac{4\pi}{V_s} \int_0^{R_p} r^2 X(r, t) dr \quad (3.20)$$

La difusión de humedad puede considerarse una función exponencial de la temperatura, del tipo ley de Arrhenius:

$$D_m = D_0 \exp\left[\frac{-E_0}{RT}\right] \quad (3.21)$$

donde D_0 y E_0 a su vez, pueden ser función de la humedad, lo que sugiere la aplicación de correlaciones empíricas (Vizcarra y col., 1998). Zahed y Epstein (1992) proponen utilizar la correlación de Becker y Sallans (1961) para el trigo:

$$D_m = 4600 \exp(-6140/T) \quad (3.22)$$

El sistema de ecuaciones (3.14) a (3.16), (3.19) y (3.20) se adimensiona de la siguiente manera:

$$\xi = r/R_p; r = \xi R_p; dr = R_p d\xi \quad (3.23)$$

Posteriormente el mismo sistema de ecuaciones se transforma de coordenadas esféricas a coordenadas rectangulares con el siguiente cambio de variables:

$$u = \xi^2; du = 2\xi d\xi \quad (3.24)$$

El nuevo sistema de ecuaciones queda de la siguiente forma:

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{4}{R_p^2} \left[D_m \left(u \frac{\partial^2 X}{\partial u^2} + \frac{3}{2} \frac{\partial X}{\partial u} \right) + u \frac{\partial D_m}{\partial X} \left(\frac{\partial X}{\partial u} \right)^2 \right] \quad (3.25)$$

$$\text{C. Inicial} \quad t = 0; X = X_0 = \bar{X} \quad (3.26)$$

$$\text{C.F.I.} \quad t \geq 0, r = 0, \frac{\partial X}{\partial u} = 0 \quad (3.27)$$

$$\text{C.F.II.} \quad t \geq 0, r = R_p, \frac{\partial X}{\partial u} = -\frac{m_A(Y - Y_1)V_s}{m_B D_m A_s} \quad (3.28)$$

Contenido de humedad promedio dentro de la partícula:

$$\bar{X}(t) = \frac{3}{2} \int_0^1 X u^{0.5} du \quad (3.29)$$

Si el gas de fluidización es aire, como en muchos casos, la humedad absoluta del gas puede ser expresada (Brooker y col., 1974) como:

$$Y = \frac{0.622 a_w P_v}{(P - a_w P_v)} \quad (3.30)$$

La presión de vapor está dada por una relación empírica (Kiefer y col., 1941)

$$P_v = 100 \exp \left[27.0214 - \frac{6887}{T} - 5.31 \ln \left(\frac{T}{273.15} \right) \right] \quad (3.31)$$

Para la actividad de agua, Zahed (1992) utiliza las isotermas de desorción representadas por la ecuación de Henderson (1952), que tiene la siguiente forma:

$$a_w = 1 - \exp \left[-K (100 X_e)^N (T - 273.15 + c) \right] \quad (3.32)$$

Puede observarse que la ecuación para a_w posee tres constantes empíricas que tienen valores específicos para el trigo y Zahed (1992) los proporciona en su trabajo ($K=2.3008 \times 10^{-5}$ K, $N=2.2857$ y $c=55.82$). La correlación de la Ecuación (3.32) no es la única para el ajuste de a_w ; Rizvi y Benado (1984) presentan un resumen de las ecuaciones utilizadas y su aplicación para diversos alimentos. El valor de X_e se obtiene al resolver (3.29) con el valor de $X(R_p, t) = X_e$.

La entalpía de desorción es una función tanto de la temperatura y del contenido de humedad, por lo que Zahed (1992) propone la siguiente correlación:

$$\Delta H_{evap} = R_v T^2 \left[\left(\frac{6887}{T^2} \right) - \left(\frac{5.31}{T} \right) + \left(\frac{(1 - a_w) K (100 X_e)^n}{a_w} \right) \right] \quad (3.33)$$

Proporcionando los valores de m_A , m_B , C_A , C_B , C_V , C_W , X_0 , T_0 , Y_1 y las propiedades geométricas de los granos de trigo; el sistema formado por el balance de energía (3.12) y su condición inicial (3.13), la ecuación de difusión (3.25) con sus condiciones iniciales y de frontera (3.26) a (3.29), así como las ecuaciones auxiliares (3.30) a (3.33) pueden resolverse para estimar los valores de Y , T y \bar{X} como función del tiempo para el secado de granos de trigo mediante un secador de lecho vibrofluidizado. La solución de estos sistemas de ecuaciones fue utilizando el método numérico de trazadores cúbicos (Burden y Faires, 1985).

El funcionamiento del secador en operación continua puede predecirse a partir de los balances de materia y energía aplicados al estado estacionario, y que se representan de la siguiente manera:

$$\text{Balance de masa:} \quad m_A (Y - Y_1) = m_b (X_0 - X_{prom}) \quad (3.34)$$

Balance de energía:

$$[m_A (C_A + Y_1 C_V) + m_b (C_B + X_0 C_W)] (T_1 - T) - m_b (C_B + X_0 C_W) (T_1 - T_0) = m_A \Delta H_{evap} (Y - Y_1) \quad (3.35)$$

Dados los valores de m_A , m_B , m_b , C_A , C_B , C_V , C_W , X_0 , T_0 , T_1 , Y_1 y las propiedades geométricas de los granos de trigo, las ecuaciones (3.34) y (3.35) pueden ser resueltas para conocer Y , T y X_{prom} auxiliándose de las ecuaciones (3.8) y (3.30) a (3.33). Para resolver los sistemas de ecuaciones también se utilizó el método de trazadores cúbicos.

3.3. Consumo específico de energía en el proceso de secado

Se utilizó el algoritmo descrito por Baker (1999) para calcular el consumo específico de energía en el proceso de secado de trigo al operar en continuo. Este algoritmo se basa principalmente en los balances de materia y energía del sistema. Además, este trabajo presenta resultados para un secador de lecho fluidizado con datos de gasto de aire, contenidos de humedad semejantes a los utilizados en el secado en lecho vibrofluidizado y que sirven como punto de comparación entre las dos tecnologías de fluidización.

La metodología de cálculo del algoritmo se divide en los siguientes pasos:

1. Convertir la curva de secado por lotes obtenida experimentalmente en condiciones adiabáticas a una curva de temperatura constante del lecho utilizando la metodología descrita por Reay y Allen (1982).
2. Determinar el tiempo de residencia para reducir el contenido de humedad de X_1 a X_2 utilizando la ecuación (3.10)
3. Calcular la tasa de alimentación de los sólidos

$$F = \frac{W}{A_t \tau} \quad (3.36)$$

4. Calcular la humedad del aire a la salida del secador

$$Y = Y_1 + \frac{F(X_0 - X_2)}{G} \quad (3.37)$$

5. Calcular la entalpía del aire a la entrada y a la salida del secador

$$H_i = H_o (1 + f_q) + \frac{F(h_o - h_i)}{G} \quad (3.38)$$

$$H_o = (C_A + Y C_V)(T_b - T_{ref}) + Y \Delta H_{evapT_{ref}} \quad (3.39)$$

$$h_i = (C_B + X_0 C_w)(T_a - T_{ref}) \quad (3.40)$$

$$h_o = (C_B + X_2 C_w)(T_b - T_{ref}) \quad (3.41)$$

$$f_q = \frac{Q_i}{GH_o} \quad (3.42)$$

6. Calcular la potencia requerida para calentar el aire que entra en el secador

$$Q_{hr} = G(H_i - H_a) \quad (3.43)$$

7. Calcular el consumo específico de energía del secador

$$E_s = \frac{Q_{hr}}{F(X_0 - X_2)} \quad (3.44)$$

3.4. Justificación

En la actualidad, es necesario desarrollar nuevos procesos tecnológicos en el campo del secado de cereales, que permitan reducir el alto desperdicio de estos y alargar su vida comercial de anaquel. Es por ello, que este trabajo se orienta al estudio de la deshidratación del trigo, cultivo de gran importancia en México por sus propiedades nutritivas, utilizando la tecnología del lecho vibrofluidizado.

La tecnología del lecho vibrofluidizado ofrece la ventaja de que el grano será puesto en contacto con el aire eficientemente para tener un tratamiento térmico más homogéneo y reducir los consumos de energía en comparación con los de lecho fluidizado.

3.5. Objetivos

El objetivo principal de este trabajo es estudiar el comportamiento de los sistemas vibrofluidizados, aplicados al secado de trigo a nivel planta piloto, para lo cuál se propone una metodología experimental que conduce al planteamiento de un modelo de parámetros ajustables y a la validación de un modelo de parámetros no ajustables conocido como modelo homogéneo.

Para ello son necesarios los siguientes objetivos particulares:

1. Determinar los parámetros vibracionales del secador de lecho vibrofluidizado.
2. Determinar las propiedades físicas, de transporte y termodinámicas del trigo.
3. Caracterizar la hidrodinámica del sistema aire-trigo en el lecho vibrofluidizado.
4. Ubicar el régimen de fluidización y la clasificación de los granos de trigo.
5. Realizar el secado en lecho vibrofluidizado y obtener la cinética de secado.
6. Comparar las cinéticas de secado experimentales con las predichas por los modelos de parámetros ajustables y de parámetros no ajustables.
7. Comparar las humedades promedio obtenidas en el secado continuo con las predicciones realizadas por los modelos de parámetros ajustables y de parámetros no ajustables.
8. Calcular el consumo específico de energía del secador de lecho vibrofluidizado en la operación continua.

3.6. Hipótesis

- Es posible aplicar modelos matemáticos que explican el comportamiento de lechos fluidizados a los sistemas de lecho vibrofluidizado.
- Los secadores de lecho vibrofluidizado reducen el consumo específico de energía con respecto a los de lecho fluidizado.
- El trigo presenta una cinética de secado controlada por efectos de difusión interna.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

EXPERIMENTAL

CAPÍTULO 4.

En este capítulo se describen como se llevaron a cabo los diferentes experimentos para determinar las propiedades físicas y termodinámicas del trigo, la hidrodinámica del lecho y como se efectuaron los procesos de secado en operación por lotes y en continuo.

METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

La metodología experimental se puede dividir, para una mejor organización en cinco partes, las que a continuación se enumeran:

- 1) Determinación de parámetros vibracionales.
- 2) Determinación de propiedades físicas de los granos de trigo.
- 3) Caracterización hidrodinámica-vibracional del sistema sólido-aire.
- 4) Obtención de propiedades termodinámicas.
- 5) Secado en lecho vibrofluidizado.

4.1. Material

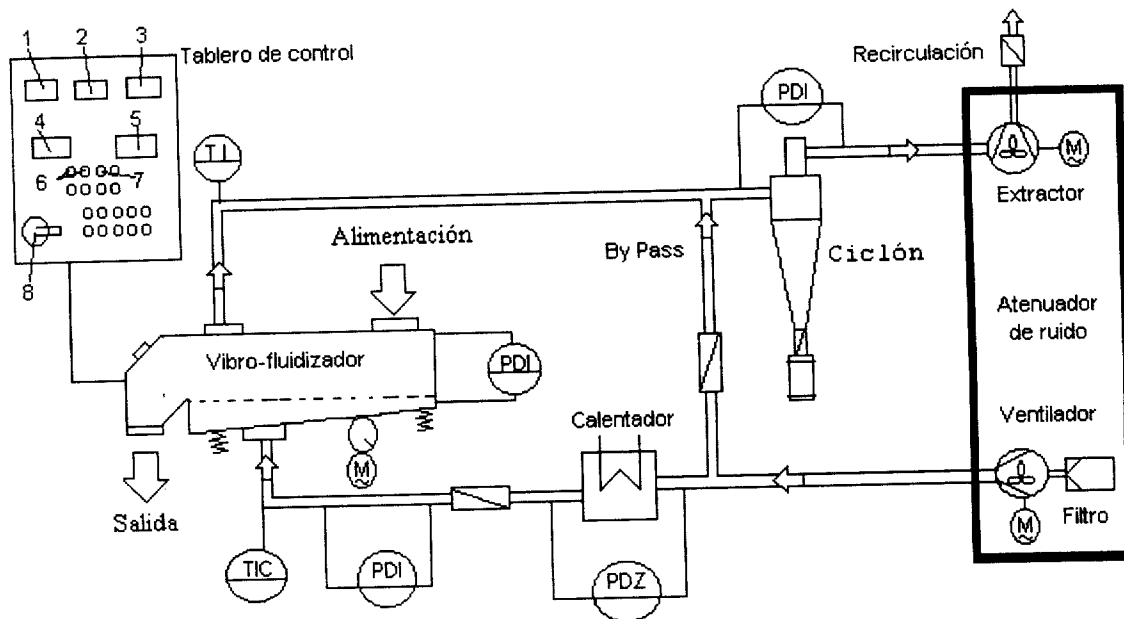
Se utilizó trigo de la variedad conocida como trigo común blando (*triticum aestivum*), el trigo se obtuvo en el Estado de México. El porcentaje de humedad que poseen originalmente estos granos es de 13 a 15 % en base seca.

4.2. Secador de lecho vibrofluidizado (marca Niro)

En la Figura 4.1 se esquematiza el equipo experimental de lecho vibrofluidizado donde se llevo a cabo la deshidratación del trigo. El equipo contiene los siguientes accesorios:

- El secador es un aparato comercial a nivel planta piloto que tiene una área de sección transversal de 0.30 m^2 . En la parte inferior del secador se localiza un motor centrífugo de 1 hp, en el eje del rotor se encuentran incrustadas unas poleas concéntricas que pueden colocarse en cinco posiciones diferentes, lo que permite tener cinco intensidades vibracionales distintas en el lecho. En cada costado del secador se tiene un resorte de acero que tiene la función de amortiguar el efecto de las vibraciones.

- El flujo de aire se obtiene a partir de un turboventilador integrado al equipo. El turboventilador puede suministrar un flujo de aire de hasta $0.35 \text{ m}^3/\text{s}$. El flujo de aire al secador es regulado por medio de una válvula de mariposa.



- | | |
|-------------------------------------|------------------------------------|
| 1- Flujo de aire a la entrada | 5- Temperatura de aire a la salida |
| 2- Caída de presión en el lecho | 6- Ventilador |
| 3- Caída de presión en el ciclón | 7- Vibrador |
| 4- Temperatura de aire a la entrada | 8- Interruptor principal |

Figura 4.1 Equipo experimental para el secado en lecho vibrofluidizado.

- El calentamiento del aire se lleva a cabo por medio de un calentador que se controla utilizando un sistema on-off, con una variación de $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$. También se tiene un ciclón donde se almacenan los materiales finos o basuras que se encuentran en el lecho. Existe un sistema de recirculación de aire (by pass) que se puede utilizar para optimizar la operación del secado. Hay un extractor que es el dispositivo que elimina el aire húmedo del sistema y lo lleva al medio ambiente.

- Finalmente, el equipo cuenta con un tablero de control donde se registra el flujo de aire, la temperatura del aire a la entrada y a la salida del secador, la caída de presión en el ciclón, en el lecho e interruptores de encendido y apagado del turboventilador, del motor que induce las vibraciones. Además en el tablero de control hay cinco botones que controlan el calentamiento del aire, pudiendo calentar a éste hasta 200 °C.

El secador de lecho vibrofluidizado tiene un plato distribuidor de tipo comercial conocido como plato flexible tipo XLN. En la Figura 4.2 se muestra este tipo de distribuidor, que es conocido en la industria como plato multifiltro, el cual da una mejor distribución del aire en comparación con los platos comúnmente usados, como los platos multiorificicios o sínterizados.

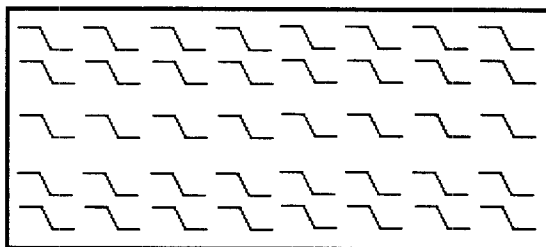


Figura 4.2 Plato distribuidor multifiltro, tipo XLN.

4.3. Parámetros vibracionales

4.3.1. Frecuencia de vibración

Mediante un estroboscopio (marca Ametek, mod. 964-A) (ver Figura 4.3) se mide la velocidad del motor que en conjunto con las poleas concéntricas inducen las vibraciones. Se hizo pasar un haz de luz que genera el estroboscopio hacia el rotor del motor, de tal manera que el rotor parece que ya no gira, en ese momento se mide la frecuencia de vibración en revoluciones por minuto.

4.3.2. Amplitud

Se colocó un vernier (marca Scala) en posición perpendicular al plato distribuidor del secador de lecho vibrofluidizado sujetándolo con un tripie. Se aplicaron vibraciones al equipo y con el estroboscopio se visualiza el máximo desplazamiento que alcanza el plato con respecto a

su posición de equilibrio (estado estático). Con el vernier se midió este desplazamiento para cada una de las posiciones de las poleas concéntricas.

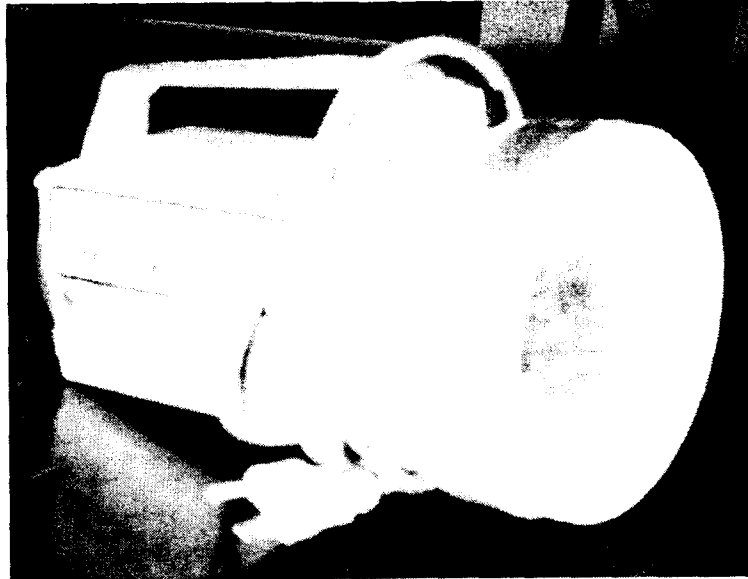


Figura 4.3 Estroboscopio.

4.4. Determinación de propiedades físicas de los granos de trigo

Se evaluaron los parámetros: densidad empacada, densidad aparente, diámetro promedio de partícula utilizando la metodología descrita por Geldart (1990), y el diámetro efectivo por la metodología de Keey (1992). El porcentaje de humedad del trigo con el que se hicieron los experimentos fue del 13% en base seca.

4.4.1. Densidad empacada.

En una probeta se colocaron granos de trigo hasta un volumen conocido. Esta masa de trigo, que llena el volumen, se pesa en una balanza analítica (marca Ohaus) y se procedió a dividir la masa entre el volumen para conocer la densidad empacada. La ecuación que se utilizó para el cálculo de esta propiedad física se puede revisar en el Apéndice A.

4.4.2. Densidad aparente.

En una probeta se colocaron granos de trigo hasta un volumen conocido. La masa de trigo que llena el volumen, se pesó en una balanza analítica (Ohaus Mod. Analytical plus). Posteriormente se procedió a medir el volumen de los huecos que hay entre los granos introducidos en la probeta, por medio de la adición de aceite comestible. Se utilizó aceite comestible para evitar la penetración de este fluido en el interior de los granos. Con los parámetros de volumen de la probeta, volumen de aceite introducido y peso del trigo se pudo calcular la densidad aparente mediante la ecuación descrita en el Apéndice A.

4.4.3. Diámetro promedio de partícula

En una probeta se colocaron granos de trigo hasta un volumen conocido. La masa de trigo que llena el volumen, se pesó en una balanza analítica (marca Ohaus) y se procedió a contar el número de granos que contenía la probeta, entonces mediante la ecuación descrita en el Apéndice A se calculó el diámetro promedio de partícula.

4.4.4. Diámetro efectivo de partícula

Se midieron las dimensiones características del trigo como la longitud, el grosor y la altura del grano. Una vez calculadas las dimensiones se utilizaron en la expresión formulada en el Apéndice A para determinar el diámetro efectivo promedio de partícula.

4.5. Caracterización hidrodinámica-vibracional

4.5.1. Velocidad mínima de fluidización.

Para este proceso se ocupó el equipo experimental de lecho fluidizado esquematizado en la Figura 4.4, el cual consiste en un tubo de acrílico de 0.095 m de diámetro interno por 0.45 m de altura por el que pasa un flujo de aire controlable por medio de válvulas. El flujo de aire se mide por medio de rotámetros (m^3/s). En este sistema se cargan muestras de 0.5 kg de granos con un contenido de humedad del 13% en base seca, y se hace pasar un flujo de aire que se incrementa paulatinamente, midiéndose los cambios de presión por medio de un manómetro de U.

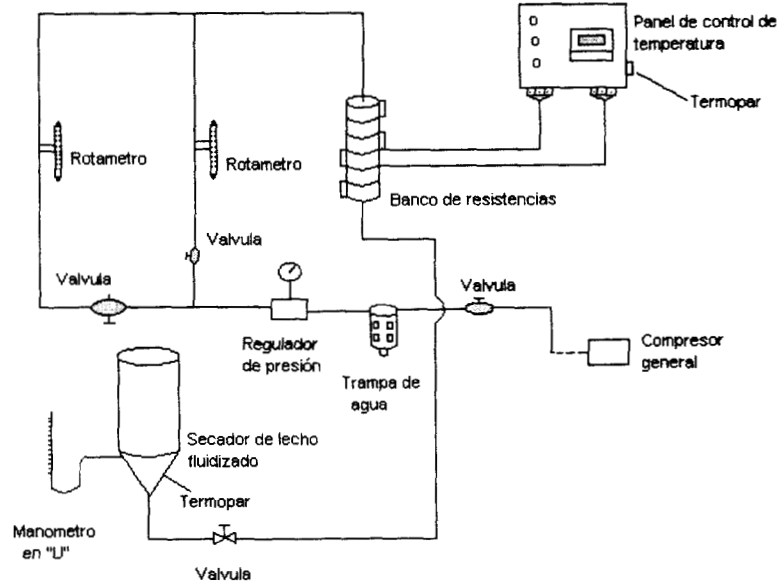


Figura 4.4 Equipo experimental para la determinación de la velocidad mínima de fluidización.

La velocidad mínima de fluidización se detectó en forma física por medios visuales, es decir, cuando el lecho paso de ser estático a ser dinámico. Una vez alcanzada la mínima se disminuye gradualmente el flujo hasta alcanzar el punto de inicio. Se trabajó a temperatura ambiente, alrededor de 18 a 20 °C.

4.5.2 Fracción de espacios vacíos a las condiciones de mínima de fluidización

Simultáneamente a la determinación de la velocidad mínima de fluidización, se midió la longitud del lecho y la caída de presión a las condiciones de mínima de fluidización. Mediante la ecuación formulada por Kunii y Levenspiel (1991) se obtuvo la fracción de espacios vacíos (ver Apéndice B).

4.5.3. Velocidad mínima de vibrofluidización

Esta propiedad se obtuvo vía el dispositivo mostrado en la Figura 4.1, donde el flujo de aire se reguló mediante una válvula de mariposa. En este sistema se cargaron muestras de 8, 10 y 12 kg de trigo con un contenido de humedad del 13% en base seca. Al inicio de la prueba la válvula de mariposa estaba totalmente cerrada, de tal forma que se fue incrementando paulatinamente el flujo de aire, registrándose la caída de presión en el lecho por medio del panel de control que tiene el equipo. Una vez alcanzado el máximo flujo de aire permisible en el secador se comenzó a disminuir gradualmente el flujo hasta alcanzar el punto de inicio. Este experimento se hizo para cada una de las posiciones de poleas con que cuenta el equipo, y poder conocer el efecto de las vibraciones y la masa del lecho sobre la velocidad mínima de vibrofluidización. Se trabajó a temperatura ambiente (18 a 20 °C).

4.6. Determinación de propiedades termodinámicas

4.6.1. Capacidad calorífica del grano

La capacidad calorífica del trigo se determinó por medio de un calorímetro diferencial de barrido (DSC, marca TA instruments) modelo 2010, el cual se muestra en la Figura 4.5. El aparato consta de dos celdas que forman el calorímetro cilíndrico, un rotámetro que regula el flujo de nitrógeno para trabajar en atmósfera controlada y un software comercial que controla el equipo y registra los resultados. El calorímetro se calibra colocando en una celda zafiro como material de referencia y en la otra celda muestras de 10 a 15×10^{-5} kg de trigo.

El software permite fijar la velocidad de calentamiento de la muestra. En un ambiente controlado con nitrógeno, se introdujeron muestras de trigo con un 13% de humedad en base seca en el calorímetro, se fijó una rampa de calentamiento $5 \text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ hasta alcanzar los $110 \text{ }^\circ\text{C}$, y posteriormente se sometieron las muestras a temperatura constante de $110 \text{ }^\circ\text{C}$ por espacio de 10 min, de tal manera que al finalizar el tiempo, el software determinó la capacidad calorífica del trigo para el intervalo de operación requerido.

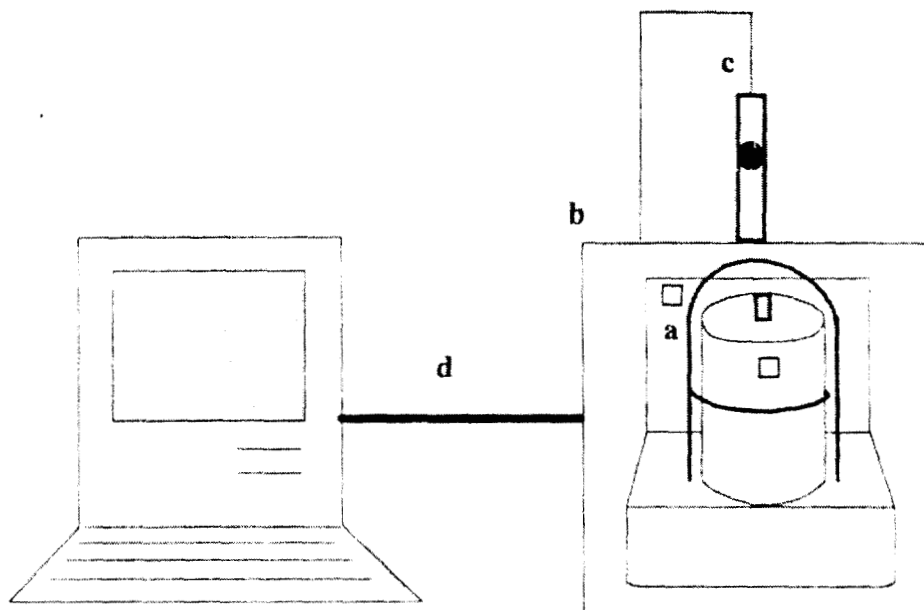


Figura 4.5 Calorímetro diferencial de barrido mod. 2010 de TA instrument.

a. calorímetro cilíndrico, b. tablero de control, c. rotámetro, d. una interfase a la computadora.

4.7. Secado en lecho vibrofluidizado

Para poder llevar a cabo el secado en lecho vibrofluidizado en lotes y en continuo, primeramente los granos de trigo se mojaron por espacio de 20 min y se dejaron reposar durante 100 min hasta alcanzar una humedad inicial homogénea entre 0.25 y 0.30 en base seca.

4.7.1. Determinación de las curvas de secado en operación por lotes

Para la deshidratación del trigo se trabajó con tres temperaturas de aire a la entrada del vibrofluidizador (40, 70 y 100 °C), tres niveles de intensidad vibracional (5.69, 6.02 y 8.70), tres cantidades de granos alimentados al secador (8, 10 y 12 kg en base seca). Estas cantidades de granos se pesaron en una balanza gravimétrica digital (marca Ohaus) y se varió el flujo de aire colocando la válvula de mariposa que regula el flujo de gas al secador en tres posiciones (1/3, 2/3 y completamente abierta). Como el flujo de aire depende de la temperatura, se operó finalmente con nueve flujos de aire, tres por cada temperatura (0.16, 0.17, 0.19, 0.25, 0.27, 0.29, 0.31, 0.34 y 0.35 m³/s).

El secador de lecho vibrofluidizado mostrado en la Figura 4.1 se estabiliza térmicamente a una de las temperaturas de prueba previamente establecidas. Alcanzado el equilibrio, se adicionan al lecho los granos de trigo de humedad inicial conocida. Posteriormente se acomoda el cereal a lo largo del equipo de tal forma que se tenga una altura del lecho uniforme, enseguida se aplican vibraciones al lecho y en ese momento se considera el tiempo inicial del experimento.

Accionando un cronómetro, se registra a intervalos de tiempo la evolución de la temperatura de salida del gas por medio del panel de control con que cuenta el equipo. Simultáneamente se toman muestras de aproximadamente 0.01 kg de trigo con la ayuda de un muestreador en tres posiciones a lo largo del secador: en la zona de alimentación, en medio del lecho y en la zona de salida del producto, con el objeto de determinar una humedad promedio del grano. Cabe mencionar que para trabajar por lotes, la zona de salida del producto se bloqueó con una placa metálica.

Estas muestras fueron almacenadas herméticamente para determinar su humedad por diferencia de peso de acuerdo al procedimiento proporcionado por Hart y Fisher (1971) utilizando una estufa de convección forzada (marca Felisa) y pesadas en una balanza analítica (marca Ohaus).

4.7.2. Distribución del tiempo de residencia en el equipo en continuo

Para la determinación de la distribución de tiempos de residencia en el lecho vibrofluidizado se trabajó a temperatura ambiente de 20 °C, una intensidad vibracional de 5.69, un flujo de aire de 0.35 m³/s y un flujo de alimentación de sólidos de 0.015 kg/s.

El experimento consistió en llenar un alimentador electro-mecánico fabricado por la compañía Niro con granos de trigo seco (13 % de humedad en base seca). Se puso en funcionamiento al secador abriendo completamente la válvula de mariposa que regula el flujo de aire, se accionó el control de vibraciones y se fueron añadiendo los sólidos al equipo hasta alcanzar el estado estacionario, es decir, cuando el flujo de alimentación fue el mismo a la entrada y a la salida del lecho.

Una vez alcanzado el estado estacionario, se introdujo instantáneamente 0.15 kg de trazador (en este caso se utilizó trigo pintado de color rojo) al secador aplicando una señal en impulso y en ese momento se consideró el tiempo inicial ($t=0$). Se accionó un cronómetro y se tomaron muestras de cereal con trazador a intervalos de tiempo de 30 seg por medio de bolsas de plástico y se finalizó la prueba hasta que ya no existiera trazador en el equipo.

Cuando ya no hubo trazador y se siguió estando en estado estacionario, inmediatamente se detuvo el secador, se dejó de suministrar aire y sólidos, y se calculó el tiempo promedio de residencia en el equipo, pesando la cantidad de granos contenidos en el lecho y dividiéndolo entre el flujo másico de trigo.

Finalmente se pesó la cantidad de trazador y de granos contenidos en cada bolsa para calcular la concentración del trazador y con esta información y con la metodología descrita por Levenspiel (1995) se obtuvo la distribución de tiempos de residencia del trigo en el secador.

4.7.3. Determinación de las curvas de secado en operación continua

El equipo experimental mostrado en la Figura 4.1 se estabilizó térmicamente a 100 °C, se trabajó con un flujo de aire de 0.35 m³/s, con 8 kg de trigo en base seca y una intensidad vibracional de 5.69. Alcanzado el equilibrio térmico se adicionaron al lecho 0.015 kg/s de trigo en base seca con un contenido de humedad inicial conocida.

En el momento en que caen los primeros granos dentro del lecho, se acciona un cronómetro y ese instante se considera el tiempo inicial del experimento. El grano que va saliendo del equipo se deposita en recipientes aislados para evitar la transferencia de calor entre los sólidos y el medio ambiente. Posteriormente el cereal se hizo recircular por el alimentador del secador, de tal manera que la operación continua se trabajó por medio de ciclos.

A intervalos de tiempo se registraron la temperatura de salida del aire y el flujo másico de trigo a la salida, con el objeto de monitoriar cuanto tiempo se requirió para alcanzar el estado estacionario. También se registró la evolución de la temperatura del producto a la salida del lecho

por medio de un termopar digital. Simultáneamente a estas mediciones, se tomaron muestras de trigo de aproximadamente 0.01 kg para determinar su humedad.

Para la determinación de la humedad se siguió el procedimiento proporcionado por Hart y Fisher (1971) utilizando una estufa de convección forzada (marca Felisa) y una balanza analítica (marca Ohaus). El procedimiento consiste en pesar pequeñas muestras de granos que se van obteniendo en diferentes tiempos de secado, las cuales se dejan por espacio de 24 hrs en la estufa, posteriormente se vuelven a pesar las muestras y por diferencia de peso se determina la cantidad de humedad que tienen los granos en el tiempo en que se sacaron del secador. La ecuación que se utiliza es la siguiente:

$$X = \frac{M_H - M_F}{M_F} \times 100 \quad (4.1)$$

donde M_H es el peso de la muestra a un determinado tiempo de secado, M_F es el peso de la muestra después de haber estado 24 hrs en la estufa y X es el contenido de humedad final de cada grano en base seca.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

Y DISCUSIÓN

CAPÍTULO 5

En este capítulo, se presentan y se analizan los resultados obtenidos en la experimentación acerca de la caracterización física de los granos de trigo, la caracterización hidrodinámica-vibracional del lecho, las cinéticas de secado, así como las simulaciones del secado de trigo en operación por lotes y en continuo, y las predicciones del consumo de energía del proceso continuo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1. Propiedades físicas.

En la tabla 5.I se muestra la caracterización física del trigo. Al comparar algunas de las propiedades físicas de los granos de trigo reportadas por Mujumdar (1987) y Levenspiel (1991) tales como la densidad empacada ($\rho_b = 798 \text{ kg/m}^3$) y la esfericidad promedio de partícula ($\phi_s = 0.85$) respectivamente con las obtenidas durante la experimentación se encontraron pequeñas diferencias debidas posiblemente a los tipos de granos, ya que Mujumdar utilizó trigo duro, mientras que en este trabajo se empleó trigo blando.

Tabla 5.I Propiedades físicas de los granos de trigo.

$\rho_b \text{ (kg/m}^3\text{)}$	793.80
$\rho_p \text{ (kg/m}^3\text{)}$	1323.00
$d_p \text{ (m)}$	4.00×10^{-3}
$d_e \text{ (m)}$	3.32×10^{-3}
ϕ_s	0.83

5.2 Propiedades hidrodinámicas-vibracionales.

En la tabla 5.II se presenta los parámetros hidrodinámicos del sistema trigo-aire con una humedad inicial de los granos del 13.05 % en base seca. De acuerdo a la clasificación realizada por Geldart (1990), los granos de trigo se encuentran en el grupo **D**, los cuales se caracterizan por ser difíciles de fluidizar. Esta clasificación se corroboró utilizando la metodología descrita por Levenspiel (1991).

Giner y Calvelo (1987) reportaron que la fracción de espacios vacíos a las condiciones de mínima de fluidización tenía un valor de 0.41 mientras que experimentalmente se encontró un valor de 0.45. Se obtuvo una velocidad mínima de fluidización experimental de 1.3 m/s (ver Figura 5.1) y teóricamente de 1.4 m/s (ver Apéndice B), lo que significa que hay un error del 7.7% aproximadamente.

En el trabajo de Zahed y col. (1995) se determinó experimentalmente la velocidad mínima de fluidización con un diámetro promedio de partícula de 4×10^{-3} m, teniendo un resultado de 1.34 m/s. Comparando este valor con el obtenido experimentalmente se tiene una diferencia del 3.3% por lo que se concluye que el valor experimental es confiable si se quiere utilizar en alguna expresión de diseño.

Tabla 5.II Caracterización hidrodinámica del sistema sólido-aire.

L_{mf} (m)	0.10
ΔP_{mf} (Pa)	706.11
U_{mf} (m/s) exp.	1.30
U_{mf} teórica (m/s)	1.40
ϵ_{mf}	0.45
Régimen de fluidización	Lecho borboteante (spouted bed)
Clasificación de partículas	Grupo D (partículas grandes y densas)

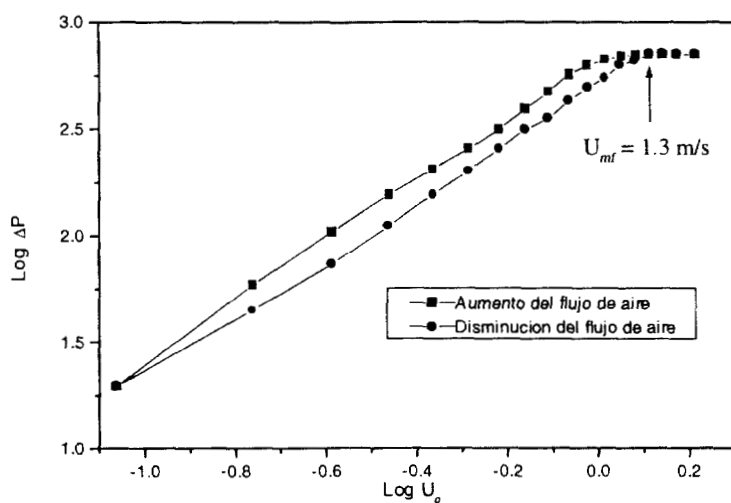


Figura 5.1 Velocidad mínima de fluidización, $T_1=20$ °C, $W=1$ kg.

En la Tabla 5.III se muestra la caracterización física del secador de lecho vibrofluidizado y las propiedades hidrodinámicas-vibracionales del lecho. Gupta y Mujumdar (1980), así como Davidson y col. (1985) demostraron que cuando la intensidad vibracional es mayor a la unidad, las vibraciones favorecen la fluidización y se requiere una menor cantidad de aire en el lecho vibrofluidizado. Ello se ve reflejado en que la velocidad mínima de vibrofluidización es menor a la mínima de fluidización en porcentajes mayores al 35%.

Lo anterior se comprobó experimentalmente al determinar la velocidad mínima de vibrofluidización, la cual depende inversamente de la intensidad vibracional y no así de la cantidad de granos alimentados al secador (ver figuras 5.2 y 5.3). En la Tabla 5.III se observa claramente como al ir aumentando la intensidad vibracional, la velocidad mínima de vibrofluidización disminuye. Esto era de esperarse debido a que el secador se diseñó con la intención de manejar flujos de aire menores en comparación con los utilizados en los lechos fluidizados, y que el efecto mecánico de las vibraciones contribuyan como fuerza motriz importante para llevar a cabo la fluidización y en el transporte de los sólidos durante el secado.

Tabla 5.III Caracterización física e hidrodinámica-vibracional del lecho vibrofluidizado.

v (r.p.m.)		1730	
f (Hz)		28.83	
ω (s ⁻¹)		181.17	
Posición de Polea	$A \times 10^{+3}$ (m)	$\Gamma = A \omega^2 / g$	U_{mfv} (m/s)
5	1.70	5.69	0.66
6	1.80	6.02	0.62
7	2.10	7.02	0.59
8	2.60	8.70	0.56
9	2.70	9.03	0.54
10	2.80	9.37	0.51

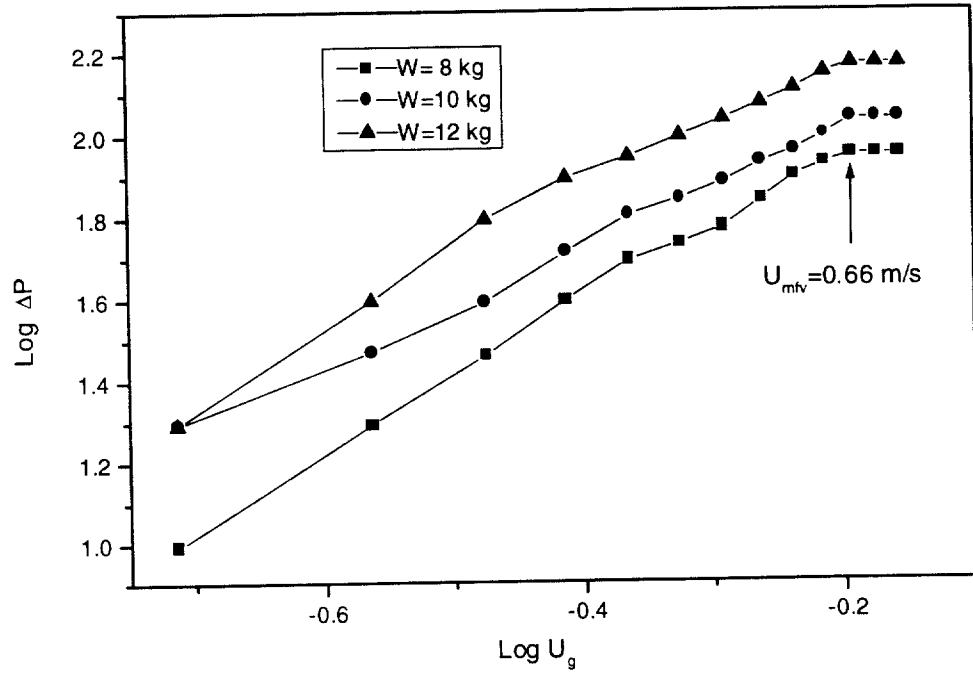


Figura 5.2 Velocidad mínima de vibrofluidización, $T_1=20$ °C, $\Gamma=5.69$

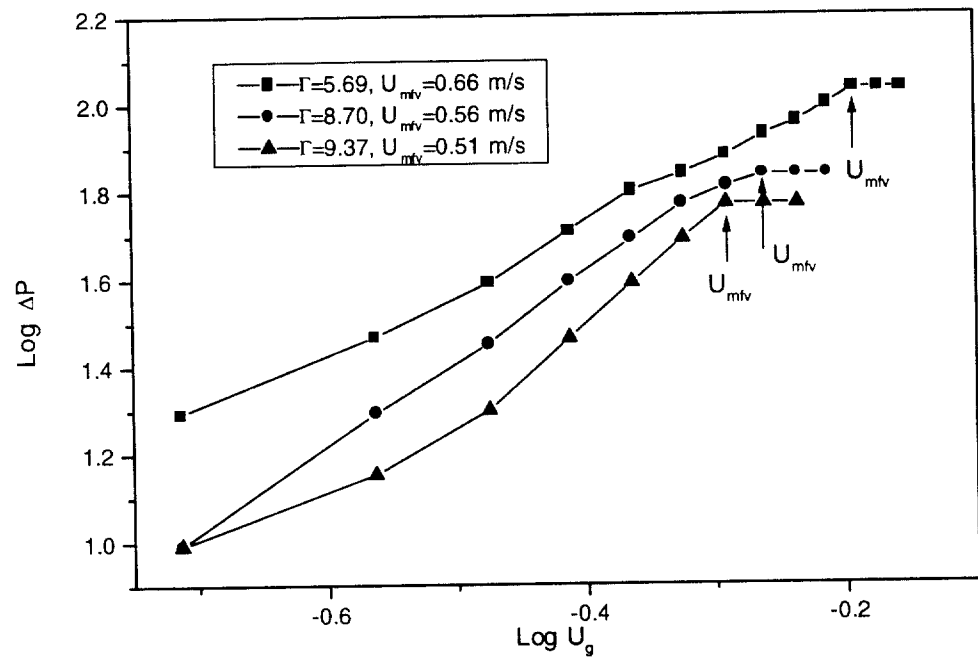


Figura 5.3 Velocidad mínima de vibrofluidización, $T_1=20$ °C, $W=10$ kg

En la Figura 5.4 se presentan los datos experimentales obtenidos para la determinación de la función de distribución de tiempos de residencia (DTR) del trigo en el secador.

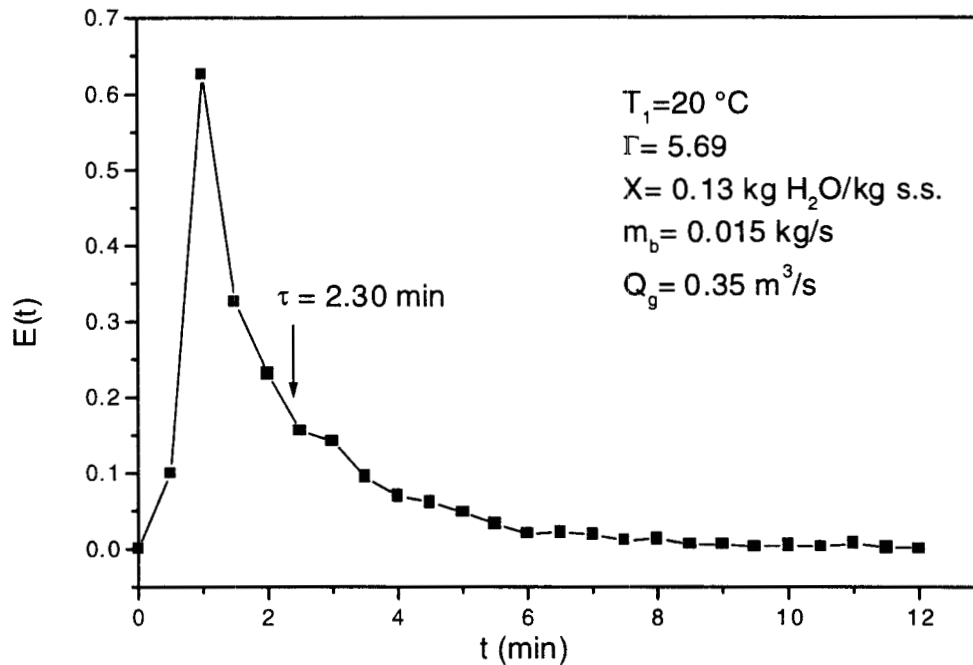


Figura 5.4 Función de distribución de tiempos de residencia del trigo.

En este experimento se trabajó en condiciones de estado estacionario, donde el flujo de sólidos a la entrada y a la salida del secador fue el mismo (0.015 kg/s). Se operó con la intensidad vibratoria más baja ($\Gamma=5.69$) para garantizar el mayor tiempo de residencia del sólido en el equipo. El tiempo promedio de residencia del trigo se determinó dividiendo la cantidad de sólido dentro del lecho entre el flujo másico de alimentación.

Como se puede observar en la Figura 5.4, la función de distribución de tiempos de residencia del trigo pudiera parecer que sigue un patrón de flujo pistón, por lo que se intentó modelar el patrón de flujo de los granos utilizando el modelo de tanques en serie y el de dispersión (ver Apéndice D). Debido a que no se pudo tener un buen ajuste de estos modelos de un solo parámetro con la función de distribución experimental, la cual posiblemente sea característica de un modelo de 2 o más parámetros que presenta pequeñas desviaciones de flujo pistón y colas largas, se procedió a hacer un ajuste matemático utilizando el método numérico de

trazadores cúbicos (Burden y Faires, 1985) obteniendo un ajuste del 100%. Los datos experimentales y los ajustados por el método numérico se tabulan en el Apéndice D.

La función de distribución experimental presenta cierta semejanza a la descrita por Vanecek (1966) en donde el patrón de flujo de los sólidos se caracteriza porque alguna fracción del material permanece estancado por tiempo prolongado en alguna de las esquinas del equipo. Esto ocurrió en la realidad, aunque es difícil de apreciar, ya que más que estancamiento, se puede decir que en las esquinas de la salida del secador, a los granos les cuesta más trabajo salir del equipo que en la zona central de la salida.

5.2. Cinéticas de secado por lotes.

En el caso de secado en sistemas vibrofluidizados, un número de variables pueden influir en el tratamiento de los granos, como son la temperatura de alimentación del gas, los flujos de los sólidos y del gas, y la intensidad vibracional. En las figuras 5.5 a 5.8 se presentan los efectos de las variables antes mencionadas.

En las figuras 5.5 y 5.6 se observa que los fenómenos externos no controlan el proceso de secado. Al aumentar la intensidad vibracional, la fuerza mecánica domina el efecto vibratorio sobre la fuerza gravitacional provocando que exista una mejor circulación de sólidos a lo largo del lecho y aunque no existe ninguna mejora en el tiempo de secado, se evita la formación de zonas heterogéneas (sin mezclado perfecto en los granos) sobre todo en las esquinas del plato distribuidor (ver Figura 5.5). Al aumentar el flujo de aire, la rapidez de secado no aumenta, esto es debido a que se trabajó por abajo de las condiciones mínimas de fluidización, por lo que probablemente exista un grado parcial de fluidización que es típico en los materiales de una baja esfericidad como es la del trigo, por ello los tiempos de secado resultan ser altos y se comprueba que los efectos difusivos internos dominan a los convectivos en la deshidratación (ver Figura 5.6).

En la Figura 5.7, se observa que el incremento en la cantidad de granos cargados al equipo no es proporcional en el tiempo de secado, por lo que tampoco es una variable a considerar en el proceso de secado. Aunque la ventaja que se tiene, desde un punto de vista económico, es que se

pueden trabajar con grandes cantidades de sólidos en el lecho, aumentando así la producción de granos deshidratados.

Sin embargo, al trabajar a mayor temperatura de alimentación del aire (ver Figura 5.8), la rapidez de secado aumenta considerablemente, por lo que se concluye que la variable principal en la deshidratación de los granos de trigo blando es la temperatura. El inconveniente de trabajar con temperaturas elevadas ($T_1 > 70 \text{ }^\circ\text{C}$) es que los granos presentaron un oscurecimiento muy marcado, siendo un indicativo que se afectaron sus propiedades biológicas.

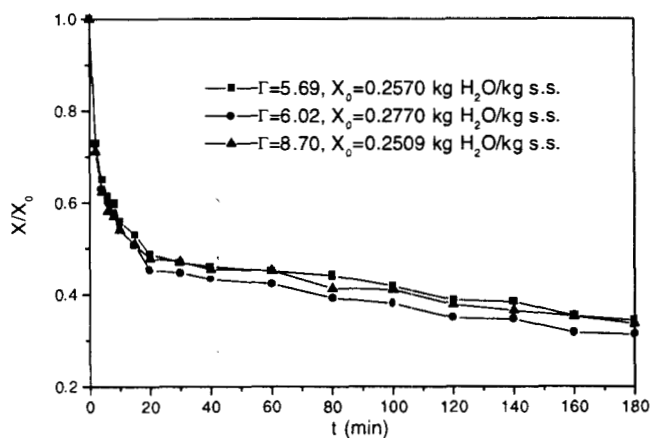


Figura 5.5 Secado en lecho vibrofluidizado, $T_1=70^\circ\text{C}$, $W=10 \text{ kg}$, $Q_g=0.34 \text{ m}^3/\text{s}$.

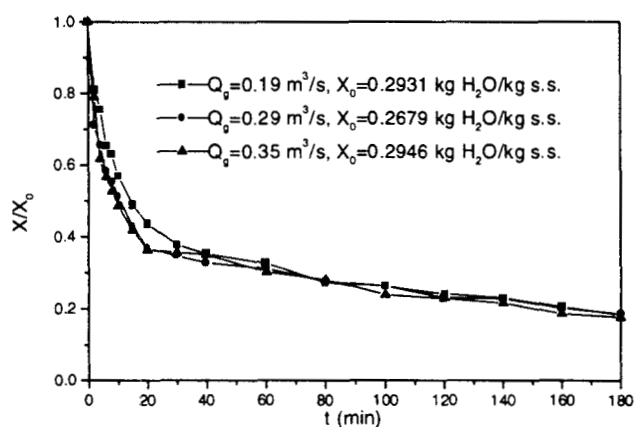


Figura 5.6 Secado en lecho vibrofluidizado, $T_1=100^\circ\text{C}$, $\Gamma=5.69$, $W=12 \text{ kg}$.

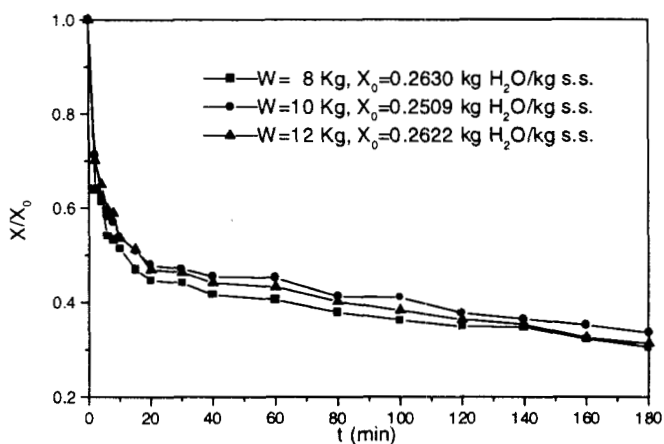


Figura 5.7 Secado en lecho vibrofluidizado, $T_1=70^\circ\text{C}$, $\Gamma=8.70$, $Q_g=0.34 \text{ m}^3/\text{s}$.

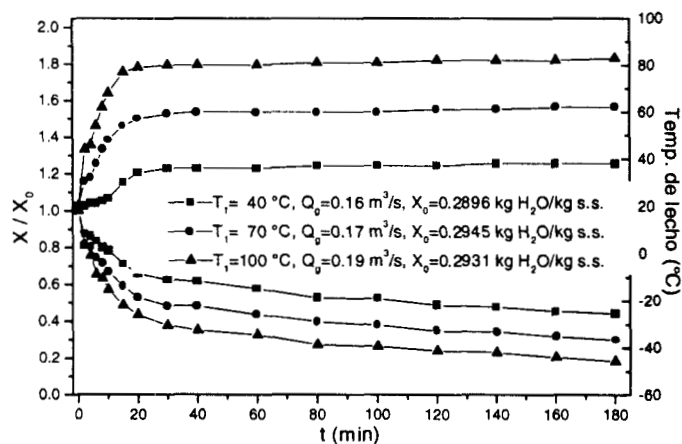


Figura 5.8 Secado en lecho vibrofluidizado, $\Gamma=5.69$, $W=12 \text{ kg}$.

Para analizar los datos experimentales de secado en condiciones isotérmicas, fue necesario convertir las curvas de secado obtenidas a temperatura constante de alimentación del aire, a temperatura constante del lecho utilizando la metodología descrita por Reay y Allen (1982). En las figuras 5.9 se hace una comparación entre este tipo de curvas, donde se aprecia que son prácticamente iguales; sólo existe una pequeña diferencia al comienzo del secado, aproximadamente hasta los primeros 10 min, después resultan semejantes. Por la forma de las curvas, se puede apreciar que sólo existe periodo de secado decreciente, esto implica que el proceso de secado está controlado por los fenómenos difusionales internos.

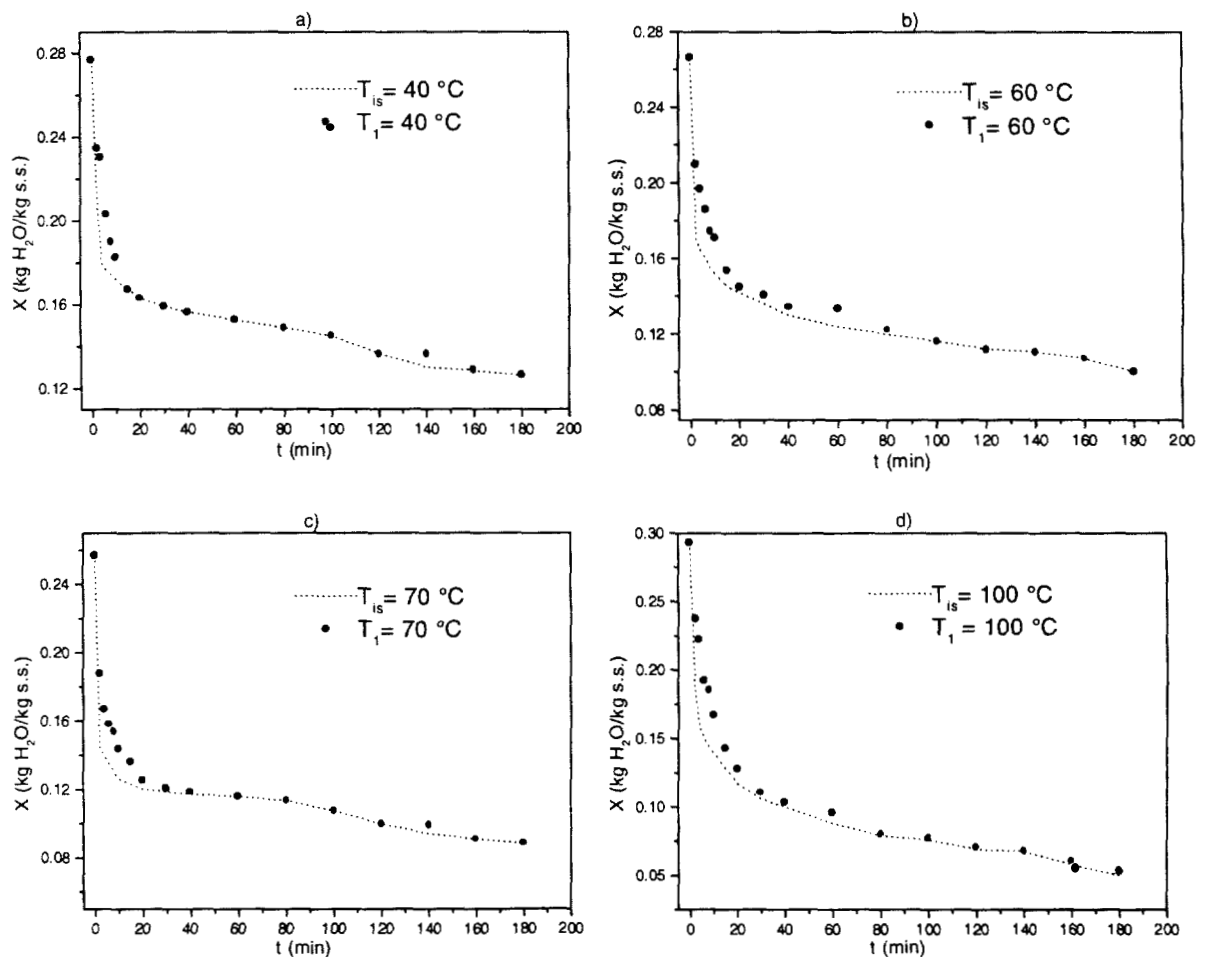


Figura 5.9 Secado en lecho vibrofluidizado, $\Gamma=5.69$, $W=8\text{kg}$.

Los periodos de secado del trigo blando están graficados en las figuras 5.10. Al determinar la velocidad de secado en función de la humedad del grano se encontró que existen dos periodos

de secado decrecientes. El primer periodo ocurre en los primeros 10 min, donde la difusividad permite que la humedad interna se mueva hasta la superficie del grano tan rápido como se evapora. Sin embargo, en el segundo periodo, la distancia promedio que recorre el agua que difunde aumenta, provocando que la migración de la humedad del interior del grano a la superficie de éste sea más difícil, trayendo consigo velocidades de secado más lentas.

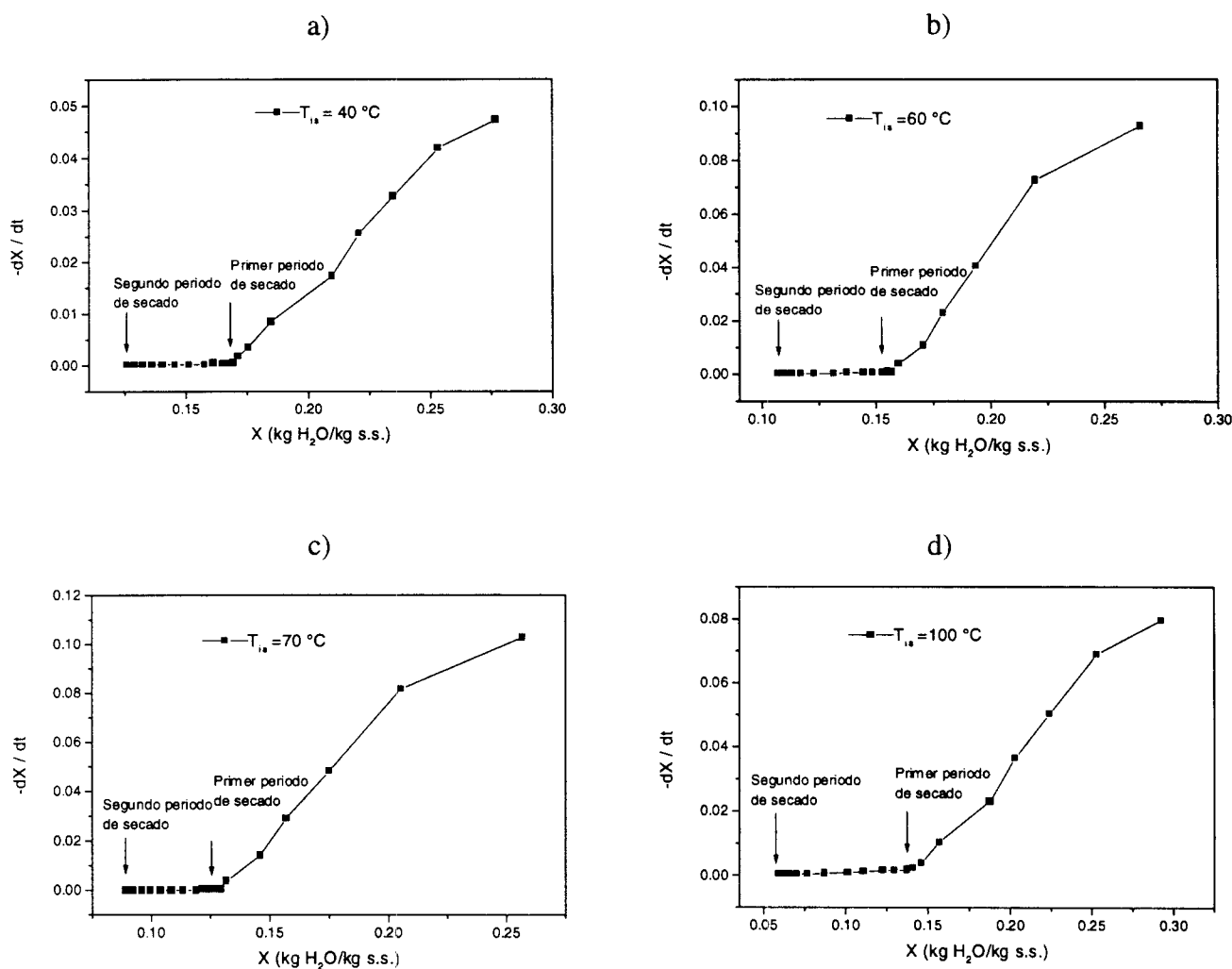


Figura 5.10 Periodos de secado del trigo, $\Gamma=5.69$, $W=8$ kg.

En la Tabla 5.IV se muestran los valores de la energía de activación para cada periodo de secado. Estos resultados se obtuvieron al resolver la ecuación (3.4), como se puede observar se requiere aproximadamente 12 veces más energía para evaporar agua del grano en el segundo periodo de secado que con respecto al primero, esto se debe a que los gradientes de humedad

cada vez son más pequeños conforme pasa el tiempo de secado, por lo que la velocidad de secado se hace más lenta.

Tabla 5.IV Valores de la energía de activación para cada periodo de secado.

Primer periodo de secado	
$A_1 = 0.137 \text{ min}^{-1}$	$B_1 = 190.61 \text{ J/mol}$
Segundo periodo de secado	
$A_2 = 2.075 \text{ min}^{-1}$	$B_2 = 2287.62 \text{ J/mol}$

5.3. Simulaciones del comportamiento del secador de lecho vibrofluidizado por lotes y en continuo.

Las simulaciones de los dos modelos se llevaron a cabo utilizando los programas realizados en Visual Fortran (versión 5.0) y que se encuentran en el apéndice G. En las figuras 5.11 a 5.13 se comparan los resultados obtenidos experimentalmente de las curvas de secado y de la evolución de la temperatura del lecho en la operación por lotes con las predicciones realizadas por el modelo homogéneo.

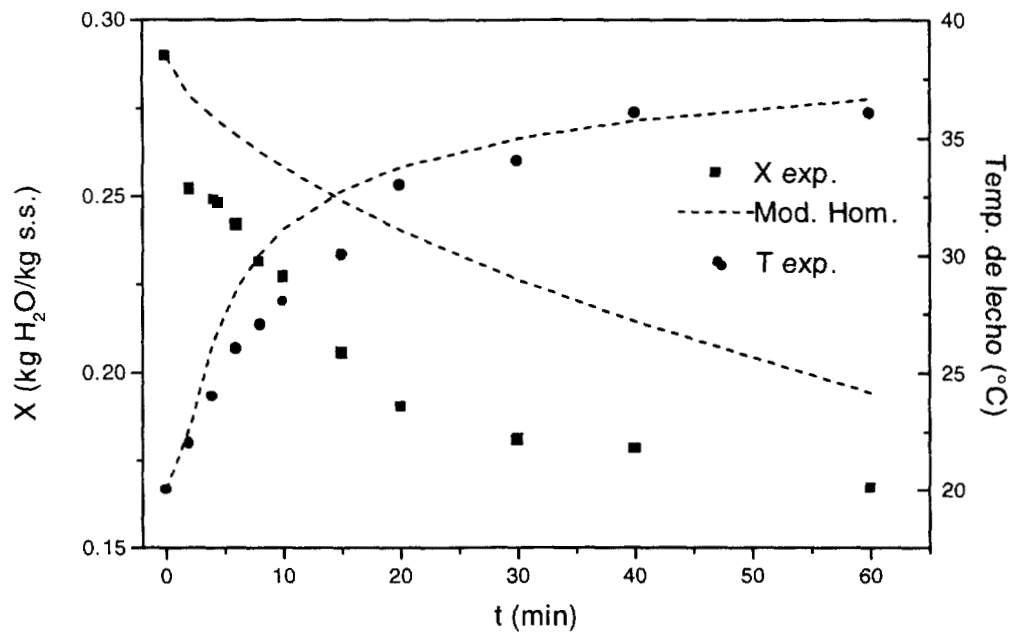


Figura 5.11 Secado de trigo por lotes, $T_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, $W=8 \text{ kg}$, $\Gamma=5.69$, $Q_g=0.35 \text{ m}^3/\text{s}$

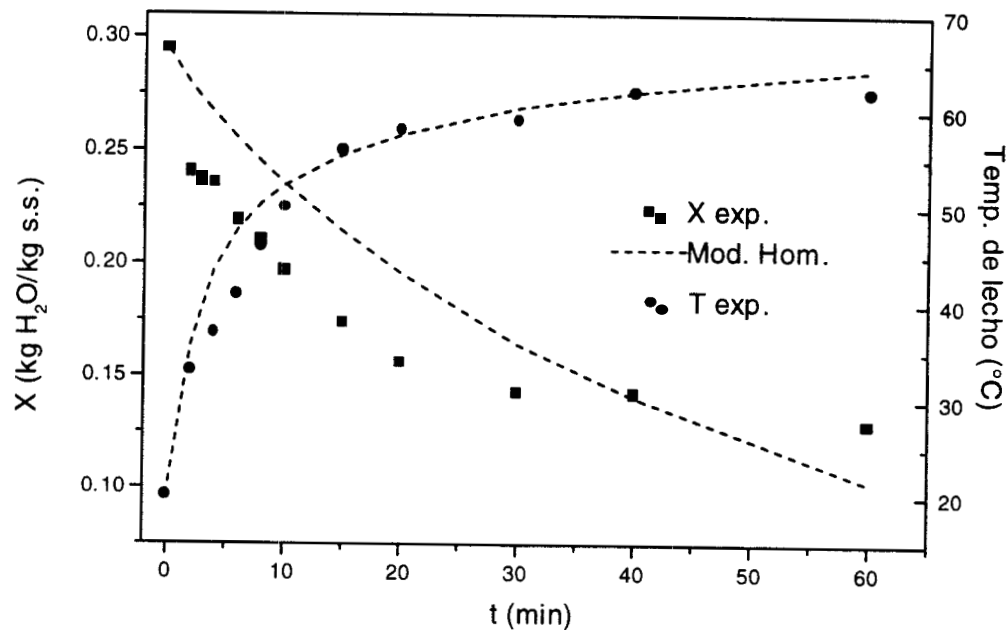


Figura 5.12 Secado de trigo por lotes, $T_1 = 70$ $^\circ\text{C}$, $W=8$ kg, $\Gamma=5.69$, $Q_g=0.35$ m^3/s

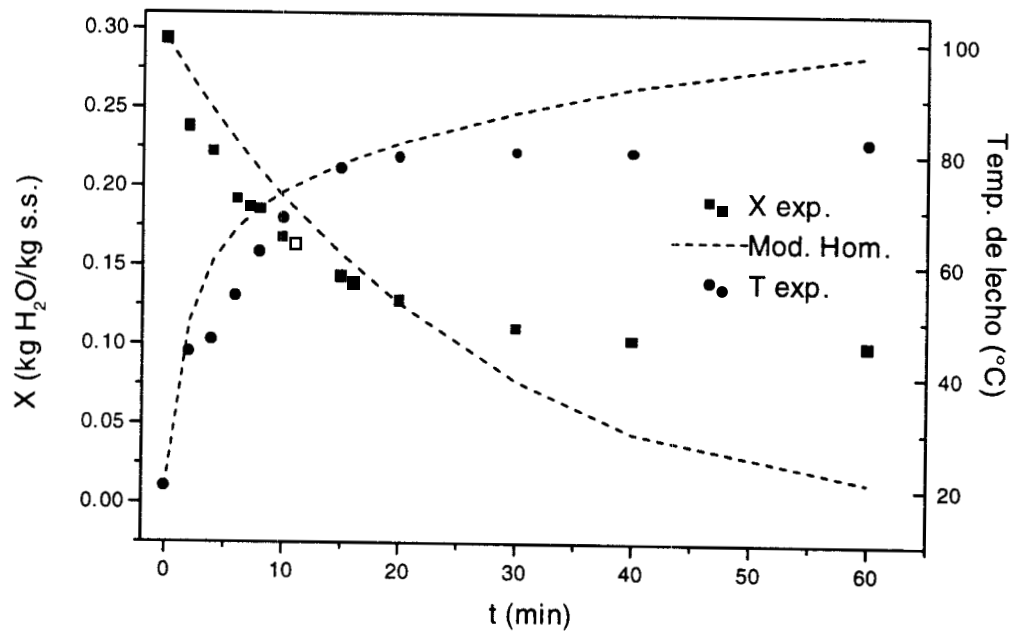


Figura 5.13 Secado de trigo por lotes, $T_1 = 100$ $^\circ\text{C}$, $W=8$ kg, $\Gamma=5.69$, $Q_g=0.35$ m^3/s

Se puede notar que, para temperaturas constantes de alimentación de aire relativamente bajas (40 y 70 °C), las curvas de humedad que da el modelo, sobrestiman los datos experimentales, aunque la curva de 70 °C, conforme va transcurriendo el tiempo va teniendo un mejor ajuste, esto posiblemente se deba a que el perfil de temperatura es cada vez mejor entre el teórico y el experimental, en cambio, a 40 °C se puede considerar que no es bueno del todo, principalmente al comienzo y final de la prueba.

Al irse incrementando la temperatura de alimentación de aire (ver Figura 5.13), se va teniendo una mejor aproximación en cuanto a los datos de humedad en comparación con los datos de temperatura baja (40 °C), sin embargo, las predicciones son buenas hasta los primeros 30 min de secado. Después de este tiempo, se van alejando los datos teóricos de los experimentales debido a que también el perfil de temperatura del modelo se va alejando de los puntos experimentales.

En la Figura 5.14 se hace una comparación entre los modelos, para ver cual de ellos predice mejor el funcionamiento del lecho vibrofluidizado al operar por lotes. El modelo de parámetros ajustables predice mejor el funcionamiento del lecho tanto en el contenido de humedad como de la temperatura en comparación con el modelo homogéneo. Como ya se ha indicado, el modelo homogéneo es un modelo de parámetros no ajustables, por lo que en un principio se consideró que una de las posibles causas por las que el contenido de humedad decrece considerablemente es porque alguno o algunos parámetros que se utilizan en las simulaciones podrían ser sensibles a los efectos térmicos como las capacidades caloríficas del sólido y del gas, la humedad del aire y la difusividad efectiva.

Se hizo una análisis de sensibilidad de parámetros para saber cuál de ellos podría estar causando este mal ajuste, por lo que se procedió a incrementar su valor en un 10 y 20% de su valor original suministrado al programa, en el caso de la difusividad efectiva, se utilizaron otras correlaciones propuestas por (Vizcarra y col., 1998; Giner y Calvelo, 1987) en lugar de la que utilizan Zahed y Epstein en su trabajo. Los resultados no mejoraron, por lo que se concluyó que estos parámetros son insensibles a la temperatura.

Otra de las posibles causas del mal ajuste del modelo homogéneo, es que en este modelo se supone que en la superficie del grano la humedad se va al medio ambiente sin que exista una resistencia a la transferencia de masa en la interfase sólido-gas, por lo que se propuso usar una condición de frontera que involucrase esta resistencia. Se utilizó este tipo de resistencia, tomada del trabajo de Zahed y col. (1995), pero no hubo resultados satisfactorios.

Como se puede observar en la Figura 5.14, la evolución de la temperatura del lecho que se obtuvo experimentalmente, sólo alcanzó los 82 °C a los 60 min del proceso, mientras que el modelo homogéneo llegó hasta los 100 °C, esta diferencia de 20 °C se puede deber a que las paredes del secador no están aisladas y el modelo hace la suposición de que sí lo están, por lo que existen pérdidas de calor de las paredes del equipo hacia los alrededores y que se tendrían que cuantificar. Cabe señalar también, que debido a que el equipo estaba herméticamente cerrado, no se pudo medir la temperatura del lecho. Se supuso que la temperatura de salida del aire, que mide el panel de control del sistema, era la correspondiente a la temperatura del lecho.

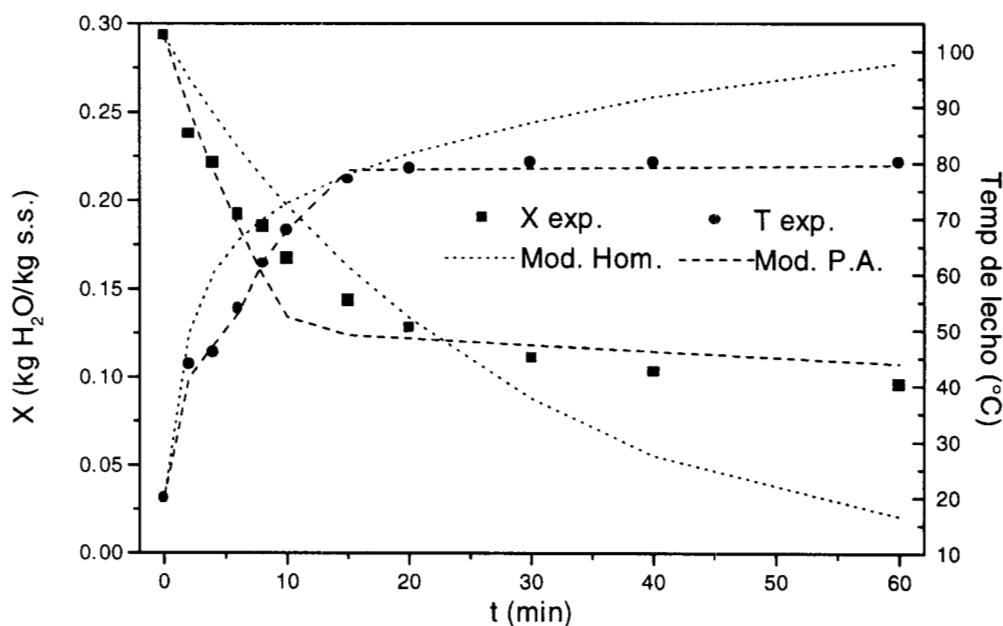


Figura 5.14 Comparación de los modelos en operación por lotes, $T_1 = 100$ °C, $W = 8$ kg, $\Gamma = 5.69$, $Q_g = 0.35$ m³/s

Con la explicación anterior, se puede concluir que el modelo homogéneo predice con buenos resultados los perfiles de temperatura alta (100 °C) y humedad hasta los primeros 30 min del proceso de secado, posteriormente es preciso cuantificar las pérdidas de calor que existen, o bien, aislar el equipo y poder medir bien la temperatura dentro del lecho para no tener predicciones erróneas.

Al tener un mal ajuste de la cinética de secado, es obvio que en el funcionamiento del secador en continuo el modelo de parámetros ajustables da una mejor aproximación de los datos experimentales en el rango de estudio (ver Figura 5.15). La mejor predicción del modelo de parámetros ajustables se debe principalmente a que en este modelo se trabaja con constantes de velocidad de secado fenomenológicas que engloban los procesos difusionales internos que ocurren en el sistema trigo-aire.

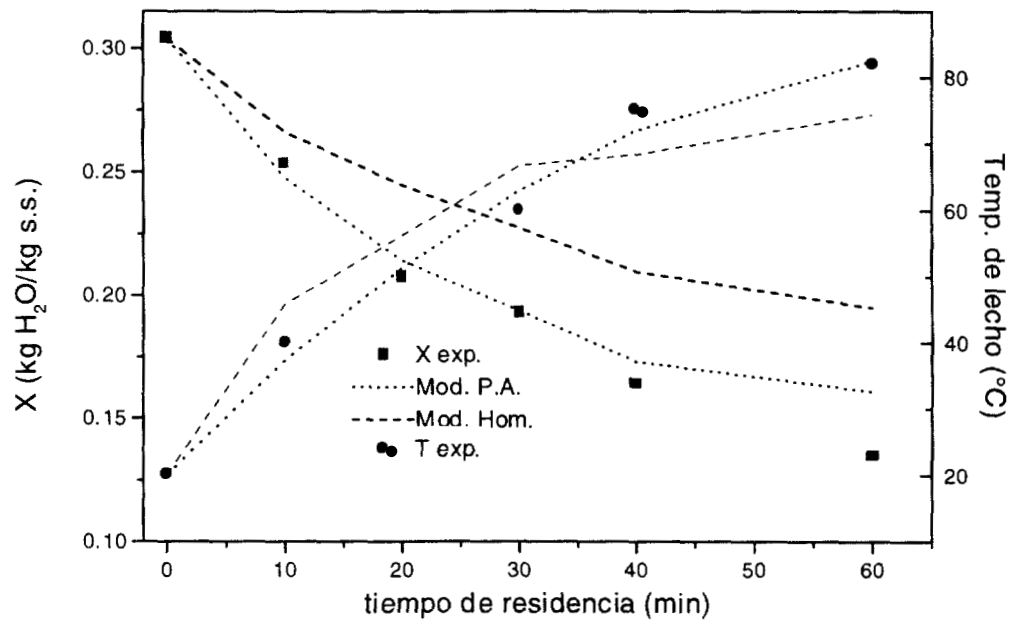


Figura 5-15. Comparación de los dos modelos en operación continua, $T_1=100\text{ °C}$, $W=8\text{ kg}$, $\Gamma=5.69$, $Q_g=0.35\text{ m}^3/\text{s}$

En la Figura 5.16 se muestra el consumo específico de energía en función de la cantidad de trigo alimentado al lecho en base seca al operar en continuo. El consumo de energía disminuye con el incremento de la carga de trigo suministrada al equipo y aumenta si se quiere mantener alta la temperatura de alimentación del aire durante todo el proceso de secado. Al comparar los resultados obtenidos en el lecho vibrofluidizado con los reportados por Baker (1999) en un lecho fluidizado a nivel planta piloto y con datos muy similares a los utilizados en este trabajo, se determinó que el máximo consumo específico de energía en un lecho fluidizado fue de 900,000 kJ/kg mientras que en el lecho vibrofluidizado fue de 500,000 kJ/kg con lo cual se comprueba el efecto importante que tienen las vibraciones como medio de fluidización y que ayuda a que exista una mejor transferencia de calor y masa entre el grano y el aire, disminuyendo así los gastos de energía del gas.

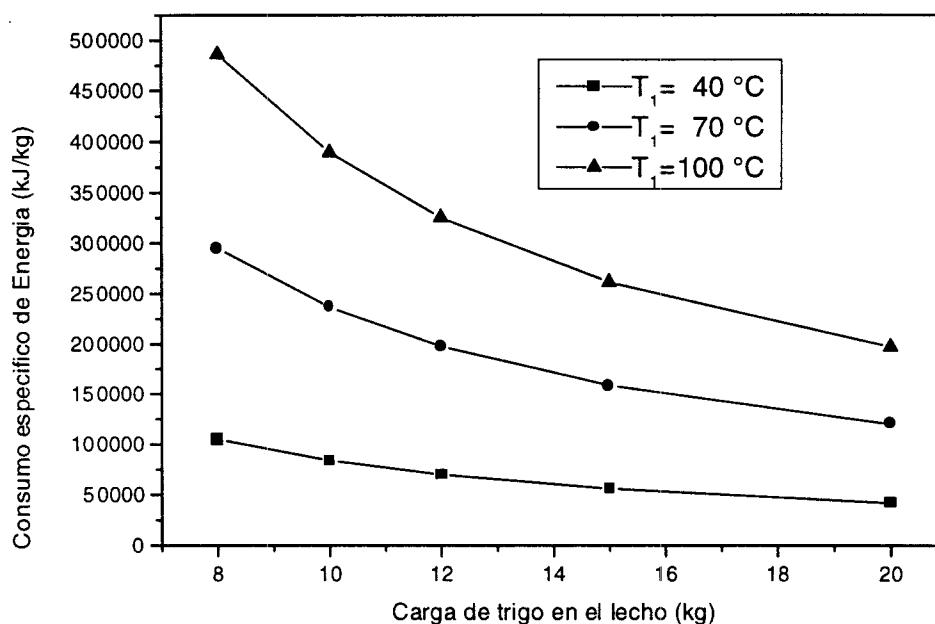


Figura 5.16 Consumo específico de energía en el secado de trigo.

El funcionamiento del secador de lecho vibrofluidizado por lotes y en continuo se muestra en la Figura 5.17, donde se puede observar que el contenido de humedad del grano disminuye más en el proceso por lotes en comparación con el continuo a un mismo intervalo de tiempo. El

inconveniente de la operación por lotes es que sólo se pueden tratar cantidades pequeñas de granos en comparación con el proceso continuo.

Al trabajar por lotes a temperaturas altas (100 °C), los sólidos se deterioraron físicamente, ya que se quemaron (adquirieron un color negro), mientras que en continuo, al operar en ciclos y con temperaturas altas (100 °C), los granos no sufrieron ningún ennegrecimiento, por lo que tuvieron un mejor aspecto en cuanto a color y textura al final del proceso en comparación con la operación por lotes. Además se alcanzó un contenido de humedad menor al 14% por lo que se garantiza que el producto pueda permanecer almacenado por periodos de tiempo prolongados.

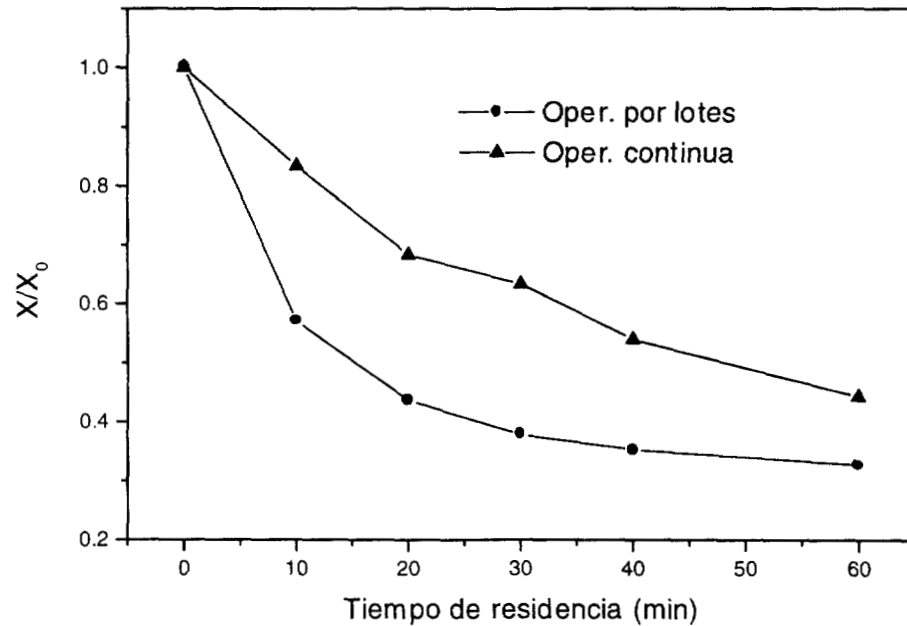


Figura 5.17 Comparación entre la operación continua y por lotes
 $T_1 = 100 \text{ °C}$, $W = 8 \text{ kg}$, $\Gamma = 5.69$, $Q_g = 0.35 \text{ m}^3/\text{s}$, $X_0 = 0.3042 \text{ kg H}_2\text{O}/\text{kg s.s.}$

CONCLUSIONES

1. Al aumentar la intensidad vibracional, el efecto mecánico (aceleración vibracional) contribuye como fuerza motriz principal para llevar a cabo la fluidización y se ve reflejado en la disminución de la velocidad mínima de vibrofluidización, la cual resultó ser entre 2 y 2.5 veces menor a la velocidad mínima de fluidización, por lo que se trabajó en un estado de pseudo-fluidización.
2. La función de distribución de tiempos de residencia del trigo en el lecho vibrofluidizado no se ajustó a ninguno de los modelos ideales de flujo de un solo parámetro (pistón y mezcla completa) satisfactoriamente. Experimentalmente, cierta fracción de granos permaneció estancada en la zona central de la salida del equipo, por lo que este patrón de flujo no ideal del sólido dentro del secador posiblemente sea característico del que presenta pequeñas desviaciones de flujo pistón y colas largas (modelo de dos parámetros).
3. En la cinética de secado, los fenómenos externos como la intensidad vibracional, el flujo de aire y la cantidad alimentada de sólido al lecho presentan nula influencia en el secado. Al incrementar la intensidad vibracional, la fuerza mecánica domina el efecto vibratorio sobre la fuerza gravitacional provocando que exista una mejor circulación de sólidos a lo largo del lecho, evitando la formación de zonas heterogéneas (sin mezclado perfecto en los granos) sobre todo en las esquinas del plato distribuidor.
4. Al aumentar la cantidad de granos en el equipo no mejora el tiempo de deshidratación, por lo que tampoco es una variable a considerar en el proceso de secado. Aunque la ventaja que se tiene, desde un punto de vista económico, es que se pueden trabajar con grandes cantidades de sólidos en el lecho, aumentando así la producción de granos deshidratados.
5. Al trabajar a mayor temperatura de alimentación del aire, la rapidez de secado aumenta considerablemente, por lo que la variable principal en la deshidratación de los granos de trigo es la temperatura. El proceso de secado presentó dos periodos de secado decrecientes, siendo el segundo muy lento, con lo cual se confirma que el trigo presenta gran resistencia interna a

la transferencia de masa y la deshidratación de éste sólido está controlado por los fenómenos difusionales internos.

6. El modelo homogéneo no requiere de modificación alguna para aplicarse exitosamente en el modelamiento del sistema vibrofluidizado. Al simular la operación de secado por lotes, los perfiles de humedad y temperatura (70 y 100 °C) tienen una buena aproximación con los datos experimentales hasta los primeros 30 min del proceso. Después de este tiempo, el modelo comienza a sobrestimar los perfiles, debido a que el modelo supone que no existen pérdidas de calor de las paredes del secador hacia los alrededores; sin embargo, experimentalmente no ocurrió de esta forma, por lo que se tendrían que cuantificar estas pérdidas.
7. El modelo que predice con mayor exactitud los resultados experimentales en continuo es el modelo de parámetros ajustables. La mejor predicción de este modelo se debe a que se trabaja con constantes de velocidad de secado fenomenológicas que engloban los procesos difusionales internos que ocurren en el sistema aire-trigo.
8. El consumo específico de energía en el proceso continuo aumenta si la temperatura de alimentación del aire se incrementa y disminuye si la cantidad de sólidos retenidos en el lecho aumentan. Al comparar estos resultados con los reportados por Baker (1999) en lecho fluidizado, se comprueba el efecto importante que tienen las vibraciones disminuyendo el gasto de energía a casi el doble con respecto a la fluidización convencional.
9. El contenido de humedad de los granos disminuye más en el proceso por lotes que en el proceso continuo a un mismo intervalo de tiempo. No obstante, el trabajar por lotes a temperaturas altas (100 °C), los sólidos se deterioraron físicamente, ya que se quemaron, mientras que en continuo, al operar en ciclos los granos no sufrieron ningún ennegrecimiento, por lo que tuvieron un mejor aspecto en cuanto a color y textura al final del proceso.

NOMENCLATURA

A	Amplitud del lecho, (m)
A_s	Area superficial de una partícula, (m^2)
A_t	Area de sección transversal del lecho, (m^2)
A_1	Factor pre-exponencial del primer periodo de secado del trigo, (min^{-1})
A_2	Factor pre-exponencial del segundo periodo de secado del trigo, (min^{-1})
a_w	Actividad de agua, (adimensional)
B_1	Energía de activación para el primer periodo de secado del trigo, (J/mol)
B_2	Energía de activación para el segundo periodo de secado del trigo, (J/mol)
b	Ancho de un grano, (m)
C_A	Capacidad calorífica del gas seco, (J / kg °C)
C_B	Capacidad calorífica de la partícula seca, (J / kg °C)
C_V	Capacidad calorífica del vapor de agua, (J / kg °C)
C_W	Capacidad calorífica del agua líquida, (J / kg °C)
D_m	Coefficiente de difusión efectiva, (m^2 / s)
d_e	Diámetro efectivo promedio de partícula, (m)
d_{ef}	Diámetro efectivo de partícula, (m)
d_p	Diámetro promedio de partícula, (m)
E_s	Consumo específico de energía, (kJ/kg de H_2O evap.)
$E(t)$	Función de distribución de tiempos de residencia del trigo, (adimensional)
$E(\theta)$	Función de distribución de tiempos de residencia del trigo adimensional, (adimensional)
F	Tasa de alimentación de sólidos, ($\text{kg}/m^2 \text{ s}$)
f	Frecuencia de vibración, (Hz)
f_q	Factor de pérdidas de calor, (adimensional)
G	Tasa de flujo de aire, ($\text{kg}/m^2 \text{ s}$)
g	Aceleración debida a la gravedad, (m^2/s)
H_a	Entalpía ambiente, (kJ/kg)
H_i	Entalpía del aire a la entrada del secador, (kJ/kg)
H_o	Entalpía del aire a la salida del secador, (kJ/kg)
H_1	Altura del lecho inicial, (m)

H_2	Altura del lecho final, (m)
h	Altura de un grano, (m)
h_i	Entalpía de los sólidos a la entrada del secador, (kJ/kg de s.s.)
h_o	Entalpía de los sólidos a la salida del secador, (kJ/kg de s.s.)
ΔH_{evap}	Entalpía de desorción-vaporización (calor isostérico), (J / kg)
k	Constante de velocidad de secado, (min^{-1})
L_{mf}	Altura del lecho a las condiciones de mínima de fluidización, (m)
l	Longitud de un grano, (m)
M_c	Masa de la muestra (kg)
m_A	Flujo másico de aire seco, (kg/s)
m_B	Cantidad de granos dentro del lecho, (kg)
m_b	Flujo de alimentación de las partículas en operación continua, (kg/s)
NC	Número de ciclos en la operación continua, (adimensional)
n	Número de partículas, (adimensional)
P	Presión total, (Pa)
P_S	Presión de saturación, (Pa)
P_V	Presión de vapor, (Pa)
ΔP_{mf}	Caída de presión a las condiciones de mínima de fluidización, (Pa)
ΔP_{mfv}	Caída de presión a las condiciones de mínima de vibrofluidización, (Pa)
Q_g	Flujo volumétrico del aire seco a la entrada, (m^3 / s)
Q_{ht}	Potencia requerida para calentar el aire, (kW/m^2)
Q_l	Pérdidas de calor del secador, (kW/m^2)
R	Constante universal de los gases, (J / kg °C)
R_p	Radio de la partícula, (m)
R_v	Constante universal de los gases entre el peso molecular del agua, (J / kg °C)
r	Distancia radial desde el centro de una partícula esférica, (m)
T	Temperatura del gas a la salida del equipo, (°C)
T_a	Temperatura ambiente, (°C)
T_b	Temperatura del lecho (°C)
T_{is}	Temperatura isotérmica del lecho, (°C)
T_{ref}	Temperatura de referencia, (°C)

T_0	Temperatura de alimentación del trigo en el proceso por lotes, (°C)
T_1	Temperatura del gas a la entrada del equipo, (°C)
t	Tiempo, (s y/o min)
U_g	Velocidad del gas, (m / s)
U_{mf}	Velocidad mínima de fluidización, (m / s)
U_{mfv}	Velocidad mínima de vibrofluidización, (m / s)
V_h	Volumen de huecos, (m ³)
V_m	Volumen de la muestra, (m ³)
V_s	Volumen de una partícula, (m ³)
V_t	Volumen total ocupado por los granos, (m ³)
v	Velocidad del motor, (r.p.m.)
W	Cantidad de trigo alimentado al secador en base seca, (kg)
X	Contenido de humedad de la partícula, en base seca, (kg H ₂ O / kg s.s.)
X_e	Contenido de humedad de la partícula en equilibrio con el aire, (kg H ₂ O / kg s.s.)
\bar{X}	Contenido volumétrico promedio de humedad en el proceso por lotes, (kg H ₂ O / kg s.s.)
X_{prom}	Contenido de humedad promedio de una población de granos a la salida del secador, en operación continua, (kg H ₂ O / kg s.s.)
X_s	Contenido de humedad en la superficie de la partícula, en base seca (kg H ₂ O / kg s.s.)
X_0	Contenido de humedad inicial de las partículas, en base seca, (kg H ₂ O / kg s.s.)
y	Fracción mol del componente que no se difunde, (adimensional)
Y	Humedad absoluta del gas a la salida del secador, (kg H ₂ O / kg s.s.)
Y_s	Humedad absoluta en la superficie de la partícula, (kg H ₂ O / kg s.s.)
Y_1	Humedad absoluta del gas a la entrada, (kg H ₂ O / kg s.s.)

Símbolos griegos

ϵ_{mf}	Fracción de espacios vacíos en el lecho de mínima de fluidización, (adimensional)
ϕ_s	Esfericidad promedio de partícula, (adimensional)
μ_g	Viscosidad del gas, (kg / m s)
θ	Tiempo adimensional = (t / τ), (adimensional)
ρ_g	Densidad del gas, (kg / m ³)
ρ_p	Densidad aparente, (kg / m ³)

ρ_b	Densidad empacada, (kg / m ³)
τ	Tiempo promedio de residencia de los sólidos, (min)
ω	Frecuencia angular, (s ⁻¹)
ξ	Variable de adimensionamiento, (adimensional)
Γ	Intensidad vibracional, (adimensional)

Subíndices

0	Condiciones iniciales
1	Condiciones de alimentación del aire
2	Condiciones finales
a	Ambiente
b	Lecho
i	Condiciones de entrada
is	Condiciones isotérmicas
mf	Condiciones de mínima de fluidización
mfv	Condiciones de mínima de vibrofluidización
o	Condiciones de salida
r	Condiciones de referencia
s.s.	Sólido seco

BIBLIOGRAFÍA

- Alvarez J.R., 1978, Enciclopedia de México, 3a ed., Edit. Mexicana S.A. de C.V., Tomo XII, 436-443.
- Baker C.G.J., 1999, Predicting the Energy Consumption of Continuous Well-Mixed Fluidized Bed Dryers from Drying Kinetic Data, Drying Technology, **17** (7&8), 1533-1555.
- Becker H.A. y Sallans H.R., 1955, A Study of Internal Moisture Movement in the Drying of the Wheat Kernel, Cereal Chemistry, **32**, 212-226.
- Becker H.A. y Sallans H.R., 1956, A Study of the Desorption Isotherms of Wheat at 25 °C and 50 °C, Cereal Chemistry, **33** (2), 79-91.
- Boizán J. M. A. e Ivanovich Z. V., 1986, Secado Fluidizado de Productos Alimenticios, Edit. Oriente, Santiago de Cuba, 11-16, 162-174.
- Boquet R., Chirife J. e Iglesias H.A., 1978, Equations for Fitting Water Sorption Isotherms of Foods, Journal Food Technology, **13**, 319-327.
- Brooker D.B. y Bakker A.F., 1974, Drying Cereal Grains, The Avi Publishing Company, E.U.A., 185-221.
- Burden R.L. y Faires J.D., 1985, Análisis Numérico, 3a ed., Grupo Editorial Iberoamérica, 134-147.
- Chandran A.N., Rao S.S. y Varma Y.B.G., 1990, Fluidized Bed Drying of Solids, AICHE Journal, **36** (1), 29-38.
- Chung D.S. y Pfof H.B., 1967, Adsorption and Desorption of Water Vapor by Cereal Grains and their Products, Trans. ASAE, **10**, 552-575.
- Crane Co., 1970, Flow of Fluids through Valves, Fittings, and Pipe, 11th Printing, Nueva York, Cap.2, 10-15.
- Davidson J. F., Clift R. y Harrison D., 1985, Fluidization, 2nd. Edition, Edit. Academic Press, Inc. Londres (LTD), 547-562.
- Eccles E.R.A. y Mujumdar A.S., 1997, Bubble Phenomena in Aerated Vibrated Beds of Small Particles, Drying Technology, **15** (1), 95-116.
- Elsdon R., 1979, Vibrated Bed Electrostatic Separation, Powder Technology, **23**, 121-129.
- Fan L.S. y Zhu Ch., 1997, Principles of Gas-Solid Flows, Cambridge University Press, Cap. 1, 3-16, Cap. 9, 371-380

Fideicomisos Instituidos en relación con la Agricultura en el Banco de México, Instructivos Técnicos de Apoyo para la Formulación de Proyectos de Financiamiento y Asistencia Técnica, México 1990, 32-37.

Finlayson A., 1980, Nonlinear Analysis in Chemical Engineering. Edit. Mc Graw Hill, 65-70.

Geankoplis C.J., 1982, Procesos de Transporte y Operaciones Unitarias, 1a ed., Edit. CECSA, Cap. 7, 435-482.

Geldart D., 1990, Estimation of Basic Particle Properties for Use in Fluid-Particle Process Calculations, Powder Technology, **60**, 1-13.

Giner S.A. y Calvelo A., 1987, Modelling of Wheat Drying in Fluidized Beds, Journal of Food Science, **52** (5), 1358-1363.

Gupta R. y Mujumdar A.S., 1980, Aerodynamic of a Vibrated Fluid Bed, The Canadian Journal of Chemical Engineering, **58**, 332-338.

Haider A. y Levenspiel O., 1989, Drag Coefficient and Terminal Velocity of Spherical and Nonspherical Particles, Powder Technology, **58**, 63-70.

Haines P.J., 1995, Thermal Methods of Analysis, 1st Edition, Edit. Blackie Academic & Professional, Cap. 1, 1-15, Cap. 3, 63-78.

Halliday D. y Resnick R., 1987, Fundamentos de Física, 1a ed., Edit. CECSA, 241-246.

Hart F.L. y Fisher H.J., 1971, Modern Food Analysis, Spring-Verlag, Nueva York, 2-10.

Hayashi M., Suzuki A. y Tanaka T., 1972, Behaviour of a Particle Bed in the Field of Vibration. V. Evaluating Flow Rate of Particles in Vibratory Conveying System. Powder Technology, **6**, 353-362.

Iglesias H.A. y Chirife J., 1976, Prediction of the Effect of Temperature on Water Sorption Isotherms of Food Material, Journal Food Technology, **11**, 109-116.

Iturbe G. A.C., 1987, Tesis de Licenciatura: Determinación de las Isotermas de Sorción a tres Temperaturas en dos Variedades de Maíz y Trigo, su ajuste a Modelos Matemáticos y el Estudio Preliminar de las Condiciones de Almacenamiento, Universidad Iberoamericana, México, D.F.

Jayaprakasha H.M., Rao K.J. y Lokesh K.W.A., 1997, Studies on the Influence of Water (a_w) on the Stability of Foods- A Critical Appraisal, Journal Food Science Technology, **34** (4), 273-285.

Kunii D. y Levenspiel O., 1991, Fluidization Engineering. Edit. Butterworth-Heinemann Series Editors, 2nd. Edition, Cap. 3, 61-94, Cap. 14, 337-343, Cap. 16, 415-422.

Levenspiel O., 1995, Ingeniería de las Reacciones Químicas, 2a ed., Edit. Reverté, S.A., Cap. 9, 277-298, 319-322.

Martínez V.C., Vicarra M.M., Gálan D.O. y Ruíz M.R., 1995, Experimental Validation of a Mathematical Model for the Batch Drying of Corn Grains, *Drying Technology*, **13** (1&2), 333-350.

Martínez V.C., Vicarra M.M., Gálan D.O. y Ruíz M.R., 1995, Prediction of Moisture Content Evolution in a Grain Batch Dryer Based on On-Line Temperature Measurements, *Drying Technology*, **13** (8&9), 2123-2131.

Marella Ch., Patel S. y Shah U.S., 1997, A Mathematical Model for Vibrofluidized Beds for Drying Casein, *Journal Food Science Technology*, **34** (2), 153-154.

Mujumdar A.S., 1987, *Handbook of Industrial Drying*. Marcel Dekker, Inc., Nueva York and Basel, Cap. 6, 165-226, Cap. 12, 419-438, Cap. 17, 555-570.

Mujumdar A.S., 1996, Innovation in Drying, *Drying Technology*, **A**, 3-13.

Nguyen H. X. y Phillip M., 1979, Maximize Orifice Meter Performance, *Hydrocarbon Processing*, 217-222.

Official United States Standards for Wheat, *United States Department of Agriculture*, L-1/ L-5.

Pan Y. K., Li Z.Y., Mujumdar A.S. y Kudra T., 1997, Drying of a Root Crop in Vibro-Fluidized Beds, *Drying Technology*, **15** (1), 215-223.

Parsons B.D., 1994, Manuales para Educación Agropecuaria, *Trigo, Cebada, Avena*, 2a ed., Edit. Trillas, 9-13.

Perry R.H. y Chilton C.H., 1987, *Manual del Ingeniero Químico*, 5a ed., Edit. Mc Graw Hill, Vol I., Cap. 5, 7-15.

Pomeranz Y., 1978, *Wheat Chemistry and Technology*, 2nd. Edition, Monograph Series, Vol III, Cap. 1, 1-16, Cap. 2, 19-29, Cap. 7, 337-343.

Reay D. y Allen R.W.K., 1982, The Effect of Bed Temperature on Fluid Bed Batch Drying Curves, Research Session on Solids Drying, *Institution of Chemical Engineers Jubilee Symposium, Londres, Inglaterra*, **3** (4), 11-13.

Reay D. y Allen R.W.K., 1986, Predicting the Performance of a Continuous Well-Mixed Fluid Bed Dryer from Batch Tests, 3rd International Drying Symposium, *Journal Separation Processes Technology*, **2**, 130-140.

Rizvi S.S.H. y Benado A.L., 1984, Thermodynamic Properties of Dehydrated Foods, *Food Technology*, **38** (3), 83-92.

Rizvi S.S.H., 1986, *Engineering Properties of Foods*, Marcel Dekker Inc., Nueva York, 133-214.

- Shah R. M. y Goyel S. K., 1995, Drying Characteristics of Tea Fluidized on a Vibrating Bed (part II) - Handling of Dust Grades & Its Impact on Quality, *Drying Technology*, **13** (5-7), 1523-1541.
- Shilton N.C. y Niranjana K., 1993, Fluidization and its Applications to Food Processing, *Food Structure (Scanning Microscopy International, Chicago, IL 60666)*, **12**, 199-215
- Strumillo C. y Adamiec J., 1996, Energy and Quality Aspects of Food Drying, *Drying Technology*, **14** (2), 423-448.
- Suzuki K. y Hosaka H., 1980, Drying Characteristics of Particles in a constant Drying Rate Period in Vibro-Fluidized Bed, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **13** (2), 117-122.
- Suzuki K. y Hosaka H., 1980, Some Investigations of Falling Rate Period of Vibro-Fluidized Bed Drying, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **13** (6), 493-495.
- Suzuki K. y Hosaka H., 1980, Characteristics of Vibro-Fluidized Bed for Drying of Wetted and Agglomerated Particles, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **13** (6), 495-498.
- Szalay A., Erdész K., Zagrouba F. Y Roques M.A., 1995, Principles for Hydrodynamical and Geometrical design of Vibrated Bed Driers, *Drying Technology*, **13** (5-7), Marcel Dekker, Inc., 1249-1260.
- Tolaba M.P., Suárez C. y Viollaz P., 1997, Heats and Entropies of Sorption of Cereal Grains: A Comparison Between Integral and Differential Quantities, *Drying Technology*, **15** (1), 137-150.
- Treybal R.E., 1988, *Operaciones de Transferencia de Masa*, 2a ed., Edit. Mc Graw Hill, Cap. 12, 723-758.
- Vanecek V., Drbohlav R. y Markvart M., 1961, Calculation of Continuous Fluidised-Bed Drying Equipment Based on Laboratory Tests, *Interaction Between Fluids & Particles (Londres: INSTN CHEM. ENGRS)*, 232-237.
- Vanecek V., Drbohlav R. y Markvart M., 1966, *Fluidized Bed Drying*, Leonard Hill, Londres, 33-76.
- Viswanathan K., 1986, Model for Continuous Drying of Solids in Fluidized/Spouted Beds, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **64**, 87-95.
- Viswanathan K., Lyall M.S. y Raychaudhuri B.C., 1986, Spouted Bed Drying of Agricultural Grains, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **64**, 223-232.
- Vizcarra M.M.G., Recio E.J.A., Vázquez Ch. Y Ruíz M.R., 1998, Efecto del Contenido de Humedad y la Temperatura en la Determinación de la Difusividad del Agua durante el Secado de Trigo en Lecho Fluidificado, *Tecnología y Ciencia Ed. (IMIQ)*, **13** (1-2), 11-19.

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

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

Zogzas N.P., Maroulis Z.B. y Marinos K., 1994, Moisture Diffusivity Methods of Experimental Determination a Review, *Drying Technology*, **12** (3), 483-515.

Zogzas N.P. y Marinos K., 1996, Effective Moisture Diffusivity Estimation from Drying Data. A Comparison Between Various Methods of Analysis, *Drying Technology*, **14** (7&8), 1543-1573.

Zogzas N.P., Maroulis Z.B. y Marinos K., 1996, Moisture Diffusivity Data Compilation in Foodstuffs, *Drying Technology*, **14** (10), 2225-2253.

Zuritz C.A. y Singh R.P., 1982, Simulation of Rough Rice Drying in a Spouted Bed, *Drying Technology*, 239-247.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Propiedades físicas de los granos de trigo

Densidad Empacada

$$\rho_b = \frac{M_c}{V_t} \quad (\text{A.1})$$

$$\rho_b = \frac{0.3969 \text{ kg}}{5 \times 10^{-4} \text{ m}^3} = 793.8 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Densidad Aparente

$$V_m = V_t - V_h \quad (\text{A.2})$$

$$V_m = 5 \times 10^{-4} \text{ m}^3 - 2 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$V_m = 3 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$\rho_P = \frac{M_c}{V_m} \quad (\text{A.3})$$

$$\rho_P = \frac{0.3969 \text{ kg}}{3 \times 10^{-4} \text{ m}^3} = 1323.0 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Diámetro promedio de partícula

$$d_p = \left[\frac{6M_c}{n\pi\rho_p} \right]^{1/3} \quad (\text{A.4})$$

$$V_m = 2 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$M_c = 0.1648 \text{ kg}$$

$$n = 3800$$

$$d_p = \left[\frac{6(0.1648)}{(3800)(1323)\pi} \right]^{1/3}$$

$$d_p = 4 \times 10^{-3} \text{ m}$$

Diámetro efectivo promedio de partícula

Tabla A.I Dimensiones características del trigo.

No. Grano (i)	$b \times 10^{+3}$	$h \times 10^{+3}$	$l \times 10^{+3}$	$d_{ef} \times 10^{+3}$
	(m)	(m)	(m)	(m)
1	3.13	3.31	7.15	3.63
2	3.00	3.21	6.20	3.50
3	2.22	2.85	6.12	2.84

$$d_{ef} = \left(\frac{4}{\pi} bh \right)^{1/2} \quad (\text{A.5})$$

$$d_e = \frac{\sum_{i=1}^3 d_{ef}}{3} \quad (\text{A.6})$$

$$d_e = 3.32 \times 10^{-3} \text{ m}$$

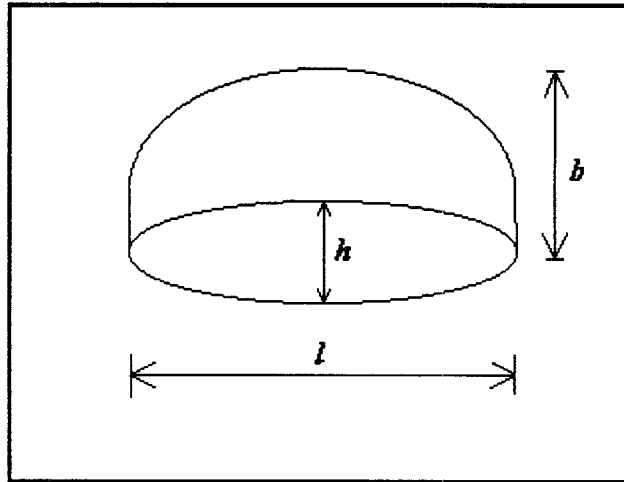


Figura A.1 Dimensiones características del trigo.

Esfericidad promedio de partícula

$$d_e = \phi_s d_p \quad (\text{A.7})$$

$$\phi_s = \frac{d_e}{d_p} = \frac{3.32 \times 10^{-3} \text{ m}}{4 \times 10^{-3} \text{ m}}$$

$$\phi_s = 0.83$$

APÉNDICE B

Hidrodinámica del sistema sólido-aire

Fracción de espacios vacíos a las condiciones de mínima de fluidización

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \left[\frac{\Delta P_{mf} g_c}{L_{mf} g (\rho_p - \rho_g)} \right] \quad (\text{B.1})$$

$$\varepsilon_{mf} = 1 - \left[\frac{\left(706.1112 \frac{N}{m^2} \right) \left(0.1020 \frac{kg}{N} \right)}{\left((0.10m) \left(1323 \frac{kg}{m^3} - 0.9951 \frac{kg}{m^3} \right) \right)} \right]$$

$$\varepsilon_{mf} = 0.45$$

Velocidad mínima de fluidización teórica

$$\frac{1.75 \left(\frac{d_p U_{mf} \rho_g}{\mu_g} \right) + \frac{150(1 - \varepsilon_{mf}) (d_p U_{mf} \rho_g)}{\varepsilon_{mf}^3 \phi_s^2}}{\mu_g} = \frac{d_p \rho_g (\rho_p - \rho_g) g}{\mu_g^2} \quad (\text{B.2})$$

$$g = 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$\mu_g = 1.8 \times 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}$$

$$\rho_g = 0.9951 \frac{kg}{m^3}$$

$$U_{mft} = 1.4 \frac{m}{s}$$

$$\%Error = \frac{U_{mft} - U_{mf}}{U_{mf}} \quad (\text{B.3})$$

$$\%Error = \frac{1.4 \text{ m/s} - 1.3 \text{ m/s}}{1.3 \text{ m/s}} \times 100$$

$$\%Error = 7.7\%$$

APÉNDICE C

Propiedades termodinámicas del trigo.

Tabla C.I Registros experimentales de la capacidad calorífica del trigo determinados con el calorímetro DSC (2010), $X=0.13$ kg H₂O/kg s.s.

Temperatura (°C)	C_p (J/kg °C)
20	1161.0
25	1164.5
30	1165.5
35	1171.0
40	1177.0
45	1186.5
50	1195.0
55	1203.5
60	1214.0
65	1234.5
70	1250.0
75	1264.5
80	1276.0
85	1289.5
90	1310.0
95	1327.5
100	1345.0

APÉNDICE D

Distribución de tiempos de residencia del trigo.

Modelo de tanques en serie

$$E_{\theta} = \frac{N(N\theta)^{N-1}}{(N-1)!} \exp^{-N\theta} \quad (\text{D.1})$$

Modelo de dispersión

$$C_{\theta} = \frac{1}{2\sqrt{\pi\theta(D/uL)}} \exp\left[-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta(D/uL)}\right] \quad (\text{D.2})$$

$$\sigma_{\theta}^2 = 2\frac{D}{uL} - 2\left(\frac{D}{uL}\right)^2 \left(1 - \exp^{-uL/D}\right) \quad (\text{D.3})$$

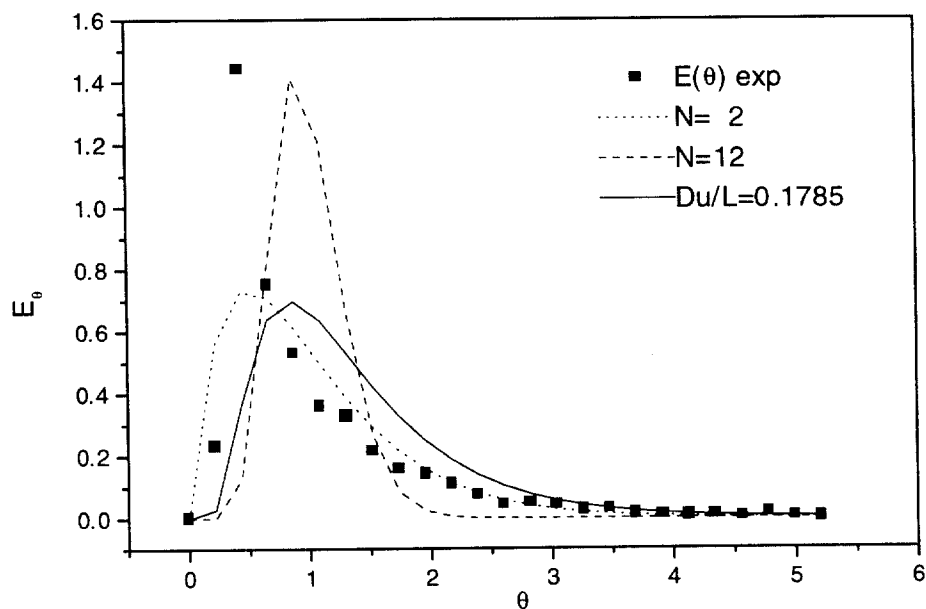


Figura D.1 Comparación de la función de distribución de tiempos de residencia del trigo con los modelos de tanques en serie y de dispersión.

Tabla D.I Datos de la función de distribución de tiempos de residencia utilizados en las simulaciones.

NC=1		NC=2		NC=3		NC=4		NC=5	
t (min)	E(t)	t (min)	E(t)	t (min)	E(t)	t (min)	E(t)	t (min)	E(t)
0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
0.5	0.1002	1.0	0.0500	1.5	0.0033	2.0	0.0250	2.5	0.0200
1.0	0.6268	2.0	0.3134	3.0	0.2089	4.0	0.1567	5.0	0.1254
1.5	0.3262	3.0	0.1631	4.5	0.1087	6.0	0.0816	7.5	0.0652
2.0	0.2309	4.0	0.1155	6.0	0.0770	8.0	0.0577	10.0	0.0462
2.5	0.1560	5.0	0.0780	7.5	0.0520	10.0	0.0390	12.5	0.0312
3.0	0.1420	6.0	0.0710	9.0	0.0473	12.0	0.0355	15.0	0.0284
3.5	0.0945	7.0	0.0470	10.5	0.0315	14.0	0.0236	17.5	0.0189
4.0	0.0693	8.0	0.0340	12.0	0.0231	16.0	0.0175	20.0	0.0139
4.5	0.0615	9.0	0.0300	13.5	0.0205	18.0	0.0154	22.5	0.0123
5.0	0.0481	10.0	0.0240	15.0	0.0160	20.0	0.0120	25.0	0.0096
5.5	0.0324	11.0	0.0160	16.5	0.0108	22.0	0.0080	27.5	0.0064
6.0	0.1918	12.0	0.0950	18.0	0.0063	24.0	0.0047	30.0	0.0038
6.5	0.0214	13.0	0.0100	19.5	0.0071	26.0	0.0053	32.5	0.0042
7.0	0.0186	14.0	0.0920	21.0	0.0061	28.0	0.0046	35.0	0.0037
7.5	0.0108	15.0	0.0530	22.5	0.0035	30.0	0.0026	37.5	0.0021
8.0	0.0128	16.0	0.0640	24.0	0.0042	32.0	0.0032	40.0	0.0025
8.5	0.0056	17.0	0.0270	25.5	0.0017	34.0	0.0013	42.5	0.0011
9.0	0.0051	18.0	0.2500	27.0	0.0017	36.0	0.0012	45.0	0.0010
9.5	0.0028	19.0	0.0140	28.5	0.0094	38.0	0.0007	47.5	0.0005
10.0	0.0038	20.0	0.0190	30.0	0.0012	40.0	0.0009	50.0	0.0007
10.5	0.0027	21.0	0.0130	31.5	0.0008	42.0	0.0006	52.5	0.0005
11.0	0.0068	22.0	0.0340	33.0	0.0022	44.0	0.0017	55.0	0.0013
11.5	0.0019	23.0	0.0930	34.5	0.0062	46.0	0.0004	57.5	0.0003
12.0	0.0006	24.0	0.0280	36.0	0.0001	48.0	0.0001	60.0	0.0001

APÉNDICE E

Operación por lotes

Tabla E.I Registros experimentales de la humedad en base seca del trigo y del flujo de aire ($X = \text{kg H}_2\text{O}/\text{kg s.s.}$ y $Q_g = \text{m}^3/\text{s}$) al operar el equipo por lotes.

T_1	40°C	40°C	40°C	70°C	70°C	70°C	100°	100°C	100°C	70°C	70°C
W	8kg	10kg	12kg	10kg	10kg	10kg	12kg	12kg	12kg	8kg	10kg
Γ	5.69	6.02	8.70	5.69	6.02	8.70	5.69	5.69	5.69	8.70	8.70
Q_g	0.31	0.16	0.31	0.34	0.34	0.34	0.35	0.19	0.25	0.34	0.17
t	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
min.											
0	0.264	0.277	0.271	0.257	0.277	0.251	0.295	0.293	0.253	0.263	0.265
2	0.192	0.234	0.222	0.187	0.201	0.179	0.233	0.200	0.163	0.207	0.207
4	0.187	0.230	0.209	0.167	0.175	0.157	0.182	0.170	0.142	0.202	0.206
6	0.179	0.203	0.191	0.158	0.167	0.146	0.167	0.153	0.134	0.187	0.188
8	0.173	0.190	0.185	0.154	0.160	0.143	0.155	0.147	0.131	0.184	0.181
10	0.170	0.182	0.184	0.144	0.150	0.136	0.143	0.136	0.121	0.171	0.169
15	0.160	0.167	0.166	0.136	0.141	0.128	0.124	0.119	0.106	0.153	0.155
20	0.156	0.163	0.164	0.125	0.125	0.120	0.107	0.104	0.094	0.141	0.143
30	0.154	0.159	0.164	0.121	0.124	0.118	0.105	0.097	0.092	0.133	0.131
40	0.150	0.156	0.158	0.119	0.120	0.114	0.103	0.092	0.089	0.133	0.129
60	0.150	0.153	0.157	0.116	0.117	0.113	0.089	0.089	0.084	0.121	0.120
80	0.141	0.149	0.151	0.113	0.109	0.104	0.083	0.078	0.076	0.111	0.111
100	0.136	0.145	0.149	0.107	0.105	0.103	0.071	0.075	0.072	0.105	0.108
120	0.130	0.136	0.140	0.100	0.097	0.095	0.067	0.073	0.063	0.101	0.103
140	0.130	0.136	0.127	0.099	0.096	0.092	0.064	0.067	0.062	0.098	0.096
160	0.125	0.129	0.126	0.091	0.088	0.088	0.055	0.061	0.056	0.092	0.087
180	0.119	0.126	0.126	0.088	0.087	0.085	0.052	0.056	0.053	0.082	0.083

Tabla E.II Registros experimentales de la humedad en base seca del trigo ($X = \text{kg H}_2\text{O/kg s.s.}$ y $Q_g = \text{m}^3/\text{s}$) al operar el equipo por lotes.

T_1	40°C	40°C	40°C	70°C	70°C	70°C	100°C	100°C
W	12kg	8kg	12kg	12kg	12kg	8kg	8kg	12kg
Γ	5.69	8.70	5.69	5.69	8.70	8.70	5.69	5.69
Q_g	0.19	0.31	0.16	0.17	0.34	0.34	0.35	0.29
t min.	X	X	X	X	X	X	X	X
0	0.267	0.260	0.289	0.295	0.262	0.263	0.293	0.268
2	0.221	0.210	0.252	0.240	0.184	0.168	0.237	0.191
4	0.216	0.199	0.249	0.235	0.170	0.162	0.222	0.175
6	0.205	0.190	0.242	0.219	0.157	0.142	0.192	0.156
8	0.201	0.188	0.231	0.210	0.154	0.140	0.185	0.149
10	0.193	0.181	0.227	0.197	0.141	0.135	0.167	0.137
15	0.178	0.169	0.206	0.174	0.135	0.124	0.143	0.115
20	0.167	0.160	0.191	0.156	0.123	0.118	0.128	0.099
30	0.163	0.154	0.181	0.143	0.121	0.116	0.111	0.093
40	0.159	0.152	0.179	0.142	0.116	0.110	0.103	0.088
60	0.154	0.146	0.167	0.129	0.114	0.107	0.096	0.084
80	0.146	0.135	0.153	0.118	0.105	0.100	0.080	0.074
100	0.141	0.130	0.152	0.112	0.101	0.096	0.077	0.071
120	0.132	0.125	0.141	0.103	0.096	0.092	0.071	0.062
140	0.131	0.124	0.139	0.101	0.093	0.092	0.068	0.061
160	0.124	0.120	0.132	0.094	0.086	0.085	0.060	0.054
180	0.119	0.115	0.129	0.088	0.082	0.081	0.054	0.050

APÉNDICE F

Operación continua

Tabla F.I Datos experimentales del secado de trigo en lecho vibrofluidizado en operación continua.

$T_1 = 100^\circ C$		$\Gamma = 5.69$
$Q_g = 0.35 m^3 / s$		$m_b = 0.015 kg / s$
		$W = 8 kg$
t (min)	X (kgH ₂ O/kg s.s.)	T _{lecho} (°C)
0	0.3042	20
5	0.2768	40
10	0.2535	40
15	0.2158	42
20	0.2077	50
30	0.1929	60
40	0.1641	75
60	0.1347	82

APENDICE G

Programas de los modelos de parámetros ajustables y no ajustables

- c Universidad Autónoma Metropolitana - Iztapalapa
- c Maestría en Ingeniería Química

- c Programa para evaluar el secado de granos de trigo por lotes
- c y en continuo utilizando el modelo de parámetros ajustables

- c Programa elaborado por M.I.Q. Carlos Martínez Vera e
- c I.Q. César Pérez Alonso, utilizando el método numérico de
- c trazadores cúbicos.

```

PROGRAM Parámetros ajustables
      implicit double precision (a-h,o-z)
      integer nn,korder,nknot
      parameter ( nn=25, korder=3)
c nknot=nn+korder

data a1,a2,b1,b2/0.1368,2.0750,190.613215,2287.6193/
data x1,x2/0.29284,0.12966/

double precision a,b,a1,b1
double precision e(nn),t(nn)
double precision x(nn),break(nn),t1(nn)
double precision cm(4,nn),eest(nn),e1(nn),break1(nn)
double precision cm2(4,nn),cm1(4,nn),break2(nn),prod1(nn)
double precision cm3(4,nn),break3(nn),prod2(nn),xprom
double precision pt1,pt2,t12(nn),cm4(4,nn)
integer i
c open(15,file='datos1',status='unknown')
c read(15,*)temp
  temp = 100
  nc = 3
  tc = 10
c intrinsic dexp
c Función de tiempos de residencia del trigo experimental
  open(11,file='datos',status='unknown')
c write(11,*)'temp = ',temp
  t(1) = 0.0d0
  do i=1, 24
    t(i+1) = float(i) * 0.5d0
  end do
  e(1) = 0.0d0
  e(2) = 0.10017795d0
  e(3) = 0.62680508d0
  e(4) = 0.32621339d0
  e(5) = 0.23092721d0
  e(6) = 0.15600867d0
  e(7) = 0.14199571d0
  e(8) = 0.09451894d0
  e(9) = 0.06930761d0

```



```

e(10) = 0.06151241d0
e(11) = 0.04811473d0
e(12) = 0.03235903d0
e(13) = 0.01917692d0
e(14) = 0.02138224d0
e(15) = 0.01858732d0
e(16) = 0.01079433d0
e(17) = 0.01284464d0
e(18) = 0.00556848d0
e(19) = 0.00510267d0
e(20) = 0.00282927d0
e(21) = 0.00384095d0
e(22) = 0.00268097d0
e(23) = 0.00680649d0
e(24) = 0.00187402d0
e(25) = 0.00057101d0

```

```
*****
```

```

do i=1, 25
  tt = t(i)
  prod1(i) = rxpp(tt) * e(i)
  write(11,*)'rxpp , e , prod = ',rxpp(tt),e(i),prod1(i)
end do
n = 25

```

```

c Interpolate
call dcsint (n, t, prod1, break1, cm1)

```

```

  nintv = n-1
  do 73 i = 1,n
    punto = t(i)
73   eest(i) = dcsval(punto,nintv,break1,cm1)
    do 215 i=1,n1
215  write(11,694) i,t(i),prod1(i),eest(i)

    a = 0.0d0
    b = 12.0d0

```

```

c Integrate from A to B
xprom = dcsitg(a,b,nintv,break1,cm1)
write(11,*)'tiempo = ', b, 'xprom = ', xprom

```

```
*****
```

```

n=25
nintv = n-1

```

```

c Interpolate
call dcsint (n, t, e, break, cm)

```

```

do 77 i = 1,n
  punto = t(i)
  write(11,*)'tiempo = ', t(i),e(i)
c   ncoef = n
77   eest(i) = dcsval(punto,nintv,break,cm)
  do 210 i=1,n
210  write(11,690) i,t(i),e(i),eest(i)

```

```

a = 0.0d0
b = 12.0d0

c  Integrate from A to B
   area = dcsitg(a,b,nintv,break,cm)
   write(11,*)'area de e original= ', area

690  format(i5,3f10.6)

*****
c  escalamiento de la funcion de distribucion
   do j=1,nn
     e1(j) = e(j)/float(nc)
     t1(j) = t(j)*float(nc)
   end do
c  Interpolate
   call dcsint (n, t1, e1, break3, cm3)

   do 79 i = 1,n
     punto = t1(i)
     write(11,*)'tiempo = ', t1(i),e1(i)
c     ncoef = n
79  eest(i) = dcsval(punto,nintv,break3,cm3)
   do 212 i=1,n
212  write(11,692) i,t1(i),e1(i),eest(i)

     a = 0.0d0
     b = 36.0d0

c     Integrate from A to B
     area = dcsitg(a,b,nintv,break3,cm3)
     write(11,*)'area de escalada = ', area
692  format(i10,3f16.10)

*****
c  cinetica de secado batch y continua

   do i=1, 8
     tt = t1(i)
c     eest(i) = dcsval(tt,nintv,break3,cm3)
     prod1(i) = rxpp(tt) * eest(i)
     write(11,*)'rxpp = ',rxpp(tt),'eest = ',eest(i)
   end do
   punto = 10.5
   do i = 8,23
     punto = punto + 1.5
c     eest(i) = dcsval(punto,nintv,break3,cm3)
     tt = punto

     prod1(i+1) = xsp(tt) * eest(i+1)
     write(11,*)'xsp= ',xsp(tt),'eest= ',eest(i+1)
   end do

```

```

c Interpolate
  call dcsint (21, t1, prod1, break1, cm1)
c call dcsint (n2, t12, prod2, break2, cm2)

694 format(i10,3f10.6)

      a = 0.0d0
      b=30.0

      a1=10.5
      b1=10.5
c Integrate from A to B
  hum1 = dcsitg(a,b,20,break1,cm1)
c hum2 = dcsitg(a1,b,nintv2,break2,cm2)
c xprom = hum1 + hum2

write(11,*)'xprom = ', hum1

close(11,status='keep')
stop
end

double precision function rxpp(t1)
  implicit double precision (a-h,o-z)
  data a1,a2,b1,b2/0.1368,2.0750,190.613215,2287.6193/
  data x1,x2/0.29284,0.12966/

INTRINSIC dexp

      t1 = t1
      pt1 = 292.91137+18.62361*t1-5.12279*t1**2+0.66571*t1**3
           - 0.02915*t1**4
      rxpp = x1*dexp((-a1)*dexp(-b1/pt1)*t1)

RETURN
END

double precision function xsp(t1)
  implicit double precision (a-h,o-z)

c INTRINSIC dexp

data a1,a2,b1,b2/0.1368,2.0750,190.613215,2287.6193/
data x1,x2/0.29284,0.12966/

      pt2 = 351.56583+t1 * 0.01887
      xsp = x2*dexp((-a2)*dexp(-b2/pt2)*t1)

RETURN
END

```

- c Universidad Autónoma Metropolitana - Iztapalapa
- c Maestría en Ingeniería Química

- c Programa para evaluar el secado de granos de trigo por lotes
- c y en continuo utilizando el modelo de equilibrio térmico
- c de Zahed y Epstein (1992)

- c Programa elaborado por M.I.Q. Carlos Martínez Vera e
- c I.Q. César Pérez Alonso, utilizando el método numérico
- c de trazadores cúbicos.

```

program dryz
implicit double precision (a-h,o-z)
double precision u(50),x(50),s(50),par(1)
double precision k,ms,xguess(50)
character*20 nombre,profile
common /dat01/n
common /dat0/x0,t0
common /dat1/u,s
common /dat2/ga,vs,ms,as
common /dat3/alfa,y1
common /dat4/dt,max
common /dat5/p,c,k
common /dat6/t1
common /dat8/rp
common /dat9/beta
common /dat10/hum
common /dat11/ca,cv,cs,cl
common /dat12/y

external fcn, dneqnf

write (*,*) 'archivo: '
read (*,22) nombre
write (*,*) 'profile file: '
read (*,22) profile

22 format(a20)

open(2,file = nombre)
open(312,file = profile)
open(10,file = ' secado.dat',status = 'unknown')
write (*,*) 'time sample : '
read (*,*) time

ts = time
call datos
du = 1.0d0/(n-1)
t = 0.0d0
sample = 2
write (*,*) ' sample : ',sample
do 5 j = 1,n
s(j) = x0
u(j) = (j-1)*du
u(j) = u(j)**beta

```

```

5  continue
   sn0 = 0.1d0

   do 32 j=1,n
32  x(j) = x0 +(sn0-x0)*u(j)

c   numero de ecuaciones
   ne  = n + 1
   itmax = 120
   errrel = .0001

c   *****
c   condicion inicial y aprox. inicial para la temperatura

   x(n+1) = t0
   s(n+1) = t0

   write(10,23) t,x0,x0,t0,y1

   do 20 i = 1,itmax

       do 24 j=1,n+1
24  xguess(j) = x(j)

       t = t + dt

       CALL UMACH (2, NOUT)

       sample = 2.1
       write (*,*) ' sample : ',sample
       call dneqnf(fcn,errrel,ne,itmax,xguess,x,fnorm)
       WRITE (NOUT,9999) (x(Kk),Kk=1,N), fnorm
9999 FORMAT (' The solution to the system is', /, ' x = (', 22F5.4,
&         '), /, ' with fnorm =', F10.6, //)
       sample = 2.2
       write (*,*) ' sample : ',sample

       write (*,23) t,hum,x(n+1) - 273.16d0
       do 15 j = 1,n
       write (*,23) u(j),x(j)
15  s(j) = x(j)

       if (dabs(t - ts) .lt. 1.0d-6) then
       write(10,23)t,hum,x(n),x(n+1)
       do 212 l = 1,n
       write (312,23) u(l),x(l)
212  continue

       ts = ts + time
       write(*,*)t,ts,time ',t,ts,time
       endif
       write(*,*)t,ts,time'
       write (*,23) t,hum

       s(n+1) = x(n+1)

```

20 continue

23 format (5f12.6)

```
close(10,status='keep')
close(2,status='keep')
close(312,status='keep')
```

```
stop
end
```

```
subroutine fcn(x,g,ne)
implicit double precision (a-h,o-z)
double precision x(50),g(50)
double precision cm(4,49),u(50),s(50),z(50),break(50)
double precision k,ms, cddf , cdf , cf , punto , punton
```

```
INTEGER n, ne, nintv
```

```
INTRINSIC dexp, dlog
EXTERNAL dcsint, dcsval, dcsder
```

```
common /dat01/n
common /dat0/x0,t0
```

```
common /dat1/u,s
common /dat2/ga,vs,ms,as
common /dat3/alfa,y1
common /dat4/dt,max
common /dat5/p,c,k
common /dat6/t1
common /dat8/rp
common /dat10/hum
common /dat11/ca,cv,cs,cl
common /dat12/y
common /dat20/umf,umfv,hl,rop,epsmf
```

```
do 5 j = 1,n
5 z(j) = u(j)
call dcsint (n, z, x, break, cm)
```

```
punto =u(1)
cdf = dcsder(1,punto,n-1,break,cm)
g(1) = cdf
dm = 0.0d0
do 10 j = 2,n-1
```

```
c *****
```

```
c difusividad efectiva del trigo (Zahed, 1992):
```

```
d = 4600.0d0*dexp(-6140.0d0/x(n+1))
```

```
c Becker y Sallans (1995)
```

```
d=(0.0265d0*dexp(-6502.0d0/x(n+1)))*(60*100*100)
```

```

c Vizcarra M.M. y col (1998)
c d=(0.0097d0*dexp(-4909.5d0/x(n+1)+(35.1811-0.11256*hum)))
c & *(60.0d0*100.0d0**2)

nintv = n - 1
punto = u(j)
c cf = dcsder(0,punto,nintv,break,cm)
c cdf = dcsder(1,punto,nintv,break,cm)
c cddf = dcsder(2,punto,nintv,break,cm)
g(j) = x(j) - s(j) - alfa*dt*(d*(punto*cddf + 1.5d0* cdf)
* + punto*dm*cdf**2)

c g(j) = x(j) - s(j) - alfa*dt*(d*(2.0d0*u(j)*cm(j,2) + cm(j,1))
c * + u(j)*dm*cm(j,1)**2)

10 continue

ponton = u(n)
dx = dcsder(1,ponton,nintv,break,cm)

dn=d
f = 1.0d0 - dexp(-k*(100.0d0*x(n))**2.2857d0*
& (x(n+1) - 273.16d0 + c))

pv = 100.0d0*dexp(27.0214d0 - 6887.0d0/x(n+1) -
& 5.31d0*dlog(x(n+1)/273.16d0))

y = 0.622d0*f*pv/(p - f*pv)
c *****
c condicion de frontera sin considerar resistencia en la interfase
c condicion de frontera u = 1, para humedad

c g(n) = dx - 0.5d0*rp*ga*vs*(y1 - y)/(ms*as*dn)
c *****
c condicion frontera considerando resistencia en la interfase
dp = 2.0d0*rp
aprima = (6.0d0)*(1.0d0 - epsmf)/dp

c mua= (1.098182747d-5*(t**0.5)/0.9783)*60
roa= 0.209374074/x(n+1)
daa= (0.3209228*((x(n+1)/292.3073725)**2.334))*60.0d0
gd = ga/(roa * 3250.0d0 * hl)
yp = y
yndif = 1.0d0 / (1.0d0 + yp)
remf = roa*dp*umf/mua
sc = mua/(roa*daa)
kt = (daa*(dp*yndif))*(2.0d0 + (1.8d0)*(remf**0.5)*(sc**0.33))
yd = (aprima*kt*yp + gd*y1)/(gd + aprima * kt)

g(n) = dx - 0.5d0*rp*roa*(y1 - yd)/((rop*dn)*(1/kt + aprima/gd))

```

```
*****
```

```

c  calculo de humedad promedio
c  sample = 3.5
c  write (*,*) ' sample : ',sample
call average(x,rmav)

hum = rmav

c  wheat

f  = 1.0d0 - dexp(-k*(100.0d0*x(n))**2.2857d0*
*   (x(n+1) - 273.16d0 + c))

pv = 100.0d0*dexp(27.0214d0 - 6887.0d0/x(n+1) -
*   5.31d0*dlog(x(n+1)/273.16d0))

y  = 0.622d0*f*pv/(p - f*pv)

c  ecuacion para la entalpia del trigo

dh = 0.462d0*x(n+1)**2*(6887.0d0/x(n+1)**2 - 5.31d0/x(n+1) +
&   ((1.0d0 - f)*k*(100.0d0*x(n))**2.2857d0)/f)
c  *****
c  ecuacion para la temperatura

&   g(n+1) = x(n+1) - s(n+1) - dt*(ga*(ca + y1*cv)*(t1 - x(n+1)) -
&   ga*(y - y1)*dh)/(ms*(cs + hum*cl))

c  si se tiene el cp del solido humedo:
c  g(n+1) = x(n+1) - s(n+1) - dt*(ga*(ca + y1*cv)*(t1 - x(n+1)) -
c  &   ga*(y - y1)*dh)/(ms*cs)
c  ++++++
return
end

subroutine average(x,rmav)
implicit double precision (a-h,o-z)
double precision u(50),x(*),break(50)
double precision cscoef(4,49),fu(50),s(50)
external dcsint ,dcsitg
common /dat01/n
common /dat0/x0,t0
common /dat1/u,s

c  sample = 4.0
c  write (*,*) ' sample : ',sample
do 10 j = 1,n
    fu(j) = u(j)**0.5d0*x(j)
10 continue
call dcsint (n, u, fu, break, cscoef)
c  ic = 49
a = u(1)
c  Compute the integral of F over
c  (a,b)
nintv = n-1

```



```

    q = dcsitg(a,b,nintv,break,cscoef)
    rmav = 1.5d0*q
c   sample = 4.1
c   write (*,*) ' sample : ',sample
    return
    end

subroutine datos
implicit double precision (a-h,o-z)
double precision k,ms
common /dat01/n
common /dat0/x0,t0
common /dat2/ga,vs,ms,as
common /dat3/alfa,y1
common /dat4/dt,max
common /dat5/p,c,k
common /dat6/t1
common /dat8/rp
common /dat9/beta
common /dat11/ca,cv,cs,cl
common /dat20/umf,umfv,hl,rop,epsmf

n = 30.0
  x0 = .2945
  t0 = 293.15
  ga = 10191.8142d0
  vs = 0.0335
  ms = 8000.0
  as = 0.5026
  alfa = 100.0
  y1 = 0.001d0
  dt = 0.5d0
  max = 2500
  p = 7.7974d04
  c = 55.82
  k = 2.3008d-05
  t1 = 343.16
  rp = 0.2
  beta = .50
  ca = 1.013
  cs = 1.255
  cv = 1.885
  cl = 4.184
  vs = 4.*3.1416*rp**3/3.
  as = 4.*3.1416*rp**2
  umf = 7800.0d0
  umfv = 3960.0d0
  ug = 4.71589
  rop = 1.323d0
  hl = 5.5d0
  epsmf = 0.455d0
  rg = 8.206d-05
  alfa = 4.0d0/rp**2

return
end

```