



Facultad de Ingeniería
Universidad Nacional de La Plata

**DISEÑO DE SECADORAS CONTINUAS DE TRIGO.
SIMULACION DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR Y
MATERIA Y DE PERDIDAS DE CALIDAD**

SERGIO ADRIAN GINER

Tesis presentada como requisito para la obtención del grado de

DOCTOR EN INGENIERIA

**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA QUIMICA
FACULTAD DE INGENIERIA
UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA**

NOVIEMBRE DE 1999

El presente trabajo de tesis para optar al título de Doctor en Ingeniería, fue realizado en el Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos, Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de la Plata-CONICET, con la dirección del Dr Rodolfo Horacio Mascheroni y la co-dirección de la Dra María Cristina Añón.

*No tenemos el dinero,
así que debemos pensar*

Ernest Rutherford (1871-1937)

INDICE

CAPITULO 1. PARTE INTRODUCTORIA.

- 1.1. Ingesta de cereales y nutrición
- 1.2. Significación económica del trigo y otros granos
- 1.3. Producción y utilización del trigo
- 1.4. Necesidad de secado artificial
- 1.5. Evaluación del daño por secado artificial de trigo
- 1.6. Capacidad de secado en Argentina y tipos de secadoras utilizadas
- 1.7. Datos técnicos de secadoras de flujo cruzado
- 1.8. La estacionalidad en el secado de granos
- 1.9. Métodos de secado/enfriamiento de granos
- 1.10. Objetivo de este trabajo
- 1.11. Temas incluidos en este trabajo de tesis

CAPITULO 2. DISEÑO DE SISTEMAS DE VENTILACION FORZADA PARA SILOS Y SECADORAS.

- 2.1. INTRODUCCION
- 2.2. REVISION DE LITERATURA PREVIA
- 2.3. TEORIA
 - 2.3.1. Pérdida de carga en lechos rellenos: ecuación de Ergun.
 - 2.3.2. Régimen de flujo de aire en distintas operaciones de la postcosecha de trigo
- 2.4. MATERIALES Y METODOS
 - 2.4.1. Trigo y finos
 - 2.4.2. Determinación de contenido de humedad
 - 2.4.3. Preparación de muestras húmedas de trigo
 - 2.4.4. Determinación de densidad y volumen de semilla, y densidad de lecho
 - 2.4.5. Medición de dimensiones de los granos
 - 2.4.6. Preparación de lechos de granos mezclados con finos
 - 2.4.7. Experiencias de pérdida de carga
 - 2.4.7.1. Equipo
 - 2.4.7.2. Técnica Experimental
- 2.5. RESULTADOS Y DISCUSION

- 2.5.1. Caracterización de la variedad de trigo utilizada
- 2.5.2. Comparación con caracterizaciones de otros autores
- 2.5.3. Verificación de datos medidos de pérdida de carga y predicción de la ecuación de Ergun (ec. (2.15)).
- 2.5.4. Expresión elegida para predecir pérdidas de carga
- 2.5.5. Efecto de la humedad del grano en la pérdida de carga en trigo
- 2.5.6. Efecto del contenido de finos en la pérdida de carga
- 2.5.7. Efecto de la temperatura en la pérdida de carga
- 2.5.8. Diseño de gráficos de estimación de la potencia de aireación

CAPITULO 3. PSICROMETRIA Y EVAPORACION DE AGUA PURA

3.1.PSICROMETRIA

3.1.1. INTRODUCCION

3.1.2. DEFINICIONES BASICAS EN PSICROMETRIA

3.1.2.1. Aire seco y húmedo

3.1.2.2. Humedad absoluta

3.1.2.3. Grado de saturación del aire y humedad relativa

3.1.2.4. Entalpía del aire húmedo

3.1.3. PROPIEDADES DEL AIRE Y AGUA UTILIZADOS EN ESTE TRABAJO

3.1.4. TRAZADO DE CURVAS DE IGUAL HUMEDAD RELATIVA

3.1.5. TEMPERATURA DE SATURACION ADIABATICA (T_{sa}) Y TRAZADO DE CURVAS A T_{sa} CONSTANTE

3.1.6. DIAGRAMA PSICROMETRICO BASICO

3.1.6.1. Diagrama psicrométrico y eficiencias de secado

3.1.7. MEDICION PSICROMETRICA DE LA HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE Y TEMPERATURA DE SATURACION ADIABATICA

3.1.8. MEDICION PSICROMETRICA DE LA HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE Y TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO

3.1.8.1. Situaciones de no equilibrio estacionario y equilibrio dinámico

3.1.8.2. Relación entre la humedad del aire y la temperatura de bulbo húmedo

- 3.1.8.3. Semejanza entre la ecuación de bulbo húmedo y la de saturación adiabática
- 3.1.8.4. Evaluación de la relación de coeficientes de transferencia para la ecuación de bulbo húmedo
- 3.1.8.5. Comparación de los valores de temperatura de saturación adiabática y de bulbo húmedo para el sistema aire seco-vapor de agua
- 3.1.8.6. Importancia de diferenciar las temperaturas de bulbo húmedo y saturación adiabática en el cálculo de la humedad relativa
- 3.1.9. TEMPERATURA DE ROCIO
- 3.1.9.1. Utilización del concepto de punto de rocío en la determinación y control de humedad relativa
- 3.1.10. PROGRAMA DE CALCULOS PSICROMETRICOS: CURVAS DEL DIAGRAMA Y CALCULO DE VARIABLES EN UNA CONDICION DADA
- 3.2. EVAPORACION DE AGUA
- 3.2.1. ECUACIONES DE VELOCIDAD DE TRANSFERENCIA DE MATERIA Y CALOR
- 3.2.2. CALCULO DEL TIEMPO DE EVAPORACION
- 3.3. EVAPORACION DE AGUA EN SOLIDOS DE ALTA HUMEDAD
- 3.3.1. DEFINICION DE SECADO DE SOLIDOS
- 3.3.2. PERIODO DE VELOCIDAD CONSTANTE constante
- 3.3.2.1. Ejemplo de curva de secado de un alimento de alta humedad inicial

CAPITULO 4. EQUILIBRIO SORCIONAL

4.1. INTRODUCCION

- 4.1.1. Disminución de la presión de vapor del trigo respecto al valor de agua pura.
- 4.1.2. Humedad de equilibrio de los granos (W_e)
- 4.1.3. Métodos de medición de datos de equilibrio
- 4.1.4. Isoterma típica en cereales

4.2. MODELOS FENOMENOLOGICOS DE ISOTERMAS DE SORCION

- 4.2.1. Preselección de una ecuación fenomenológica simple para la predicción de isotermas de sorción
- 4.2.2. Comparación de ecuación de Henderson-Thompson para trigos duros y blandos

- 4.2.3. Comparación de la ecuación de Henderson-Thompson trigo duro con datos experimentales
- 4.2.4. Funcionalidad con la temperatura en isothermas y humedades de seguridad
- 4.3. ANALISIS DE MODELOS TEORICOS DE SORCION
- 4.3.1. Descripción del modelo de Guggenheim, Anderson y De Boer (G.A.B. o GAB)
- 4.4. Presión de vapor de agua adsorbida
- 4.5. Calor de sorción del agua adsorbida en los granos
- 4.5.1. Método de Clapeyron-Isoterma de sorción
- 4.5.2. Comparación del Método Clapeyron-Isoterma de sorción con el de Othmer
- 4.6. Isothermas de cereales y oleaginosas
- APENDICE: Datos de a_w de soluciones salinas saturadas a distintas temperaturas (Hall, 1971)

CAPITULO 5. ANALISIS PRELIMINAR DE SECADO DE ALIMENTOS

- 5.1. INTRODUCCION
- 5.2. RESULTADOS Y DISCUSION
- 5.2.1. Velocidad de secado constante en un sólido
- 5.2.2. Curvas experimentales de secado de un alimento de alta humedad
- 5.2.3. Estimación de la duración del período de velocidad constante de secado (PVCS)
- 5.2.4. Mecanismos controlantes al pasar la velocidad de secado de constante a decreciente
- 5.2.4.1. Análisis del concepto de humedad crítica en secado de alimentos
- 5.2.4.2. Análisis del cambio de mecanismo de secado, de velocidad constante a decreciente, en términos de resistencias al flujo de agua
- 5.2.4.2.1. Análisis de resistencias internas y externas al flujo de agua
- 5.2.5. Formas de transporte interno de agua
- 5.2.6. Inadecuabilidad de modelados muy simplificados para el período de velocidad decreciente
- 5.2.7. Parte final de la curva de secado
- 5.2.8. Solución analítica del modelo difusivo en geometría plana: estimación del tiempo del período de velocidad decreciente

5.2.9. Modelo de la curva característica

5.2.10. Ejemplo de cálculo de tiempo de secado total y prediseño de secadora para secado de una capa de alimento

CAPITULO 6. SECADO DE GRANOS INDIVIDUALES DE TRIGO POR LA TECNICA DE CAPA DELGADA. DETERMINACION DE PARAMETROS CINETICOS.

6.1. INTRODUCCION

6.2. ANALISIS DE LITERATURA PREVIA

6.2.1. Ecuaciones de Parámetros Globalizados (EPG)

6.2.2. Modelos de parámetros distribuidos (MPD) para granos individuales como parte de un modelo de secado en lechos altos

6.2.3. Tipo de modelo usado para capa delgada en este trabajo

6.3. TEORIA: PLANTEO DE LAS ECUACIONES Y SUPOSICIONES

6.3.1. Balance microscópico de materia con transporte difusivo

6.3.2. Balance microscópico de energía con conducción no estacionaria en el grano

6.3.3. Mecanismos controlantes en las velocidades de transferencia de calor y materia. Cálculo de números de Biot.

6.3.3.1. Cálculo de propiedades

6.3.3.2. Biot de transferencia de calor

6.3.3.3. Biot de transferencia de materia

6.3.4. Análisis de la suposición de secado isotérmico en capa delgada

6.3.5. Solución analítica de la ecuación de difusión

6.3.5.1. Solución analítica en serie infinita y ajuste del coeficiente de difusión a datos de secado en capa delgada

6.3.5.2. Ecuación difusiva de secado en capa delgada utilizada en este trabajo

6.4. MATERIALES Y METODOS

6.4.1. Material

6.4.2. Preparación del material para las experiencias de secado en capa delgada

6.4.3. Equipo de secado en capa delgada

6.4.4. Técnica experimental de obtención de datos

6.5. RESULTADOS Y DISCUSION

6.5.1. Condiciones operativas

6.5.2. Efecto de la temperatura del aire

6.5.3. Efecto de la humedad inicial del grano

6.5.4. Ajuste de la ecuación de Becker a los datos de secado de trigo en capa delgada

6.5.5. Comparación de valores observados y predichos de las curvas de secado en capa delgada

6.5.6. Comparación del coeficiente de difusión obtenido en este trabajo con los presentados por otros autores

APENDICE: Deducción de la ecuación difusiva de tiempos cortos (Becker, 1959)

CAPITULO 7. MODELADO DEL SECADO DE TRIGO EN LECHO FIJO

7.1 INTRODUCCION

7.1.1. Parte general

7.1.2. Modelo a desarrollarse para secado de trigo en lecho fijo en relación a contribuciones previas

7.1.3. Objetivos del capítulo

7.2. DESARROLLO DEL MODELO DE SECADO DE TRIGO EN LECHO FIJO

7.2.1. Consideraciones generales

7.2.2. Suposiciones

7.2.3. Balances de conservación

7.2.4. Forma inicial de las ecuaciones de secado. Balances de materia y energía

7.2.4.1. Balances de materia: agua

7.2.4.2. Balances de energía

7.2.5. Representación matemática de los balances de energía en aire intergranular y grano usando variables medibles

7.2.6. Formas finales de los balances de energía en granos y aire intergranular de la capa.

7.2.7. Velocidad de secado en la capa

7.2.8. Resumen de las ecuaciones de cambio necesarias para modelar el secado de granos en lecho fijo

7.3. PARAMETROS DE LAS ECUACIONES DE SECADO

7.3.1. Propiedades del agua y aire

7.3.2. Propiedades del grano y lecho

7.4. RESOLUCION NUMERICA DEL MODELO DE SECADO EN LECHO FIJO

7.4.1. Algoritmo básico de integración numérica de ecuaciones de secado en lecho fijo

7.4.2. Descripción del método numérico específico de resolución

7.4.2.1. Integración en la dirección z a un tiempo dado

7.4.2.2. Integración en el tiempo, t

7.4.3. Características de la implementación del modelo en un programa de simulación

7.5. MODELADO DE LA CONDENSACION DE AGUA EN GRANOS

7.6. RESULTADOS Y DISCUSION

7.6.1. Variables y parámetros que influyen el tiempo de secado

7.6.2. Comparación de predicciones del modelo con datos experimentales

7.6.2.1. Datos de Warner y Browne (1962)

7.6.2.2. Datos de Clark y Lamond (1968), Woodforde y Lawton (1965) y O'Callaghan y colab. (1971)

7.6.2.3. Error porcentual medio de la convalidación

7.6.2.4. Análisis de las posibles fuentes de desviación del modelo frente a datos experimentales

CAPITULO 8. MODELO CINETICO DE PERDIDA DE GERMINACION DURANTE EL SECADO DE TRIGO CON AIRE CALIENTE

8.1. INTRODUCCION

8.1.1. Antecedentes y justificación

8.1.2. Objetivos

8.2. MATERIALES Y METODOS

8.2.1. Trigo

- 8.2.2. Preparación de las muestras para el secado
- 8.2.3. Equipo y Técnica Experimental de secado
- 8.3. RESULTADOS Y DISCUSION
- 8.3.1. Datos experimentales medidos
- 8.3.2. Análisis inicial de los datos experimentales
- 8.3.3. Interpretación del fenómeno de pérdida de germinación
- 8.3.4. Relaciones matemáticas previas entre condiciones del grano y daño a la viabilidad
- 8.3.4.1. Ecuaciones de calentamiento hermético (sealed heating equations)
- 8.3.4.2. Modelo probabilístico
- 8.3.4.3. Modelo cinético de Schreiber y colab. (1981)
- 8.3.5. Desarrollo del modelo cinético de primer orden para condiciones variables
- 8.3.6. Ajuste del modelo cinético a los datos experimentales
- 8.3.7. Método del tiempo fraccional
- 8.3.8. Comparación de datos predichos y experimentales
- 8.3.9. Predicciones del efecto de la humedad y la temperatura del grano en la constante cinética de primer orden.
- 8.3.10. Posibles aplicaciones del modelo

CAPITULO 9. EXTENSION DEL MODELO PARA SECADORAS CONTINUAS DE FLUJO CRUZADO. CONVALIDACION EXPERIMENTAL

9.1.INTRODUCCION

9.1.1. Sistemas de secado en flujo cruzado

9.1.2. Antecedentes y trabajos previos

9.1.3. Objetivos del capítulo

9.2. MODELADO DEL SECADO EN SECADORAS DE FLUJO CRUZADO

9.2.1. Características del secado continuo en flujo cruzado

9.2.2. Adaptación del programa de simulación de secado en lecho fijo al caso continuo de secado/enfriamiento.

9.2.2.1. Inclusión de la etapa de enfriamiento

9.2.2.2. Inclusión de la cinética de pérdida de germinación

9.3. RESULTADOS Y DISCUSION

9.3.1. Datos y resultados de los ensayos de secadoras de flujo cruzado

9.3.2. Descripción de las secadoras usadas en los ensayos

9.3.3. Aspectos específicos de la simulación de cada secadora

9.3.4. Comparación de parámetros de comportamiento predichos y observados

CAPITULO 10. SIMULACION DE SECADORAS CONTINUAS DE FLUJO CRUZADO. EFECTO DE CONDICIONES OPERATIVAS Y ESTUDIO DE DIVERSOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO.

10.1 INTRODUCCION

10.2. RESULTADOS Y DISCUSION

10.2.1 Etapa de secado solamente

10.2.1.1. Efecto de las variables principales en parámetros de comportamiento seleccionados.

10.2.1.1.1. Efecto del espesor de lecho

10.2.1.1.2. Efecto de la temperatura del aire de secado a distintas humedades iniciales de grano

10.2. Secadora continua con secado y enfriamiento

10.2.1 Predicción de curvas de humedad y temperatura de grano en secadora convencional.

10.2.2. Efecto del flujo de aire en la operación de la secadora de flujo cruzado con secado y enfriamiento

10.2.3. Mejoras en la homogeneidad del tratamiento: simulación de secadoras de flujo cruzado con cambio de dirección del flujo de aire

10.2.4. Simulación de secadoras de flujo cruzado con recirculación de aire

10.2.5. Simulación de secadoras de flujo cruzado combinando cambios de dirección del flujo de aire y recirculación del aire de salida.

10.3. Análisis de sensibilidad paramétrica del programa de simulación de secadoras de flujo cruzado

CAPITULO 11. CONCLUSIONES

CAPITULO 1. PARTE INTRODUCTORIA

CAPITULO 1. PARTE INTRODUCTORIA

1.1. Ingesta de cereales y nutrición

Cheftel y colab. (1977) indican que la distribución de las fuentes de calorías en el consumo humano debería guardar las siguientes proporciones: calorías aportadas por glúcidos (4 kcal/g), 55-65%; por lípidos (9 kcal/g), 25-35% y por próticos (4 kcal/g), 10-15%. Informan, asimismo, que los alimentos que proveen calorías representan 9/10 de la ración: glúcidos, 300-400 g/día; lípidos, 60-90 g/día; próticos, 60-90 g/día, representando entre 1980 y 2770 kcal/día, según peso corporal y actividad. Las masas indicadas no incluyen agua.

Los alimentos pueden dividirse en 4 grupos básicos: Granos , Lácteos, Hortifrutícolas y Carnes. En éste último grupo, se incluyen huevos, legumbres secas y fruta seca (nueces, etc.). Hui (1992) define las porciones para cada grupo y lista el número de porciones requeridas para obtener una nutrición adecuada. La "pirámide nutricional" es una representación gráfica de la dieta equilibrada, donde la base es ocupada por los alimentos que deben ingerirse en mayor proporción, que disminuye verticalmente. Si bien ningún grupo es más importante cualitativamente que los otros, las cantidades relativas requeridas son diferentes, siendo los alimentos del grupo granos, los que aportan la mayor proporción de calorías, más a través de carbohidratos que de proteínas. Obsérvese que los lípidos ya forman parte constituyente de los lácteos y del grupo de carnes-huevos, etc. La punta de la pirámide muestra grasas extraídas (manteca, principalmente), aceites vegetales y también los dulces. Las grasas de origen animal son mayormente lípidos saturados, y un alto consumo de las mismas tiende a aumentar el nivel de colesterol en sangre, con riesgos de aterosclerosis y problemas cardíacos. A efectos de seleccionar una dieta más saludable, los aceites vegetales, en sus diversas formas, son una alternativa a las grasas saturadas extraídas, puesto que contienen lípidos insaturados (BMA, 1990). Los azúcares (mono y disacáridos), deben limitarse. El alcohol (7 kcal/g) también puede agregar muchas calorías a la dieta. La Figura 1.1. muestra un esquema de la pirámide nutricional (Compton's New Media, 1995).

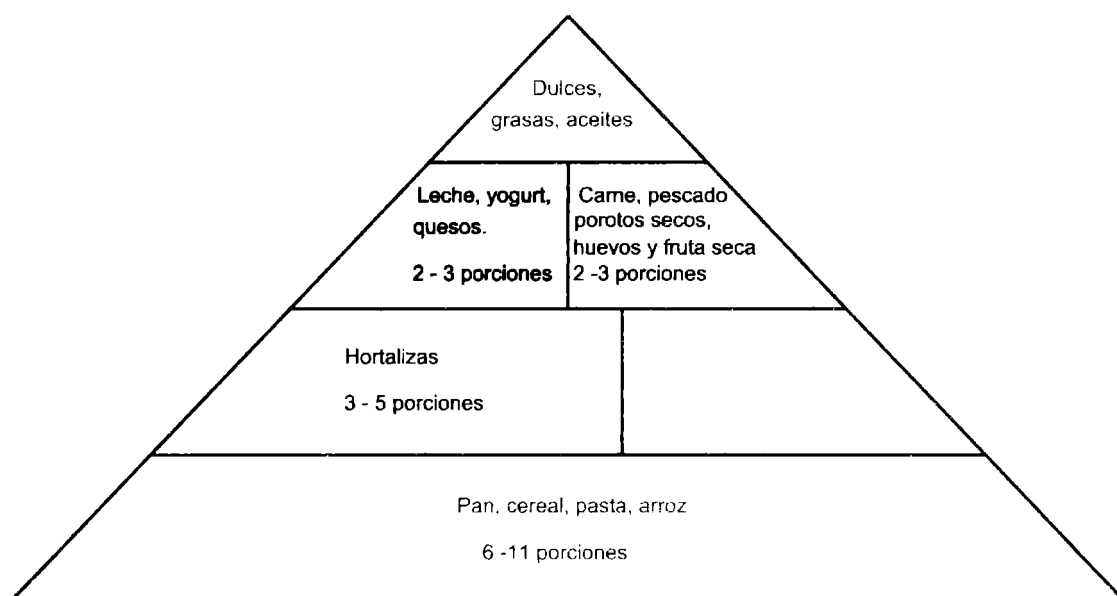


Figura 1.1. Pirámide nutricional

1.2. Significación económica del trigo y otros granos

La producción mundial de trigo es de alrededor de 550 millones de toneladas (Mt) anuales (Bolsa de Cereales, 1996), que representan, aproximadamente, 1/4 kg de este grano por persona y por día. Dada la producción comparable de otros cereales como arroz y maíz, la de oleaginosas, productos frutihortícolas, lácteos y carnes, se observa que sería posible satisfacer las demandas alimenticias actuales, a pesar del alto crecimiento demográfico global. Las altas producciones alimentarias logradas se han debido al uso cada vez más intensivo de la tecnología y el conocimiento sistematizado.

Entre trigo grano entero y harina, se comercian 90 Mt entre países o comunidades de naciones (Bolsa de Cereales, 1996); los principales exportadores de trigo son Estados Unidos (26 Mt), Canadá (19 Mt), la Unión Europea (14 Mt), Australia (12 Mt) y Argentina (9 Mt). El valor de las exportaciones argentinas de trigo y harinas supera los 1500 millones de dólares anuales, lo que refleja su importancia en la balanza comercial del país.

Argentina produce actualmente más de 50 Mt de granos, de los cuales la mayor parte la constituyen cereales como trigo, maíz, arroz y sorgo, y oleaginosas como soja, girasol y maní. Las exportaciones globales de grano entero, harinas, aceite y otros alimentos de mayor valor agregado superan los 15000 millones de dólares, representando más del 50% de las exportaciones totales.

Sin embargo, suelen observarse fluctuaciones en la producción total debido a múltiples causas como cotizaciones internacionales de los granos, aspectos agroclimáticos (Damario y Pascale, 1988) y condiciones socioeconómicas.

1.3. Producción y utilización del trigo

La evolución de la producción de trigo en Argentina se muestra a continuación, en base a datos de la Bolsa de Cereales (1996). Todos los datos son promedio de 10 campañas, excepto el valor asignado a 1995, promedio de 5 años.

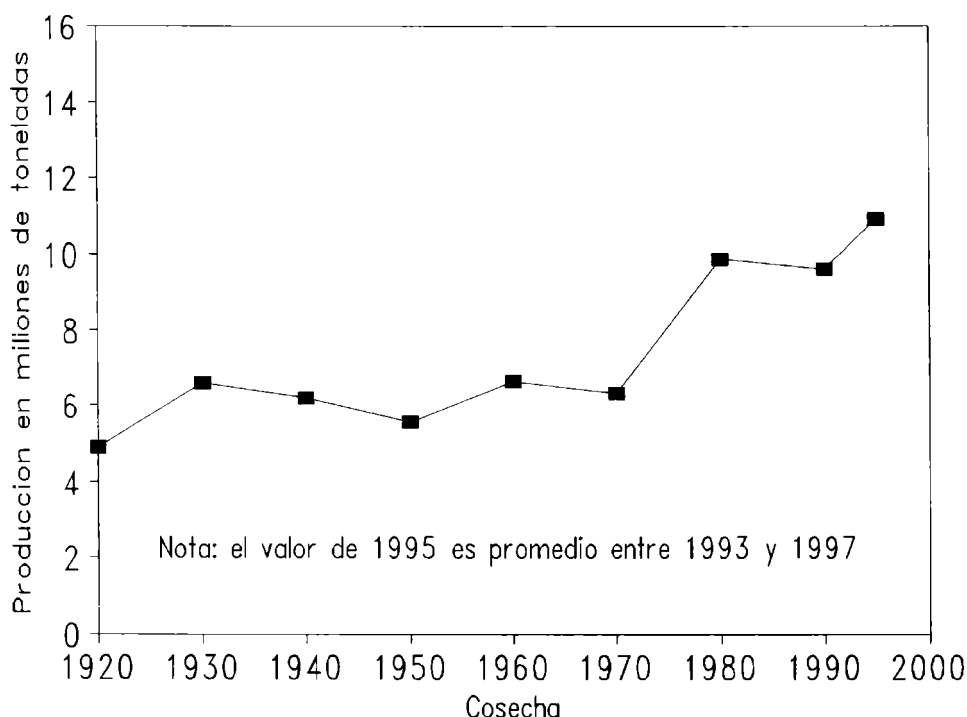


Figura 1.2. Producción argentina de trigo desde 1920. Datos promedio de 10 cosechas.

Secadoras continuas de trigo

La Figura 1.2. muestra un crecimiento gradual, con perspectivas de incrementarse más rápidamente en el futuro por los mayores rendimientos que se están obteniendo.

En cuanto a la utilización del trigo en Argentina, la Figura 1.3. permite observar que el mismo se ha repartido entre industrialización y exportación de grano entero.

La industrialización primaria del trigo se destina, principalmente, a la producción de harinas blancas, obtenidas por remoción de la cubierta y del germen del grano. No obstante, se utilizan en forma creciente las harinas integrales, que, al incluir la fibra del salvado de trigo (parte exterior del grano que además aporta más minerales y vitaminas), beneficia el sistema digestivo (BMA, 1990).

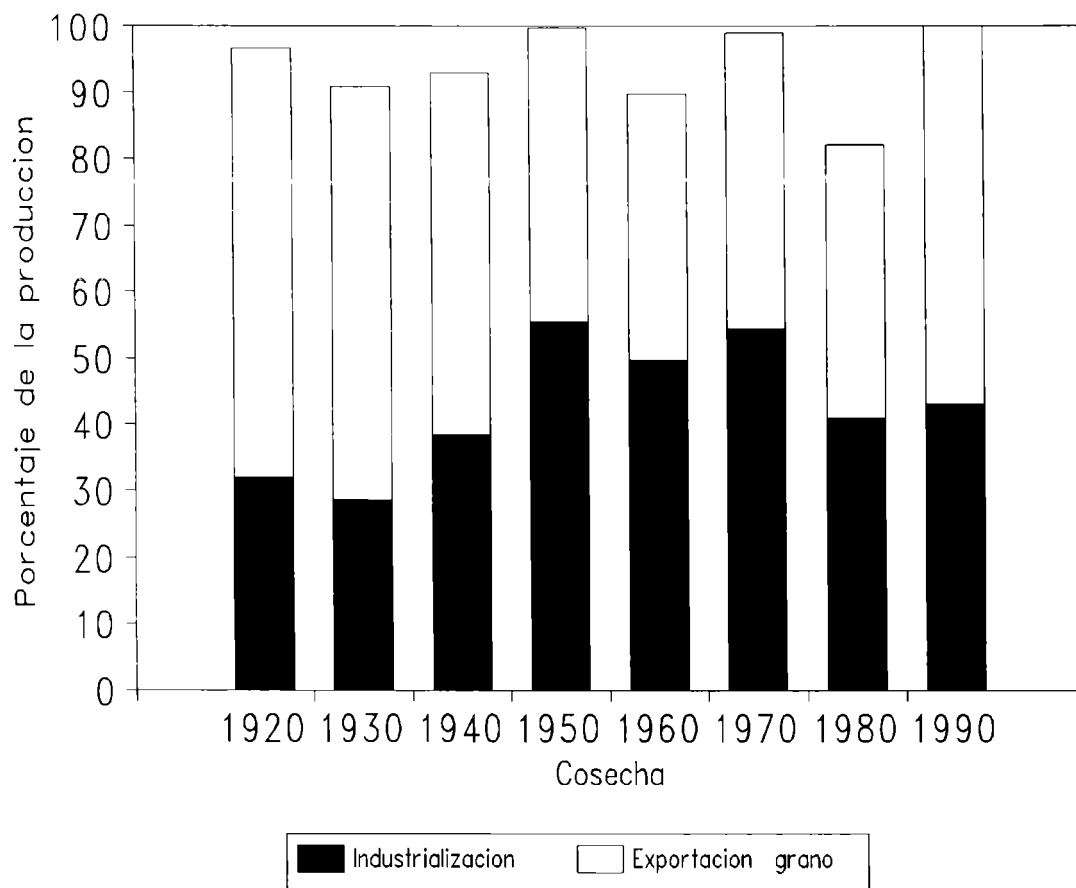


Figura 1.3. Uso de la producción Argentina de trigo. Datos promedio de 10 cosechas

Las harinas panificables y o las destinadas a galletitas se obtienen del *Triticum aestivum*. Para panificación, éste se prefiere del tipo "duro" -o trigo pan- con mayor contenido de proteínas. El tipo "blando" se emplea en galletitas, y en ocasiones, en la industria fideera. Sin embargo, para fideos, se prefiere el trigo "candeal", *Triticum Durum*.

La tecnología del trigo se asocia a la capacidad de transformarlo en productos de panadería, y la calidad panadera depende de la capacidad de la harina de lograr un producto de buen volumen. Esta capacidad, exclusiva del trigo, depende de la cantidad y calidad de sus proteínas (Lupano, 1986). Las proteínas de la harina de trigo se clasifican en dos grupos. Uno de ellos comprende las albúminas, solubles en agua y las globulinas, solubles en soluciones salinas diluídas. El otro, incluye las gliadinas, solubles en alcohol 70-90% y las gluteninas, que, insolubles en los medios anteriores, deben extraerse con ácidos, álcalis, detergentes, urea, etc. (Lupano, 1986). Actualmente, éstas dos últimas se denominan prolaminas pobres y ricas en azufre, de baja y alta masa molecular, respectivamente (Shewry y Tatham, 1990). Se ha demostrado la existencia de una relación positiva entre el contenido de proteínas de la harina y el volumen de pan obtenido a partir de estas harinas. Una gran proporción de la proteína de la harina de trigo comprende el complejo viscoelástico del gluten, que es en gran medida responsable de las propiedades de la masa y la capacidad de panificar de esta harina. El gluten es el material viscoelástico que se forma cuando una masa de harina y agua se lava con un exceso de esta última para separar el almidón y otros componentes solubles. El gluten no está formado totalmente por proteínas, sino que posee un 75-85 % en peso de ellas; también incluye almidón residual, lípidos, etc (Lupano, 1986). Los estudios relacionados con la calidad de las harinas y su correlación con la cantidad y calidad del gluten son muy importantes y permiten la selección progresiva de las mejores variedades de trigo pan. Con respecto a las pruebas de calidad panadera, el criterio más importante y definitivo para la calidad de una harina es el ensayo de panificación (Lupano, 1986). La tecnología del trigo y otros cereales ha sido descripta por Kent (1970).

Secadoras continuas de trigo

El porcentaje de proteínas de trigo pan argentino, en distintas campañas, se presenta en la Figura 1.4 (SAGyP, 1995)

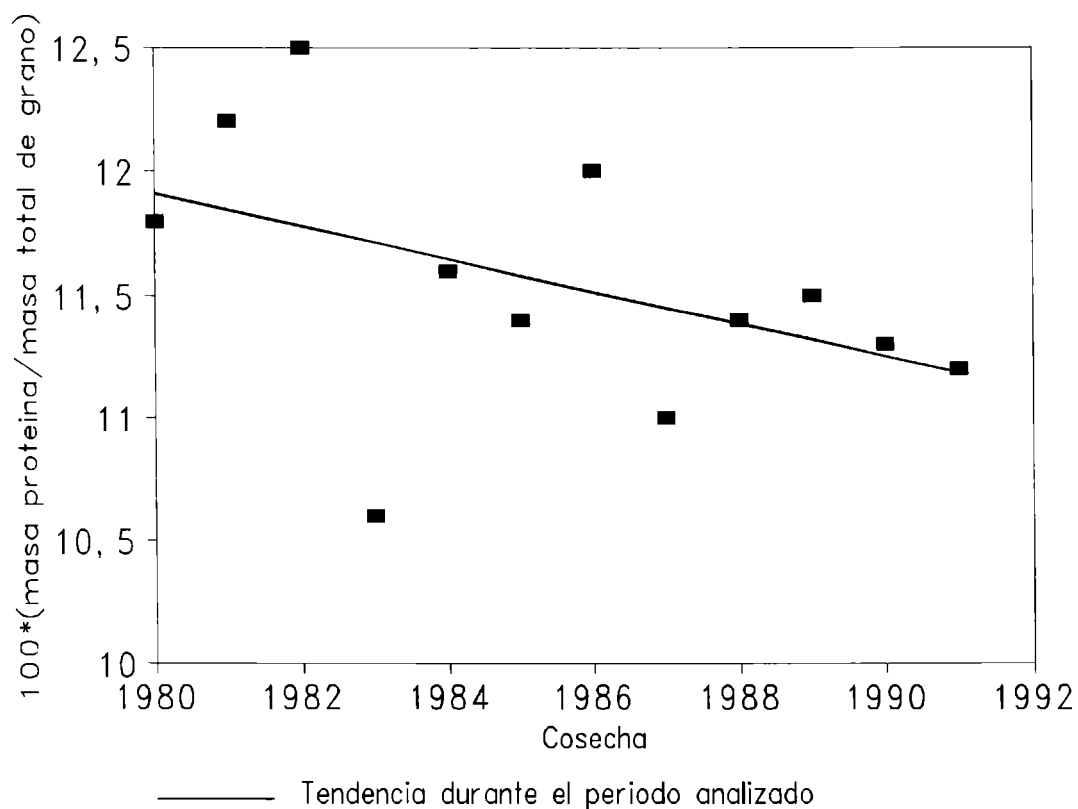


Figura 1.4. Porcentaje de proteínas de trigos argentinos durante 10 campañas. Base: grano con 13,5% de humedad (b.h.)

Más allá de la dispersión natural de los datos, que son promedio ponderado de numerosísimas determinaciones realizadas en el país, se puede observar, entre 1980 y 1991, una tendencia decreciente del contenido proteico de alrededor de 0,5%. Los estudios realizados atribuyeron ese decrecimiento, entre otros motivos, al incremento de los rendimientos por hectárea sin el agregado suficiente de fertilizantes (SAGyP, 1995).

Por este motivo, se instauró, a partir de la campaña 1995/96, un nuevo estándar de comercialización de trigo pan (SAGyP, 1994), con bonificaciones por porcentaje de proteínas superior al 11% (base trigo de 13,5% b.h. de humedad), y rebajas por debajo de ese valor. Se esperaba que ésto motivara a la obtención de trigos de mayor tenor proteico y, posiblemente, de mejor calidad panadera, que debe ser preservada mediante un buen secado.

1.4. Necesidad de secado artificial

En épocas anteriores, los granos se dejaban secar en la planta por efecto de agentes naturales como sol y viento. Sin embargo, se sufrían pérdidas elevadas en cosecha causadas por factores climáticos como lluvias (que a posteriori facilitaban la contaminación microbiana), volteo de las plantas y otros daños. Fue entonces que empezó a implementarse la técnica de la cosecha anticipada, promovida a su vez por la utilización de cosechadoras mecánicas. La nueva técnica implica recolectar los granos fisiológicamente maduros pero con contenidos de humedad más altos que los de almacenamiento seguro (14% b.h., 0,163 dec., b.s.). Es así que se creó la necesidad del secado artificial. En el caso del trigo, la cosecha temprana ha sido estimulada por el empleo del doble cultivo: luego de la cosecha de trigo se suele sembrar soja, denominada "soja de segunda" (cosecha).

Los cultivos criófilos como el trigo, que se siembran en invierno y se cosechan al comenzar el verano, tienen, naturalmente, menor necesidad de secado artificial que los termófilos como el maíz (De Dios, 1996). El maíz se siembra en primavera y se cosecha en otoño, con clima más frío y lluvioso requiriendo, al igual que la soja, ser secados artificialmente en mayor proporción. Las humedades de recibo de trigo y maíz en plantas de acopio argentinas, así como el porcentaje de la producción que debe secarse artificialmente, se muestra en la Figura 1.5. (IASCAV, 1993).

Secadoras continuas de trigo

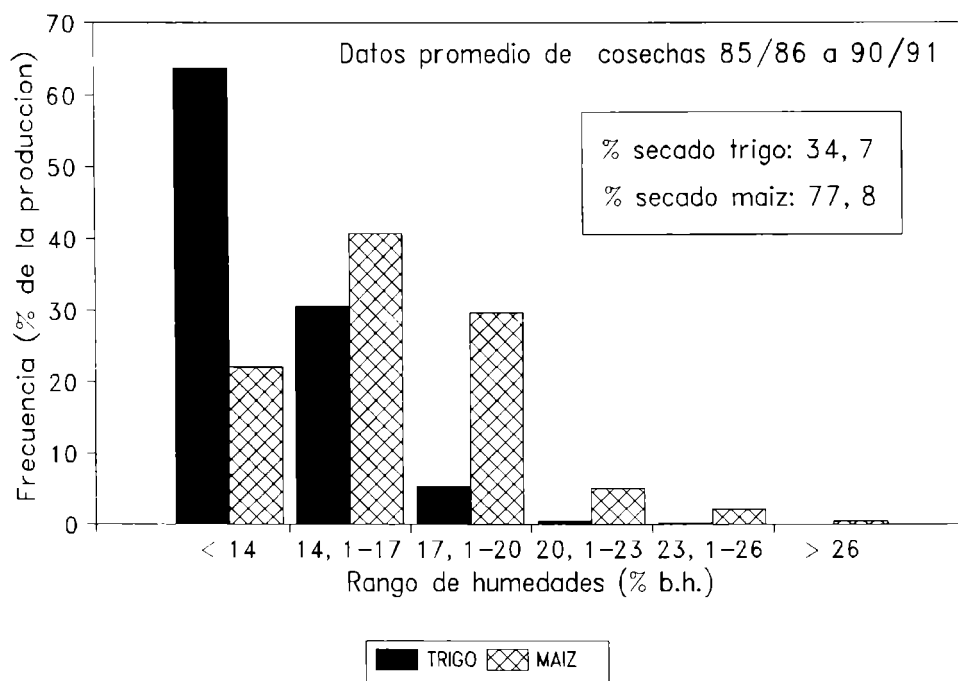


Figura 1.5. Humedades de recibo de trigo y maíz en Argentina, y porcentaje de secado artificial.

A pesar de que la proporción de trigo secado es de sólo el 35%, igualmente constituye, dada la producción, una inmensa cantidad de grano. Considerando, por ejemplo, una producción total anual de 12 Mt, entonces unos 4 Mt de trigo (con un valor de grano de alrededor de 700 millones de dólares) pasarían por secadoras de aire caliente. Si se toma una reducción de humedad de 3% en la secadora, la remoción del agua del trigo supera los 120000 t anuales, o 120 millones de kg. Tomando el calor de vaporización del agua en 2,5 MJ/kg y una eficiencia térmica del 40%, y considerando que el calentamiento del aire de secado se realiza con gas-oil (Poder calorífico inferior \approx 8600 kcal/l), el secado de trigo requeriría 21 millones de litros de combustible (aproximadamente 8 millones de dólares).

De Dios (1996) estimó un consumo total de gas-oil de 125 millones de litros para el calentamiento del aire de secado de todos los granos principales, que pudo haber aumentado

considerablemente, como consecuencia del aumento reciente de la producción agrícola.

Se observa entonces que las reducciones de consumo de combustible, así como la selección de condiciones para evitar el daño a las proteínas de los granos tienen una repercusión económica importante.

1.5. Evaluación del daño por secado artificial de trigo

Si bien no se dispone de estadísticas actualizadas para las pérdidas post-cosecha de granos en Argentina, estas se consideran porcentualmente altas, del 7 al 10% de la producción total (INTA, 1993). Las mismas son superiores a las de la Unión Europea (2-3%) y a las de Estados Unidos (3-5%), pero inferiores a la de muchos países de menor desarrollo (30%) (Giner, 1994). El INTA lanzó en 1993 un proyecto para disminuir las pérdidas post-cosecha de granos. En primer lugar, estimaron las pérdidas físicas en aproximadamente el 6%, causadas por daño mecánico de los granos durante su manipuleo en planta de acopio, limpieza inadecuada, deficiente conservación, daño por insectos y roedores, e inadecuadas instalaciones de almacenamiento. Asimismo, indicaron que las pérdidas por calidad agregaban otro 1-2%. En segundo lugar, se recomendaron métodos correctos de manejo post-cosecha en base a la tecnología existente, y pronosticaron que, de seguirse las sugerencias, las pérdidas post cosecha podían reducirse a 5-7% de la producción total.

Debe indicarse que la evaluación de pérdidas de calidad es dificultosa por la falta de utilización de instrumental disponible al realizarse las operaciones comerciales, o por la falta de técnicas adecuadas. Además está el problema de definir satisfactoriamente la "calidad", que variará de soja a maíz, y de éste a trigo; más aun, en un dado tipo de grano, dependerá también de su uso final (Bakker-Arkema, 1994).

En cuanto a trigo pan, el criterio de calidad está relacionado con su aptitud para la panificación: la calidad panadera. El estándar actualizado para comercialización de trigo (SAGyP, 1994) requiere la medición de proteínas totales, pero no incluye un ensayo de calidad de esas proteínas, posiblemente debido a la inexistencia de una técnica que reúna

Secadoras continuas de trigo

rapidez y confiabilidad al mismo tiempo. De esa manera, la magnitud de las pérdidas cualitativas post-cosecha, al menos en trigo pan, es difícil de conocer.

Pagano y colab. (1990) han presentado un trabajo de relevamiento de información poscosecha de granos, para los partidos de Olavarría y 9 de Julio de la Provincia de Buenos Aires. Entre los datos obtenidos, se incluyen las respuestas de los acopiadores respecto a las temperaturas utilizadas en la práctica real del secado de distintos granos. Los resultados para trigo y maíz, se muestran en la Figura 1.6.

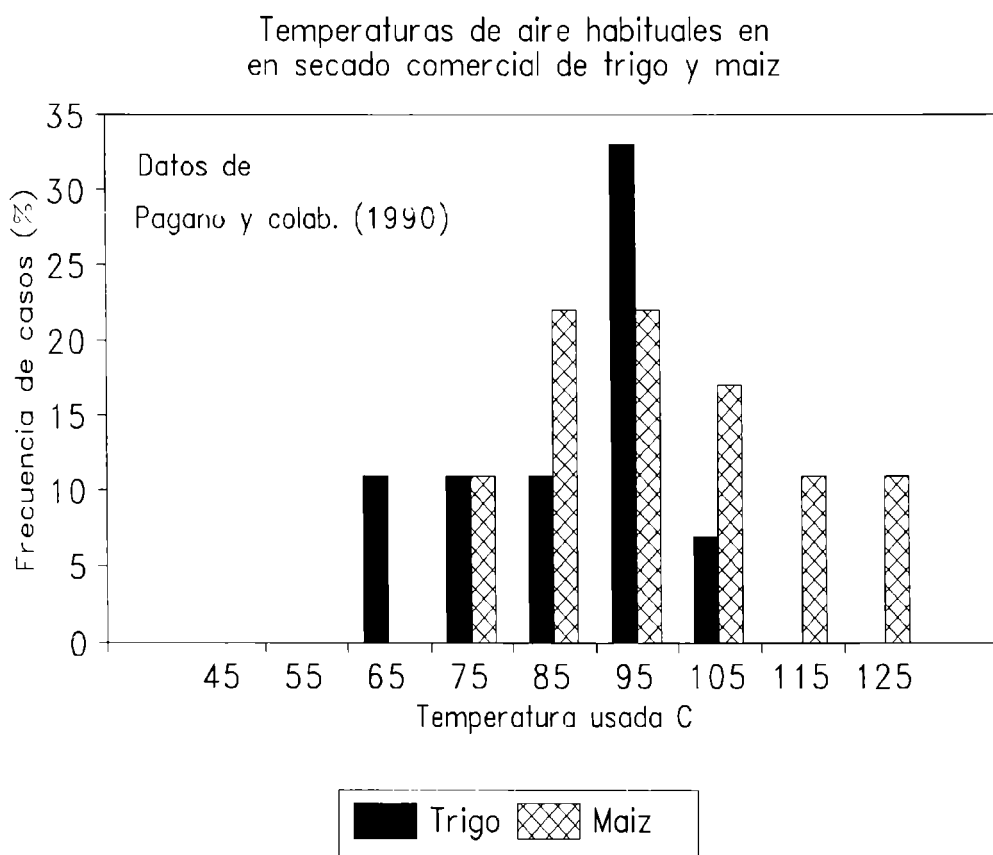


Figura 1.6. Temperaturas de secado de trigo y maíz en secadoras de aire caliente.

Se observa que el trigo se seca a 95°C más que a otras temperaturas. De acuerdo al trabajo de Bruce (1992) sobre evaluación de calidad panadera de trigo secado en capa delgada, se puede asumir que si ese trigo fuera destinado a pan, seguramente su calidad se habría dañado, al menos parcialmente.

Por las razones expuestas, sería necesario contar con un modelo matemático que pronostique el daño recibido por el trigo en secadoras continuas con aire caliente, a fin de seleccionar adecuadas condiciones de operación.

1.6. Capacidad de secado en Argentina y tipos de secadoras utilizadas

Al momento de redactarse esta tesis, se disponía de la siguiente información estadística para la capacidad instalada de secado en Argentina (Junta Nacional de Granos, 1985):

Tabla 1.1. Capacidad instalada de secado en Argentina (miles de t/h)

	1975	1981	1984
Buenos Aires	18,608	21,200	21,700
Córdoba	5,460	6,350	6,500
Santa Fé	10,880	13,200	13,500
La Pampa	0,992	1,760	1,800
Entre Ríos	1,290	1,340	1,370
Total	37,230	43,850	44,870

Durante el período 1974-1984, la tasa de crecimiento promedio de los sistemas de secado fue del 2,5% anual, inferior a las tasas de crecimiento de la producción y de la capacidad de almacenamiento de esa década (ambas del 6%).

En Argentina, el secado de granos es una actividad que utiliza máquinas relativamente grandes, capaces de secar más de 20 t/h. Esto es debido a que los granos, históricamente, no se han secado ni almacenado "en chacra" sino "fuera de chacra" (Giner, 1994), en

Secadoras continuas de trigo

instalaciones privadas o cooperativas denominadas plantas de acopio. Con el aumento de producción y del sector de procesamiento de granos, en los últimos años se han fabricado máquinas de mayor tamaño, 100-200 t/h. En Argentina, se utilizan tanto las secadoras de flujo cruzado ("de columna") como las de flujo mixto ("de caballetes"). Las secadoras de flujo mixto ingresan el aire a la columna de granos a través de conductos en "V" invertida, y el secado tiene lugar por medio de una combinación de arreglos aire-grano en contracorriente, cocorriente y flujo cruzado. Pagano y colab. (1990) observaron, en el partido de Olavarría, que la mayoría de las secadoras eran de flujo mixto mientras que en 9 de Julio, el 53,3% eran de flujo cruzado. Las cifras nacionales seguramente mostrarán un uso frecuente de ambos tipos de secadoras. Las secadoras de flujo cruzado son más frecuentes en Estados Unidos, mientras que las de flujo mixto son preferidas en Europa. A los efectos de desarrollar un método de diseño de secadoras, el sistema de flujo cruzado ofrece ventajas por su analogía con el sistema de lecho fijo, y por el hecho de que su funcionamiento debería poder modelarse considerando flujo de aire en una dimensión, lo cual no es posible con secadoras de flujo mixto.

1.7. Datos técnicos de secadoras de flujo cruzado

En Argentina, las secadoras de columna se venden en capacidades (evaluadas en condiciones estándar) de 21 a 200 t/h. Las secadoras traen normalmente 4 columnas, y cada columna es en realidad una secadora de flujo cruzado; los modelos grandes pueden traer 6 o más columnas. El grano se toma de una tolva superior, desciende por gravedad en la columna (confinado por dos placas perforadas atravesadas por flujo de aire horizontal), y se descarga a una tolva inferior. Generalmente, los dos tercios superiores de la longitud de la columna de secado se destinan a secado con aire caliente, y el resto a enfriamiento con aire ambiente. Los tamaños exteriores de las secadoras de flujo cruzado fabricadas en Argentina, tomadas de un catálogo de fabricante, se muestran en la Tabla 1.2. (IRADI, 1989).

Tabla 1.2: Rendimientos y tamaños de secadoras de flujo cruzado

Rendimiento (t/h)	Altura total (m)	Ancho total (m)	Profundidad (m)
21	10,81	7,10	3,30
41	14,11	7,10	3,30
51	16,26	9,53	3,30
61	18,41	9,53	3,30
71	17,50	9,70	4,90
100	21,80	9,74	4,90
200	21,80	9,74	9,80

Las capacidades de retención de grano van de 36,5 m³ para la secadora de 21 t/h a 285 m³ para las de 200 t/h. El número de columnas es de 4 para el rango de rendimientos de 21-61 t/h, de 6 para las de 71-100 t/h y de 12 para la secadora de 200 t/h. Las potencias de ventiladores van de 27,5 HP para la secadora de 21 t/h a 231 HP para la de 200 t/h. El espesor típico de columna es de 0,30 m.

Los "rendimientos", son los caudales de grano que la máquina puede secar desde una humedad inicial del 17% b.h. (0,205 dec, b.s.) hasta una final media de 14% b.h. (0,163 dec., b.s.), empleando aire de secado de 95°C (Datos basados en maíz de 800 kg/m³ de densidad de lecho). Estos rendimientos serán diferentes para trigo, puesto que, para una secadora existente, este cereal produce mayor pérdida de carga (menor flujo de aire) y debe secarse a menor temperatura. Así, no se dispone de un conocimiento formal para la relación entre la cantidad de trigo que puede secarse por hora y las condiciones operativas.

La Figura 1.7 muestra una vista en planta de un módulo de secadora de flujo cruzado de 4 columnas, mientras que la Figura 1.8 exhibe una columna de secado-enfriamiento.

Secadoras continuas de trigo

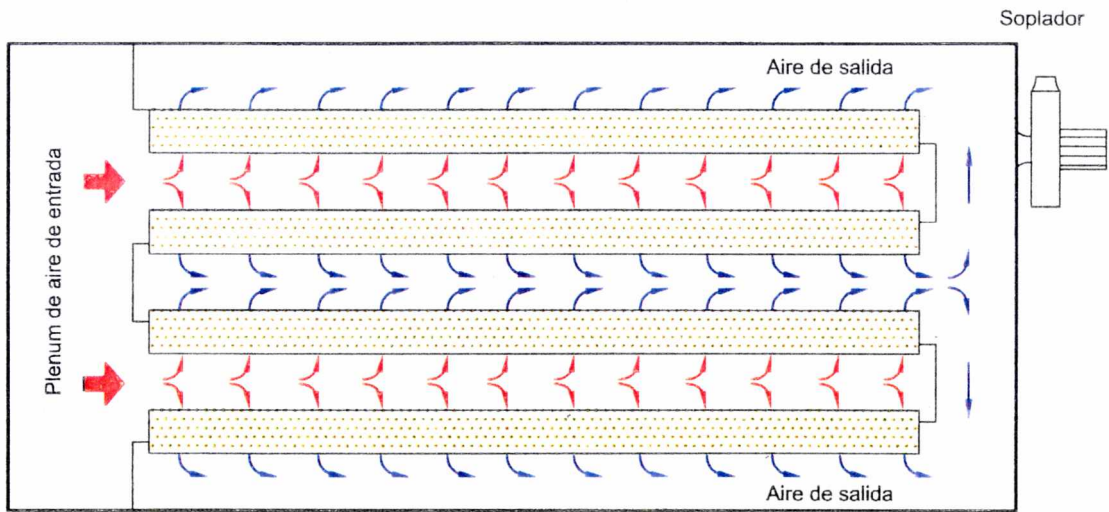


Figura 1.7. Vista en planta de una secadora de flujo cruzado de 4 columnas. Se indica el flujo de aire

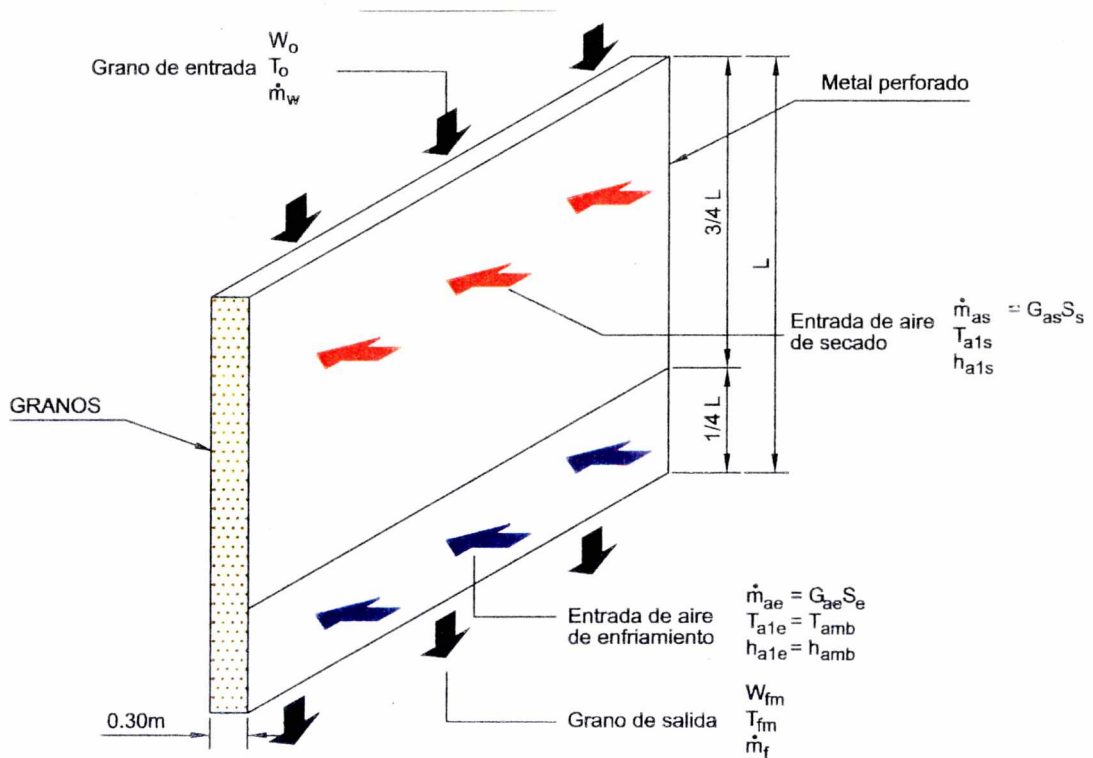


Figura 1.8. Columna de secado/enfriamiento continuo, operando en flujo cruzado.

1.8. La estacionalidad en el secado de granos

Un dato interesante surge de dividir la producción de granos que anualmente pasaba por secadoras en el año 1984 - unos 25 Mt- por la capacidad instalada (Tabla 1.1). Si se asume que la cantidad indicada pasa por una sola secadora de 45000 t/h, se encuentra que la misma debería funcionar durante 555 horas, por ejemplo una hora y media diaria durante todo el año. Desafortunadamente, la estacionalidad de la producción de granos determina que la mayor parte de esas horas de secado deban cumplimentarse en poco tiempo: diciembre-enero con la cosecha fina (trigo, avena, cebada, centeno) y, más intensamente, durante el otoño, con las cosechas de maíz, soja y girasol. Esto conduce, no pocas veces, a que se eleve indebidamente la temperatura del aire de secado, para secar más grano por unidad de tiempo, y hacer frente a la demanda de secado concentrada en esos períodos. Si las secadoras de granos pudieran repartir esas 555 horas a lo largo de todo el año, como lo hacen los equipos de secado de plantas procesadoras de alimentos (copos de maíz, por ejemplo), las condiciones operativas podrían optimizarse y luego mantenerse fijas por períodos prolongados de trabajo. Las secadoras de granos de plantas de acopio no tienen esa posibilidad: deben hacer frente a picos de demanda y/o cambiar de producto a secar en cuestión de horas.

Queda establecido que, al menos la primera parte del problema del secado de granos surge de la estacionalidad, y es ajeno a la parte técnica del secado. De todas maneras, otra buena porción del problema puede minimizarse por un adecuado diseño y correcta operación de la secadora, y es hacia este último aspecto donde se dirigirá la atención de este trabajo de tesis. Los trigos secados a temperaturas indebidamente elevadas presentan daño en el gluten y su calidad panadera se ve reducida, dando harinas que producen un pan de miga deficiente, poco esponjoso, duro y de escaso sabor (INTA-PROPECO, 1994).

1.9. Métodos de secado/enfriamiento de granos

Tradicionalmente, las plantas de acopio han operado mediante el pasaje del grano por la secadora con aire caliente en los primeros dos tercios de la longitud y aire ambiente para enfriamiento. El esquema es más apropiado para trigo, donde el índice de grano roto es bajo, de lo que es para maíz o soja. Para estos granos grandes, se recomienda usar sólo aire caliente en la secadora, regular la misma para obtener grano de salida más húmedo (1-2% por encima del valor de seguridad) y luego de un reposo de varias horas donde el grano uniformiza su perfil de humedad, enfriar, en un silo separado, con aire ambiente, a la vez que se termina de secar el grano por aprovechamiento del calor sensible acumulado durante el secado previo con aire caliente. Este método de "Seca-Aireación" evita el cambio brusco de temperaturas de secado a enfriamiento en la secadora, evitando el alto fisurado en maíz, y reduciendo el descascarado y partido del grano de soja (De Dios, 1996). Asimismo, permite reducir el consumo de energía y amplía la capacidad de la planta de acopio. El hecho de que implique mayor inversión inicial en silos, y un manejo mecanizado con mayores exigencias de movimientos y tiempos ha inhibido el uso efectivo de la misma. Sin embargo, se han realizado, y se realizan permanentes sugerencias para su utilización (De Dios, 1985).

Si bien el trigo posiblemente no necesite esta técnica, la misma no lo perjudicaría y sí beneficiaría el manejo postcosecha de maíz y soja, que en Argentina, se suele realizar en las mismas plantas.

Este trabajo de tesis, se limitará al estudio del funcionamiento del secado en secadoras de flujo cruzado.

1.10. Objetivo de este trabajo

El diseño de secadoras de granos es un problema complejo que ha sido abordado empíricamente o mediante tratamientos teóricos muy simplificados.

Actualmente, el estudio del comportamiento de secadoras requiere conocer distintos temas, y debe decirse que si bien se ha avanzado en muchos de los aspectos teóricos de la transferencia de calor y materia aire-grano y las relaciones entre calidad de grano y tratamientos térmicos, los datos de diseño de secadoras son fragmentarios. Resulta necesario integrarlos para pronosticar el comportamiento de un equipo.

El programa de simulación a desarrollarse aquí tratará de contribuir en este aspecto. El resultado principal de dicho programa será el cálculo del tiempo de residencia, período requerido para reducir la humedad de los granos desde el valor de entrada al valor deseado a la salida de la secadora. Otros propósitos importantes son la selección de condiciones operativas tales que el período de permanencia de los granos en la secadora no dañe su calidad, y no implique un alto consumo de energía.

1.11. Temas incluidos en este trabajo de tesis

El presente trabajo de tesis se ha organizado en base a la subdivisión del tema de secado en secadoras en distintos temas constitutivos.

En el capítulo 2, se analiza la aireación-ventilación, en términos de la relación flujo de aire-pérdida de carga en lechos de granos. En el 3, se trata el tema del aire húmedo y las relaciones aire-agua, que establecen un ámbito donde pueden definirse muchas de las variables a utilizar y que permiten abordar el secado en una forma preliminar y simplificada. En el capítulo 4, se estudia el equilibrio sorcional, donde se discute el efecto del agua adsorbida en los granos en las relaciones de presión de vapor y calor de desorción, lo que permite establecer a posteriori las fuerzas impulsoras del secado y sus demandas energéticas.

Secadoras continuas de trigo

En el capítulo 5, se enfoca el secado de alimentos en forma general, pasando de alimentos de alto contenido inicial de agua a los cereales, haciendo énfasis en los mecanismos controlantes de la velocidad de transferencia de materia. En el 6, se aborda el secado de granos individuales de trigo, realizando un estudio cinético en condiciones constantes de aire, que permite desarrollar el "modelo de secado del grano". El capítulo 7, permite desarrollar y convalidar el algoritmo de secado en un lecho fijo- el "modelo del lecho", donde tanto los granos como el aire cambian su humedad y temperatura con el tiempo y posición en el lecho. El capítulo 8 analiza las relaciones entre condiciones de secado y calidad de grano, para desarrollar una cinética de pérdida de calidad.

En el capítulo 9, se extiende el algoritmo de lecho fijo a secado/enfriamiento continuo de trigo con simultánea predicción de la calidad. Allí, se convalidan las predicciones de los parámetros de comportamiento, incluyendo calidad final, contra datos de ensayos normalizados de secadoras comerciales.

El capítulo 10 permite utilizar el modelo convalidado para "simular el sistema" : estudiar la influencia de las condiciones operativas, y para "diseñar condiciones de operación": analizar la variación de los parámetros de comportamiento de la secadora frente a diversas variantes operacionales.

La estructura temática del trabajo de tesis se presenta en la Figura 1.9, donde se ha considerado que cada subtema está basado, directa o indirectamente, en los anteriores.

Se desea indicar, finalmente, que el modelo matemático de secado de trigo a ser desarrollado sigue un método general, aplicable a secado de sólidos particulados. Así, el mismo permite una base para predecir el secado de otros materiales particulados similares, siempre y cuando se conozcan sus propiedades físicas, incluyendo la ecuación de secado de partícula individual.

CAPITULO 2. DISEÑO DE SISTEMAS DE VENTILACION FORZADA PARA SILOS Y SECADORAS

CAPITULO 2. DISEÑO DE SISTEMAS DE VENTILACION FORZADA PARA SILOS Y SECADORAS

2.1. INTRODUCCION

La especificación técnica del sistema de aireación forzada es una etapa importante del diseño de silos de almacenamiento y secadoras. En el primer caso, se requiere un bajo flujo de aire para uniformizar la temperatura del silo de granos previamente secados, y mantenerla tan baja como sea posible (Multon, 1982; Brooker y colab., 1992). En secado con aire natural, el movimiento de aire, ya un poco más intenso, permite extraer la humedad de los granos (Ryniecki y Nellist, 1991; Rodríguez, 1994) mientras que en el secado con aire caliente (Bruce, 1984), velocidades más elevadas a más alta temperatura proveen, además, el calor necesario para evaporar la humedad del lecho.

El método utilizado para seleccionar un ventilador consiste en graficar conjuntamente las curvas del sistema, en este caso la pérdida de presión del aire en lecho más conductos en función de la velocidad superficial (V), junto a curvas características de ventiladores (Cory, 1991). El punto de cruce de ambas determina el caudal operativo, y el ventilador apropiado será aquel para el cual el valor operativo coincide con el deseado. Además, se necesita una expresión matemática confiable para estimar el consumo de potencia de ventilación en estos equipos.

Tanto la curva del sistema como el consumo de potencia se calculan en base a la pérdida de presión (Δp , también llamada pérdida de carga) que experimentará el aire para el rango de velocidades requerido, lo cual requiere una ecuación constitutiva. En ésta, la pérdida de carga por unidad de espesor de lecho o pérdida de carga unitaria ($\Delta p/Z_{\max}$ ó Δp_u) se expresa en función de las variables relevantes.

El desarrollo de tal expresión constituye el objetivo específico de este capítulo. Su utilización permitirá preestimar la inversión de capital en ventiladores y el consumo eléctrico de los mismos, que forman parte de los costos operativos del secado (Morey y Cloud, 1973)

2.2. REVISION DE LITERATURA PREVIA

La pérdida de carga unitaria en el lecho depende del grano en cuestión, de la velocidad del aire, y de otras variables tales como la humedad de los granos (M), contenido de finos, densidad de lecho, y dirección del flujo (Alagusundaram y Jayas, 1990).

El efecto de la humedad en la pérdida de carga debe evaluarse en vista del uso creciente de aireación refrigerada de grano húmedo (Maier y colab., 1992) y para aquellos estudios donde deba establecerse un campo de presiones y velocidades de aire en lechos con gradientes de humedad (Mao y Nellist, 1991). La mayoría de los autores observaron un descenso de la pérdida de carga al aumentar la humedad, excepto Patterson y col. (1971), quienes observaron lo contrario en maíz.

Por otro lado, la presencia de finos en el lecho puede aumentar considerablemente las pérdidas de carga (Haque y colab., 1978), por lo que su efecto debe evaluarse.

Se ha estudiado el efecto de finos y humedad en maíz (Haque y colab., 1978; Grama y colab., 1984) encontrándose que la pérdida de carga aumenta con el contenido de finos; sin embargo, hay opiniones diversas respecto de si el efecto de los finos cambia con la velocidad del aire.

En trigo, Shedd (1953) determinó pérdidas de carga a distintas velocidades para grano limpio y seco (11% b.h.) con empaque flojo, proponiendo una ecuación empírica para su tratamiento, que no incluye efectos de humedad ni finos. Hukill e Ives (1955) proponen otra ecuación empírica de buen comportamiento que se ha ajustado a los datos de Shedd, y que ha sido elegida como ecuación estándar (ASAE, 1988; ASHRAE, 1997). Sin embargo no hay evidencia de que tal ecuación interprete mejor los datos que la ecuación de Ergun, aún simplificando esta última (Hunter, 1983).

Kumar y Muir (1986) estudiaron el efecto de la velocidad, de la dirección del flujo de aire y del método de llenado en granos limpios o con muy escaso contenido de finos, pero no incluyeron la influencia de la humedad. Haque y colab. (1982) midieron caídas de presión

en lechos de trigo, maíz y sorgo granífero a distintas humedades, observando un descenso de la pérdida de carga al aumentar M . Para interpretar los datos, utilizaron una versión simplificada de la ecuación de Ergun (1952), a la cual añadieron empíricamente un término extra como función de la M y V .

Escardino y colab. (1970) determinaron la pérdida de carga de varios cereales secos y hallaron que la ecuación de Ergun, con sus coeficientes originales, predecía menores pérdidas de carga que las observadas; los autores atribuyeron las discrepancias a la rugosidad de los granos y ajustaron nuevos coeficientes.

Existe escasa información en la literatura sobre las pérdidas de carga de trigo a distintas humedades y contenidos de finos, y no se ha encontrado discusión suficiente sobre las desviaciones entre la ecuación original de Ergun y los datos medidos. En un trabajo más reciente, Li y Sokhansanj (1994) utilizan los conceptos fluidodinámicos que sustentan la ecuación de Ergun e incluyen el efecto de la humedad y los finos, pero no discuten la naturaleza de las desviaciones ni la adecuabilidad de la ecuación de Ergun para fines prácticos como dimensionamiento de potencia.

En consecuencia, en este capítulo se presenta: (1) Una revisión de la ecuación de Ergun (2) Datos experimentales medidos de la influencia de la velocidad del aire, humedad y finos (f) en la pérdida de carga en lechos de trigo (3) Una comparación de Ergun con datos experimentales, y el desarrollo de expresiones simplificadas para diseño que tengan en cuenta el efecto de V y de las otras variables. Finalmente (4), se realizarán gráficos utilizables en dimensionamiento de ventiladores para silos ventilados y equipos de secado.

2.3. TEORIA

Forma básica de la ecuación de potencia de ventilación

La Figura 2.1 muestra un esquema de un lecho de granos a ser aireado, con altura o espesor Z_{\max} y sección transversal S .

Secadoras continuas de trigo

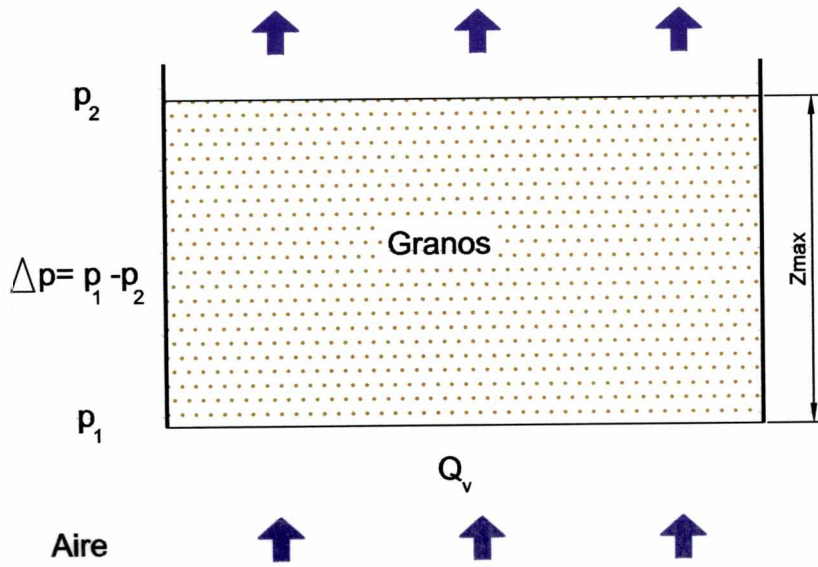


Figura 2.1. Esquema de un lecho de granos ventilado de sección transversal "S".

La potencia requerida (P_r) para hacer circular un caudal volumétrico (Q_v) ante una pérdida de carga Δp viene dada por:

$$P_r = \Delta p Q_v \quad (2.1)$$

Asumiendo que Δp es función lineal de la altura del lecho, resulta $\Delta p = \Delta p_u Z_{max}$; a su vez, Q_v puede expresarse en función de la velocidad superficial como $Q_v = V.S$. Introduciendo estas definiciones en la ecuación (2.1), se obtiene:

$$P_r = \Delta p_u Z_{max} V S \quad (2.2)$$

la que, expresada como $P_{rs} = P_r/S$, permite generalizar los resultados a cualquier sección transversal.

$$P_{rs} = \Delta p_u Z_{max} V \quad (2.3)$$

La ecuación (2.3) representa sólo la potencia absorbida por el aire, que será menor a la consumida por el ventilador. El desarrollo de la ecuación constitutiva para Δp_v se describe a continuación.

2.3.1. Pérdida de carga en lechos rellenos: ecuación de Ergun

Para determinar los regímenes de flujo en los que se inscriben la aireación de granos en silos y el secado en secadoras, se describirá resumidamente la deducción de la ecuación de Ergun, por analogía con la ecuación para tubos lisos no rellenos (Calvelo, 1975), teniendo en cuenta las características de los lechos fijos de granos como trigo.

Ecuación base de factor de fricción en tubos lisos no rellenos

En flujo en conductos no rellenos, es conocido que la fuerza sobre las paredes causada por la circulación de un fluido a la velocidad V en un conducto de longitud "L" está dada por la ecuación de Fanning (Bird y colab., 1960):

$$F = \Delta p S = f K A = f \frac{1}{2} \rho V^2 \pi D L \quad (2.4)$$

que define el factor de fricción f , una función exclusiva del número de $Re = \rho V D_e / \mu$ para tubos lisos. D_e es el diámetro equivalente que en sección circular coincide con el diámetro del tubo (D), mientras K es la energía cinética por unidad de volumen y A el área característica.

Ecuación para lechos rellenos

Los lechos rellenos presentan un parámetro ϵ , porosidad global o fracción media de huecos (Volumen de huecos/volumen de lecho). Si el lecho es isotrópico, esta porosidad global puede utilizarse para definir la sección transversal disponible para el flujo, ϵS . El

Secadoras continuas de trigo

caudal volumétrico puede redefinirse como sigue (Calvelo, 1975):

$$Q_v = V S = V_i \epsilon S \quad (2.5)$$

donde V_i es la velocidad característica del aire en el lecho relleno o velocidad intersticial; se tiene entonces que $V_i = V/\epsilon$. El área superficial es ahora mucho mayor que en un conducto no relleno y viene dada por aSZ_{\max} , siendo "a" el área superficial (área mojada) por unidad de volumen de lecho, y Z_{\max} el espesor o altura del lecho relleno.

En consecuencia, la ecuación de la fuerza F queda (Calvelo, 1975):

$$F = \Delta P \epsilon S = f \frac{1}{2} \rho V_i^2 a S Z_{\max} \quad (2.6)$$

Por su parte, se define $a = a_v (1-\epsilon)$, siendo a_v el área superficial de partícula por unidad de volumen de partícula y $(1-\epsilon)$ la fracción de sólidos en el lecho. La magnitud a_v puede expresarse en términos de $D_p = 6/a_v$, diámetro efectivo o diámetro de una esfera de igual área por unidad de volumen que la partícula. Se tiene entonces que $a = 6(1-\epsilon)/D_p$. Con estas definiciones, y considerando que $V_i = V/\epsilon$ en la ecuación (2.6), la expresión se reagrupa para dar:

$$\frac{\Delta P}{Z_{\max}} = 3 f \frac{\rho V^2}{D_p} \frac{(1-\epsilon)}{\epsilon^3} \quad (2.7)$$

que define inmediatamente el factor de fricción $f_k = 3f$ como :

$$3 f = f_k = \frac{\frac{\Delta P}{Z_{\max}} D_p \epsilon^3}{\rho V^2 (1-\epsilon)} \quad (2.8)$$

Tal como en el caso de flujo en conductos no rellenos (Bird y colab., 1960), se debe buscar la dependencia del factor de fricción con el Re. En este caso la velocidad característica es la intersticial V_i , y el diámetro equivalente puede expresarse en función del radio hidráulico (R_h), como es usual en conductos no circulares; entonces $D_e = 4 R_h$ y el

Re resulta (Calvelo, 1975):

$$Re = \frac{\rho V_i 4 R_h}{\mu} \quad (2.9)$$

Rh se define a través de:

$$R_h = \frac{\text{Seccion de flujo}}{\text{Perimetro mojado}} = \frac{\text{Volumen de huecos}}{\text{Area mojada}} \quad (2.10)$$

que, en función de propiedades medibles puede expresarse de la manera siguiente:

$$R_h = \frac{\left(\frac{\text{Volumen de huecos}}{\text{Volumen de lecho}} \right)}{\left(\frac{\text{Area mojada}}{\text{Volumen de lecho}} \right)} = \frac{\epsilon}{a} = \frac{\epsilon D_p}{6(1-\epsilon)} \quad (2.11)$$

Incluyendo la definición anterior y expresando V_i como V/ϵ , la expresión del Re queda:

$$Re = \frac{2}{3} \frac{\rho V D_p}{\mu (1-\epsilon)} \quad (2.12)$$

que permite definir un Reynolds modificado para lechos rellenos (Re_m) como $Re_m = (3/2) Re = \rho V D_p / (\mu(1-\epsilon))$.

Ergun (1952) representó datos propios y de otros autores como f_k vs Re_m en un diagrama doble logarítmico y encontró régimen laminar para $Re_m < 10$, donde $f_k = 150/Re_m$. Para $Re_m > 1000$, observó que f_k tiende al valor constante de 1,75, indicando la existencia de un régimen completamente turbulento. Podrá observarse entonces que hay un amplio rango ($10 \leq Re_m \leq 1000$) donde existe régimen de flujo de transición.

La expresión laminar de f_k , reemplazada en la ecuación (2.7) conduce a:

$$\frac{\Delta p}{Z_{\max}} = 150 \frac{(1-\epsilon)^2 \mu}{D_p^2 \epsilon^3} V \quad (2.13)$$

conocida como la ecuación de Blake-Kozeny (Calvelo, 1975) para flujo laminar, donde prevalecen las pérdidas de tipo viscoso. Esta expresión resulta análoga a la de Darcy para

Secadoras continuas de trigo

medios porosos con flujo reptante (Haque y colab., 1981).

Análogamente, el uso de $f_k = 1,75$ en la ec. (2.7.) conduce a:

$$\frac{\Delta p}{Z_{\max}} = 1,75 \rho \frac{(1 - \epsilon)}{D_p \epsilon^3} V^2 \quad (2.14)$$

conocida como la ecuación de Burke-Plummer (Calvelo, 1975) para flujo turbulento, donde las pérdidas son puramente inerciales (no aparece la viscosidad).

Ergun encontró que, en el intervalo de transición, las pérdidas viscosas coexisten con las inerciales. Combinó las ecuaciones (2.13) y (2.14) para obtener una expresión válida para cualquier valor del Re_m :

$$\frac{\Delta p}{Z_{\max}} = 150 \frac{(1 - \epsilon)^2 \mu}{D_p^2 \epsilon^3} V + 1,75 \frac{\rho (1 - \epsilon)}{D_p \epsilon^3} V^2 \quad (2.15)$$

donde es posible demostrar que la ec. (2.15) tiende a la ec. (2.13) para $Re_m < 10$ y a la ec. (2.14) para $Re_m > 1000$.

2.3.2. Régimen de flujo de aire en distintas operaciones de la postcosecha de trigo

Se calcularán valores preliminares del Re_m para trigo utilizando valores típicos de grano como $D_p = 3,5 \times 10^{-3}$ m y $\epsilon = 0,4$ (Giner y Calvelo, 1987; Sokhansanj y Bruce, 1987), y de propiedades de aire a 20°C, $\rho = 1,2$ kg/m³ y $\mu = 1,85 \times 10^{-5}$ kg/(m s). Se obtiene así que $Re_m = 375 V$. Esto permite determinar que la velocidad superficial máxima para flujo laminar en trigo es de 0,03 m/s, mientras que el valor inicial de flujo turbulento resulta de 2,7 m/s, respectivamente.

Aireación de grano seco

En aireación de lechos de granos secos en silos (volumen de lecho $S Z_{\max}$), la velocidad superficial se recomienda en términos de Q_{vv} , caudal volumétrico específico (caudal volumétrico/Volumen de lecho) $Q_{vv} = Q_v / S Z_{\max} = V S / (S Z_{\max}) = V / Z_{\max}$, de donde surge

que $V = Q_{vv} Z_{max}$. En silos que almacenan granos secos, se aplica un bajo flujo de aire para uniformizar la temperatura del lecho para prevenir la circulación de corrientes de convección natural. Tales corrientes, al establecerse, mueven y concentran humedad en sectores del silo, con consecuencias peligrosas para el granos secos pues se activa el ecosistema granos-aire-agua-microorganismos-insectos. Un segundo objetivo de la aireación forzada suave es bajar la temperatura de los granos tanto como sea posible (Multon, 1982). Los valores recomendados de Q_{vv} varían entre 0,001 a 0,0015 m³ aire/(s m³ lecho). Usando el valor mayor en un silo de $Z_{max} = 10$ m de altura de lecho, se obtendrá $V=0,015$ m/s, indicando que la aireación de *trigo* seco se desarrolla normalmente con régimen laminar. Sin embargo, en silos más altos, puede haber una contribución de régimen de transición.

Secado

En secado se pueden considerar tres métodos, a valores crecientes de Q_{vv} . El primero es "seca-aireación" [nombre original: "Dryeration" (por drying-aeration)]. En Francia se lo denomina "Refroidissement lent diféré" (enfriamiento lento demorado)] que, aunque poco habitual en trigo, permite una mayor eficiencia térmica en las operaciones de secado-enfriamiento. En este sistema de postcosecha (De Dios, 1996) el grano es secado en un equipo continuo o discontinuo y se lo extrae, sin enfriarlo, a temperatura cercana a 50°C con 2% de humedad en exceso respecto al valor de seguridad. Luego de un reposo de varias horas (tempering), se lo ventila con $Q_{vv} = 0,007-0,01$ m³aire/(s.m³ lecho) (Jensen, 1995) produciendo enfriamiento suave y el secado del exceso de humedad previamente indicado. Esta etapa, en silos de hasta 9 m de altura, requiere una velocidad máxima de aire V de alrededor de 0,09 m/s, ya entonces en régimen de transición. En el secado con aire ambiente o "natural" (temperaturas ambientes), se recomiendan Q_{vv} entre 0,027 y 0,037 (mismas unidades) (Nellist, 1986; Rodríguez, 1994), que, para las alturas de lecho usuales de 1 m o superiores, determinan la presencia de régimen de transición.

Secadoras continuas de trigo

En el tercer método, secado en secadoras con aire caliente, de especial interés en este trabajo, los Q_{vv} son mucho más altos, tanto en equipos continuos como discontinuos, y los valores recomendados se expresan directamente en unidades de velocidad superficial, variando ésta entre 0,25 y 0,4 m/s en la mayoría de los modelos, claramente en régimen de transición. En estos equipos la altura o espesor de lecho rara vez supera los 0,4 m.

En condiciones normales, la circulación de aire en lechos fijos de trigo no podría alcanzar un régimen totalmente turbulento, toda vez que la velocidad de mínima fluidización es del orden de 1 m/s (Giner y Calvelo, 1987).

Se concluye de este primer análisis que el secado de trigo en secadoras presenta régimen de transición, de manera que la evaluación de pérdidas de carga deberá ser realizado con ecuaciones de dos términos tipo Ergun. Se podría suponer, asimismo, que la determinación precisa de D_p y ϵ (Véase ec. (2.15)) bastaría para fines de diseño. Los datos experimentales que se han medido en trigo para distintos contenidos de humedad y de finos, permitirán saber si esto es efectivamente posible.

2.4. MATERIALES Y METODOS

2.4.1. Trigo y finos

Se utilizó trigo pan (*Triticum aestivum*) variedad "PROINTA Isla Verde" cultivado por PRODUSEM Pergamino en la temporada 1993/94, Los granos se cosecharon luego de secado natural en campo y fueron recibidos en cuatro bolsas de 50 kg como Semilla Fiscalizada (SAGyP, 1991) con una humedad promedio de 12,9% b.h. (En este capítulo las humedades se expresarán en % b.h.). La Semilla Fiscalizada tiene un poder germinativo mayor del 90% y está libre de "rechazo", nombre que engloba a los granos muy pequeños, rotos y a todo material extraño proveniente de la cosecha. El contenido de cada bolsa de semillas fué transferido a sendas bolsas de polietileno, y alojadas en cámara frigorífica a 0°C.

Para el estudio del efecto de los finos (partículas más pequeñas que los granos) se utilizó rechazo provisto separadamente por PRODUSEM Pergamino. Los finos se prepararon haciendo pasar el rechazo a través de una zaranda normalizada de agujeros rectangulares de 9,5 mm x 1,6 mm, siguiendo un procedimiento estandarizado (SAGyP, 1994).

2.4.2. Determinación del contenido de humedad

Con este fin, muestras de granos enteros se colocaron en estufa convencional ventilada (potencia máxima: 2 kW) durante 19 h a una temperatura de 130°C (ASAE, 1982), mantenida con un controlador proporcional por tiempo (Serena, 1994). Este equipo permite la visualización digital del valor deseado y del medido con un termistor calibrado.

En todos los casos, las determinaciones de humedad se realizaron por triplicado.

2.4.3. Preparación de muestras húmedas de trigo

Para estudiar el efecto de la humedad en la pérdida de carga de granos limpios (0% finos), se prepararon 4 partidas de distinta humedad, cada una partiendo de una bolsa de 50 kg. La bolsa 1 fué utilizada con su nivel original de humedad de 12,8%, y los granos de las bolsas 2, 3 y 4 fueron humectados a 16,2, 19,4 y 22,3%, respectivamente, mezclándolos con la cantidad necesaria de agua en tambor rotatorio accionado por un motor eléctrico. El rango de humedad cubierto (12,8-22,3%) es más amplio que el usual en el manejo post-cosecha de trigo.

Para la humectación a 16,2%, el proceso se realizó en una etapa. Sin embargo, debido a limitaciones de velocidad de absorción de agua por parte de los granos, fueron necesarias dos etapas de humectación con un tiempo intermedio de algunas horas para obtener 19,4% y tres etapas con dos esperas para el nivel de 22,3%.

Los lotes de granos humectados se transfirieron nuevamente a 0°C en bolsas de polietileno, dejándoselos reposar por un mínimo de 48 h antes de las experiencias de manera de permitir una adecuada distribución de humedad intragranular.

Secadoras continuas de trigo

Con estas muestras, se midieron las curvas de pérdida de carga versus la velocidad del aire (y densidad de lecho "in situ"). Una pequeña parte de cada lote se utilizó para caracterizar la variedad en estudio, a las mismas humedades de las experiencias fluidodinámicas. Esto se indica a continuación.

2.4.4. Determinación de densidad y volumen de semilla, y densidad de lecho.

La densidad y volumen de grano de las distintas muestras fueron determinadas por picnometría con xileno (mezcla de isómeros p.a., Mallinckrodt), en un matraz aforado de 250 ml. Se utilizaron muestras de 500 semillas contadas a mano. Todas las determinaciones fueron hechas por triplicado.

Las densidades de lecho fueron medidas pesando la cantidad de grano necesaria para llenar la columna de pérdida de carga (véase sección 2.4.7.) en una balanza digital TOLEDO (capacidad máxima, 15 kg; resolución, 1 g). Con propósitos comparativos, la densidad de lecho se determinó en un matraz de 500 ml.

2.4.5. Medición de las dimensiones de los granos

Los tres ejes principales de los granos se midieron con un calibre. Para minimizar los errores de resolución, los granos se adhirieron en su posición más estable a un papel blanco pudiéndose observar su longitud y ancho desde una vista superior. Inmediatamente, se realizaron fotocopias ampliadas un 100%, midiéndose las dimensiones mencionadas sobre la copia. Los espesores de las mismas semillas se midieron previamente en forma directa, dado que esta dimensión no era adecuada para la técnica descripta. Se utilizaron 50 granos por cada nivel de humedad y las determinaciones se hicieron por duplicado.

2.4.6. Preparación de lechos de granos mezclados con finos

A fines de estudiar la pérdida de carga como función de los finos, se prepararon cuatro muestras mezclando los granos limpios de la bolsa 1 (12,8% de humedad) con

cantidades crecientes de finos (14,4% de humedad) en el tambor rotatorio anteriormente mencionado. La proporción de finos en las muestras, expresadas como kg de finos por 100 kg de mezcla (% de finos) fueron: 2,86, 5,65, 8,42 y 10,60.

2.4.7. Experiencias de pérdida de carga

2.4.7.1. Equipo

La Figura 2.2 muestra un diagrama del equipo. El aire ingresa al ventilador centrífugo (A) de 2800 RPM y 1,5 kW a través de una válvula de diafragma (B). Para operar con bajos flujos de aire en la columna, sin restringir el paso del aire a través del ventilador, se instaló una válvula mariposa de purga (C). El ventilador se conectó al equipo por medio de un tubo de flexible para evitar la propagación de vibraciones.

A efectos de obtener un perfil uniforme de velocidades, se hacía pasar el aire por un plenum de entrada (D) y luego, a través de una malla metálica perforada (orificios de 1,5 mm arreglados en triángulo, 23% de área libre), a una contracción gradual (E) unida a la columna de medición (F). Se usó una placa perforada similar como base de la columna. La columna cilíndrica de acrílico transparente medía 1,20 m de largo y 0,194 m de diámetro interno. Las tomas de presión estática se diseñaron de acuerdo al Manual Perry (Green y Maloney, 1984), con el orificio al ras de la pared interna y fueron ubicadas apenas por debajo de la base de la columna y a 1 m por encima de ésta. En ambos niveles se conectaron dos tomas opuestas para promediar valores.

Al salir del lecho, el aire pasaba al plenum de salida (G), y desde allí, hacia un tubo de 5 cm de diámetro (H) y 1 m de longitud (20 diámetros), hacia el final del cual se medía la velocidad con un sensor anemométrico de hilo caliente insertado (I). Por éste método, pudieron medirse velocidades mucho más altas que las de la columna, reduciéndose los errores del instrumental.

Secadoras continuas de trigo

Las pérdidas de presión bajas (0 -10 mm c.a) e intermedias (10-25 mm c.a.) se midieron con micromanómetros neumomagnéticos (J1 y J2, respectivamente). Valores mayores se midieron en un tubo en U inclinable (K) conteniendo agua destilada coloreada. Los instrumentos se montaron en un panel (L), y el equipo completo sobre un bastidor (M), con una regulación (N) para asegurar la posición vertical de la columna (F).

Criterio de selección del diámetro de columna y altura de lecho

El diámetro de la columna se eligió en base a criterios de escalado, para evitar efectos de pared, por medio del factor de Coulson (f_w) (Calvelo, 1975) :

$$f_w = \frac{1}{\left(1 + \frac{a_w}{2 a_v}\right)^2}$$

donde a_w es el área superficial del recipiente por unidad de volumen de lecho $a_w = (\pi D Z_{\max})/(\pi D^2 Z_{\max}/4) = 4/D$. El valor de a_v se calculó como $6/D_p = 6/(3,5 \times 10^{-3}) = 1700 \text{m}^{-1}$. Para escalar las mediciones, el factor f_w debe multiplicar a la velocidad medida en el equipo y su valor ideal debería ser la unidad. En conductos rellenos de poco diámetro, el empaque de los granos es más flojo sobre la pared, lo cual produce canalización del flujo que reduce las pérdidas de carga respecto al valor esperable para un caso de igual velocidad media pero sin efectos de pared. Aquí, para $D = 0,194 \text{ m}$, se obtuvo $f_w = 0,99$. Kunii y Levenspiel (1969), presentan un criterio más empírico para el escalado: el diámetro del recipiente debe ser mayor a 20 diámetros de partícula; en trigo, tal valor es de unos 0,08 m. En consecuencia, se consideró que el diámetro elegido no presenta efectos de pared.

La altura del lecho es un dato importante pues determina el orden de las pérdidas de carga a medir. El valor usado (1 m) permitió medir con precisión pérdidas de carga a bajas velocidades y manipular una cantidad manejable de granos por corrida (unos 25 kg).

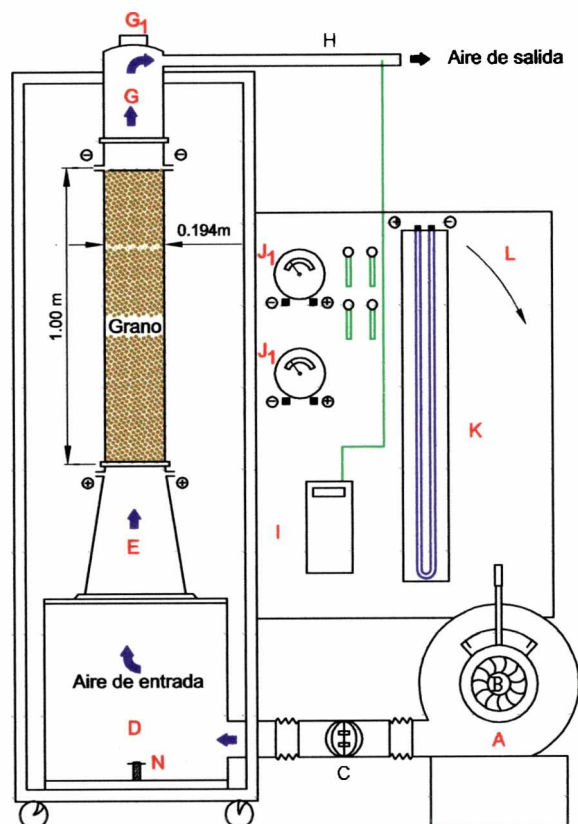


Figura 2.2. Equipo desarrollado para medir pérdidas de carga.

2.4.7.2. Técnica experimental

En todas las experiencias, los granos se transfirieron de la cámara fría a la temperatura ambiente unas 24 horas antes de las determinaciones de pérdida de carga.

Para estandarizar el método de llenado, los granos se cargaron a la columna a través del tubo (H) por medio de un sistema de transporte neumático impulsado por un aspirador de potencia (no mostrado en la Figura 2.2 por razones de claridad). La distancia de caída varió entre 1,50 m (columna vacía) a 0,5m (columna llena). Al cargar los granos, el aire de transporte salía por el punto G1. Se utilizó el mismo método de llenado en todas las experiencias.

Una vez que se completaba el llenado, se cerraba la tapa G1 otra vez, se encendía el

Secadoras continuas de trigo

ventilador, se abría parcialmente la válvula de diafragma y se dejaba estabilizar la temperatura del aire de salida del ventilador con la válvula mariposa totalmente abierta (C), sin flujo a través de la columna.

Con el sistema estabilizado, comenzaban las determinaciones de pérdida de carga a velocidades crecientes. Se utilizaron los mismos valores de velocidad en todas las experiencias para facilitar el procesamiento y la comparación de los datos.

A bajas velocidades de aire en la columna, los incrementos de velocidad se lograban cerrando parcialmente la válvula de purga (C), hasta cerrarla totalmente. Los aumentos subsiguientes se obtenían aumentando la apertura de la válvula de diafragma (B). Se obtuvo así un intervalo de velocidad de aire que cubría las distintas operaciones post-cosecha sin inestabilización de la operación del ventilador ni aumentando apreciablemente la temperatura del aire. Las curvas de pérdida de carga vs velocidad del aire se realizaron por duplicado en cada nivel de humedad (con vaciado y rellenado intermedio del lecho), promediándose sus resultados. La temperatura promedio del aire durante las ocho corridas fué de $22,7 \pm 1,6^{\circ}\text{C}$, y su humedad relativa, de $57,2 \pm 3,8\%$.

2.5. RESULTADOS Y DISCUSION

2.5.1. Caracterización de la variedad de trigo utilizada

Densidades y fracción de huecos

La Tabla 2.1 muestra los resultados de densidad de grano (ρ_g), densidad del lecho medida en la columna de pérdida de carga (ρ_L) y de la fracción de huecos (ϵ), calculada según:

$$\epsilon = 1 - \frac{\rho_L}{\rho_g} \quad (2.16)$$

Tabla 2.1. Densidad de grano, de lecho y fracción de huecos para el trigo utilizado

M % (b.h.)	ρ_g kg/m ³	ρ_L kg/m ³	ϵ
0	1310	806	0,383
12,8	1330	824	0,380
16,2	1300	811	0,374
19,4	1280	786	0,387
22,3	1280	776	0,393

Los valores a $M = 0$ corresponden a muestras totalmente deshidratadas en dos etapas. A diferencia de las otras muestras, la densidad de lecho a $M = 0$ fué determinada en un matraz de 500 ml. Para verificar si los valores de matraz eran comparables a los de columna, se utilizó la muestra de 12,8% de humedad, determinándose en matraz con y sin vibración. Como la muestra vibrada (empaque más denso) presentó una densidad de lecho similar a la de la columna, se utilizó vibración para la muestra de $M = 0$ y su valor se incluyó en la Tabla 2.1. La diferencia entre densidades de lecho con y sin vibración fué de alrededor de 8%.

Puede observarse en la Tabla 2.1 que las densidades de grano crecen levemente a bajas humedades y luego decrecen a M más altos, siguiendo un comportamiento observado previamente por Nelson (1980). Podría inferirse que, al humectar grano seco, cierta parte del agua añadida se aloja en espacios previamente existentes, por lo que ρ_g puede aumentar. Una vez saturados estos espacios, el agua que ingresa incrementa el volumen de los granos y, por ser menos densa que la materia seca, provoca un descenso en ρ_g . Los valores de ρ_L reflejan el comportamiento de la densidad de grano, de manera que la porosidad, calculada con la ec. (2.16) no presenta una tendencia definida con la humedad.

Secadoras continuas de trigo

Adjudicación de geometría y diámetro efectivo

Para calcular el diámetro efectivo, D_p , se requiere la estimación del área superficial de los granos. Ergun (1952) propuso utilizar el "área superficial geométrica", la de una envoltura que cubriera la partícula desde un punto de vista fluidodinámico. Con este fin, se adjudicó al trigo una geometría elipsoidal, de tres ejes desiguales l_1 (mayor), l_2 (intermedio) y l_3 (menor).

El volumen geométrico de los granos (V_{gg}) viene dado por:

$$V_{gg} = \frac{\pi}{6} l_1 l_2 l_3 \quad (2.17)$$

mientras que su área superficial geométrica (A_{gg}) se calcula con (Becker, 1959):

$$A_{gg} = \frac{\pi}{2} l_1 l_m \left(\frac{l_m}{l_1} + \frac{1}{U} \arcsen U \right) \quad (2.18)$$

donde $l_m = (l_2 + l_3)/2$. El valor U se estima con la expresión siguiente:

$$U = \frac{\sqrt{l_1^2 - l_m^2}}{l_1} \quad (2.19)$$

Los resultados se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Dimensiones de los granos, volumen picnométrico (V_g) y geométrico (V_{gg}), y área superficial geométricas (A_{gg}) y corregida (A_g).

M %, b.h.	l_1	l_2	l_3	V_{gg} mm ³	V_g	A_{gg}	A_g mm ²
	mm						
0	---	---	---	---	22,5	---	---
12,8	6,08	3,00	2,82	27,0	24,8	47,3	44,6
16,2	6,41	3,07	2,86	29,4	26,3	50,5	46,8
19,4	6,46	3,27	2,91	32,1	28,2	53,2	48,8
22,3	6,52	3,40	3,02	35,0	30,9	56,0	51,4

Los volúmenes geométricos excedieron los picnométricos por un margen de 9-13%, según la humedad, lo que podría haber sido causado con errores de alrededor del 3% (0,1 mm) en la medida de c/u de los ejes. Se considera que la geometría elegida es aceptable. El área calculada A_{gg} se modificó estimativamente en función de la desviación de los volúmenes, para dar un área corregida A_g , mediante la expresión:

$$A_g = \frac{A_{gg}}{\left(\frac{V_{gg}}{V_g}\right)^{2/3}} \quad (2.20)$$

que indicaría que A_{gg} se habría sobreestimado un 6-9%. Los valores se A_g se incluyeron en Tabla 2.2.

Las áreas específicas a_v se calcularon mediante $a_v = A_g/V_g$ y los diámetros efectivos como $D_p = 6/a_v$. Se emplearon los volúmenes V_g de la Tabla 2.2 para calcular los diámetros equivalentes de partícula, $D_e = (6 V_g/\pi)^{1/3}$ y el factor de esfericidad f_e , definido como el cociente entre el área superficial de la esfera equivalente y el valor real de partícula, esto es, $f_e = \pi D_e^2 / A_g$.

Tabla 2.3. Area específica efectiva de grano (a_v), diámetros efectivos (D_p) y equivalentes (D_e) y factor de esfericidad (f_e).

M %, b.h	$a_v \times 10^{-3}$ m ⁻¹	$D_p \times 10^3$ m	$D_e \times 10^3$ m	f_e
0	1,86	3,22	3,50	0,92
12,8	1,80	3,33	3,62	0,92
16,2	1,78	3,37	3,69	0,91
19,4	1,73	3,47	3,78	0,92
22,3	1,66	3,61	3,89	0,92

La definición anterior de f_e da lugar a $D_p = f_e D_e$, que se empleó para calcular D_p a $M = 0$ en la Tabla 2.3. Para este caso, se usó $f_e = 0,92$ en vista de su escasa variación.

Secadoras continuas de trigo

2.5.2. Comparación con caracterizaciones de otros autores

Los valores de f_e obtenidos aquí coinciden con los de Becker (1959), quien propuso usar la geometría elipsoidal. Este autor trabajó con una variedad de grano más pequeña, $V_g = 20,5 \text{ mm}^3$, con ejes principales de 5,22, 2,96 y 2,66 mm, obteniendo valores de a_v y D_p de 1940 m^{-1} y $3,10 \times 10^{-3} \text{ m}$, respectivamente, para $M = 10 \%$. Sus ρ_g medidos variaron de 1350 a 1370 kg/m^3 para M entre 11,5 y 16%, respectivamente.

Por su parte, Escardino y colab. (1970) obtuvieron, para trigo "Mentana" un valor de $D_p = 3,91 \times 10^{-3} \text{ m}$ (técnica no especificada), $\epsilon = 0,41$ y $\rho_g = 1383 \text{ kg/m}^3$ a humedad no especificada.

A su vez, Li y Sokhansanj (1994) obtuvieron densidades de grano entre 1415 y 1380 kg/m^3 y diámetros equivalentes de 3,55 a $3,70 \times 10^{-3} \text{ m}$ en el rango de humedad de 13 a 23%. Los autores encontraron $\epsilon \approx 0,47$, una porosidad sorpresivamente alta para trigo, donde generalmente se publican valores cercanos a 0,40 (Hall, 1971). Li y Sokhansanj no intentaron calcular D_p por asimilación geométrica sino que ajustaron un factor de forma, supuestamente f_e , en ecuaciones de factor de fricción tipo Ergun, obteniendo un valor único de 0,65 bastante por debajo del obtenido aquí y por Becker (1959).

Las diferencias observadas entre los valores de las Tablas 2,1-2,3 y los de otros autores muestran los efectos varietales esperables para un producto biológico de forma irregular y divergencias de técnicas, pero también se observan coincidencias parciales. Por ejemplo, el valor de f_e medido aquí coincide con el dato de Becker (1959), los valores de D_p son similares a los de Li y Sokhansanj (1994), y los de ϵ están en el orden de los obtenidos por Escardino y colab. (1970) y del informado en Hall (1971). Con estas variaciones en D_p y ϵ , la Ecuación de Ergun debería sobreestimar o subestimar la pérdida de carga (Δp_w), de acuerdo a que se utilicen valores más bajos o más altos que los correctos en cada caso.

2.5.3. Verificación de datos medidos de pérdida de carga y predicción de la ecuación de Ergun (ec. (2.15))

Los datos medidos de pérdida de carga a $M = 12,8\%$ fueron comparados con ecuaciones fenomenológicas previamente desarrolladas. Una de ellas es la ecuación de Olesen (1987) quien adoptó una forma tipo Ergun válida para V entre 0,01 y 0,7 m/s

$$\Delta P_u = A_o V + B_o V^2 \quad (2.21)$$

Olesen recomienda utilizar coeficientes A_o y B_o de 2500 y 10000, respectivamente, para trigos más bien grandes y/o empaque flojo. En casos de granos tendiendo a pequeños y/o empaques más densos, los valores correspondientes recomendados son de 3300 y 13000.

Hukill e Ives (1955) desarrollaron una ecuación empírica ajustada a los datos de Shedd (1953). La expresión es:

$$\Delta P_u = \frac{A_H V^2}{Ln (1 + B_H V)} \quad (2.22)$$

elegida para los estándares de la ASAE (1988). Para V entre 0,0056 y 0,203 m/s, los parámetros A_H y B_H para trigo valen $2,7 \times 10^4$ y 8,77, respectivamente mientras que, en un rango de menores velocidades (0,00025 - 0,0203 m/s) los coeficientes resultan $8,41 \times 10^3$ y 2,72. Podrá verse que en el rango (0,0056-0,0203), típico de la aireación de trigo seco, ambos pares de parámetros son válidos.

La Figura 2.3 muestra los datos medidos a $M = 12,8\%$, junto a las predicciones de las ecuaciones (2.21) y (2.22), y la de la ecuación de Ergun (ec. 2.15)), usando ϵ de la Tabla 2.1 y D_p de la Tabla 2.3 a la humedad indicada. El gráfico superior muestra una escala ampliada para V entre 0 y 0,12 m/s, mientras que el inferior, cubre la escala completa de ventilación de trigo en lecho fijo, 0-0,5 m/s.

Secadoras continuas de trigo

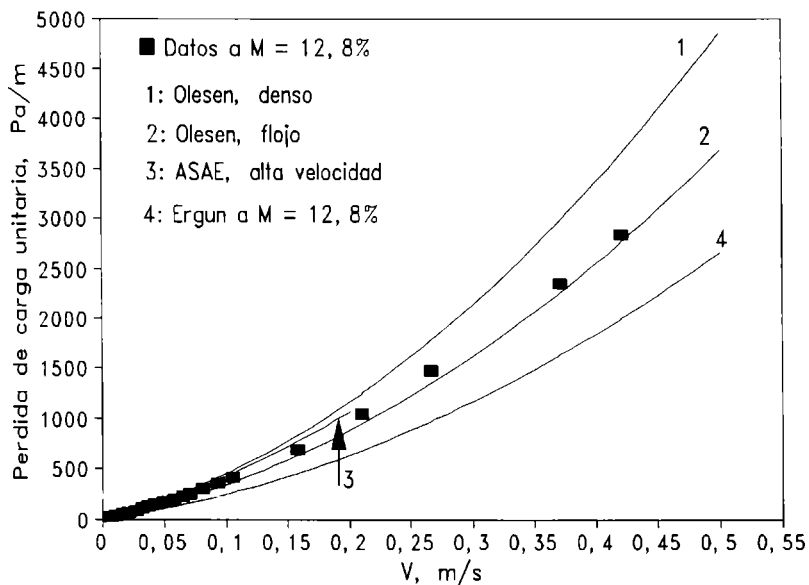
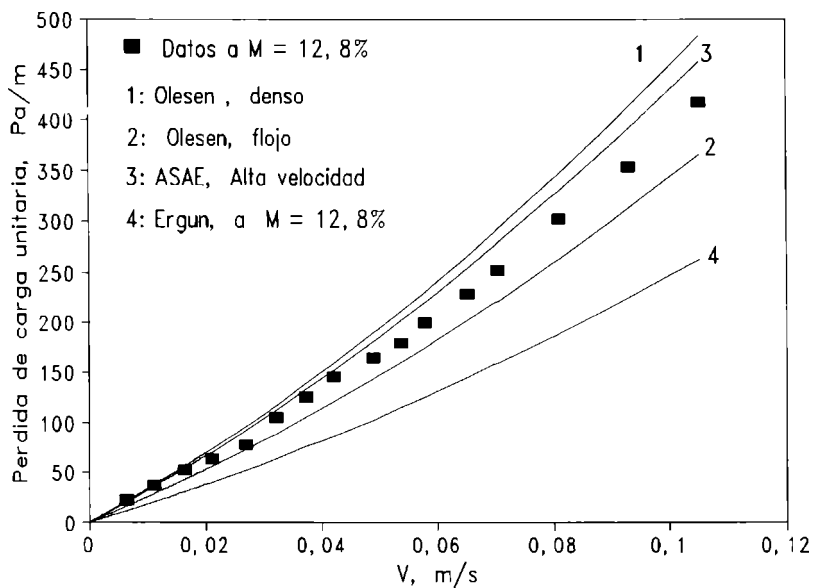


Figura 2.3. Verificación de pérdida de carga medida a $M = 12,8\%$ (b.h.) usando ecuaciones fenomenológicas previas. Se incluye la predicción de Ecuación de Ergun.

La Figura 2.3. muestra que los datos medidos caen dentro de la zona delimitada por las predicciones de las correlaciones previas. Los datos a bajas velocidades indican, además que el sistema de medición es adecuado para determinar las bajas pérdidas de carga originadas por valores reducidos de V . Tanto en el gráfico superior como en el inferior se observa que la Ecuación de Ergun completa (ec. 2.15) subestima la pérdida de carga por un 35-40%. La utilización de los valores de D_p y ϵ de Escardino y colab. (1970) en la ec. de Ergun conducirían a predicciones aún menores de la pérdida de carga, de manera que se presenta una tendencia definida no atribuible a mediciones erróneas de propiedades de grano y lecho.

Aún cuando la ec. de Ergun predice bien la tendencia del incremento de Δp_u con V , conduciría a subdimensionamientos de la potencia de ventilación, implicando menores flujos de aireación. Los subdimensionamientos son más peligrosos en un "material" biológico que genera calor y agua por respiración de lo que sería en un producto industrial o inorgánico no reactivo. Escasa aireación en silos puede descontrolar el ecosistema de los granos almacenados.

La representación de la ecuación de Ergun en su forma adimensional de factor de fricción $f_k = 150/Re_m + 1,75$ pasa por debajo de los datos medidos aquí a los cuatro niveles de humedad, los cuales, por otra parte, se agrupan razonablemente bien (Figura 2.4).

Como antecedentes en la comparación de la predicción de Ergun dimensional en granos, Giner (1989) encontró que la ec. (2.15) subestimaba las pérdidas de carga en lechos de arroz cáscara por un margen del 40%, similar al obtenido aquí en trigo en la Figura 2.3. En este sentido, Escardino y colab. (1970) ajustaron nuevos coeficientes de 584 y 4,08, por lo que se deduce que la ec. (2.15) subestimaba sus datos en un margen mayor: 75%.

Por su parte Li y Sokhansanj (1994) también hallaron que Ergun original subestimaba sus datos, y obtuvieron coeficientes por ajuste de 238 y 2,3 en el rango de humedad de 10 a 26%. En el presente trabajo de tesis, los datos medidos a diferentes humedades agrupados en la forma de factor de fricción pueden ser ajustados con coeficientes de 235 y 1,75

Secadoras continuas de trigo

($r^2=0,983$), los cuales son comparables con los de Li y Sokhansanj (1994). Las diferencias en el coeficiente del término turbulento no son realmente importantes pues su ajuste no puede ser preciso empleando datos que cubren la zona laminar y la primera parte del régimen de transición.

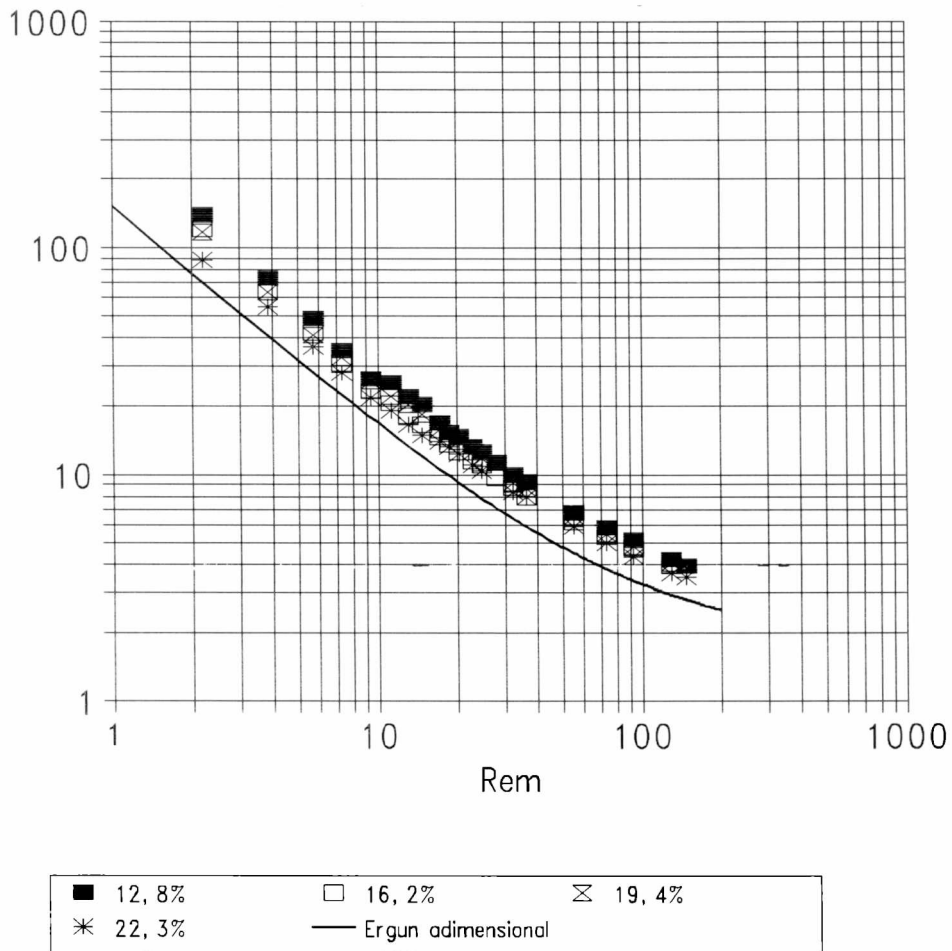


Figura 2.4. Curva adimensional de Ergun, como factor de fricción $f_k = 150/Re_m + 1,75$ y datos experimentales medidos en trigo a distintas humedades.

Existe una considerable dispersión de los coeficientes de Ergun ajustables en este trabajo y el de Li y Sokhansanj (1994), respecto a los de Escardino y colab. (1970). En esto, es posible que haya habido influencia de las distintas variedades y de las técnicas de medición usadas para propiedades, pérdida de carga y velocidad de aire. Se coincide, sin embargo, en que la ecuación de Ergun original interpreta bien el efecto de la velocidad del aire dado que "acompaña" correctamente la curvatura de los datos en las zonas laminar y de transición, pero presenta un "corrimiento vertical hacia abajo" de 35-40% al menos, en granos asimilables a geometrías elipsoidales como arroz y trigo. Así, resulta claro que el factor de fricción f_k depende de factores adicionales a ϵ y D_p o bien que sólo depende de ellos, pero que los mismos deberían medirse con otros métodos, y que sus valores cambiarían de un caso a otro.

Ergun indicó que sus lechos fijos fueron preparados por fluidización previa de las partículas, e indicó que creía que las mismas estaban orientadas en la dirección del flujo ascendente, donde generan arrastre mínimo. En principio entonces, los coeficientes originales de Ergun 150 y 1,75 valdrían para formas esféricas y regulares, o para formas irregulares orientadas en la dirección del flujo. En consecuencia para que f_k pueda predecir bien en casos más generales, debería tener en cuenta la orientación de las partículas en el lecho, pero no resulta sencillo obtener orientaciones definidas en la práctica y, menos aún, interpretarlas matemáticamente (Ergun, 1952).

Sin analizar la ecuación de Ergun, Kumar y Muir (1986) midieron datos que pueden ser utilizados para corroborar estas afirmaciones. Para un lecho de trigo determinado, los autores midieron la pérdida de carga de aire para flujo vertical y horizontal, y hallaron, a una velocidad de 0,077 m/s, que la pérdida de carga "horizontal" era entre un 17 y un 36% menor que la correspondiente a flujo vertical. Los autores observaron que la diferencia del 36% se observaba para lechos donde los granos se orientaban con su eje l_1 (el mayor) en posición horizontal, como ocurre en la práctica habitual. Así, no es sorprendente que para flujo horizontal el lecho fuera más aerodinámico, generando menos arrastre y pérdida de

Secadoras continuas de trigo

carga. Obsérvese que la mayor diferencia entre pérdidas de carga para flujo vertical y horizontal por Kumar y Muir (1986) es del orden de la discrepancia obtenida en la Figura 2.3. entre la predicción de la ecuación (2.15) y los datos experimentales medidos para flujo vertical. En trigo, la orientación es un factor importante toda vez que uno de sus ejes duplica a los otros dos.

En este trabajo, y posiblemente en los de Escardino y colab. (1970) y Li y Sokhansanj (1994), las partículas no tenían su eje mayor orientado en la dirección del flujo vertical, sino más bien horizontal o al azar, lo que explicaría la discrepancia de Ergun con los datos.

Se observa aquí se podría utilizar la ecuación de Ergun con sus coeficientes originales, pero sólo si se dejan D_p y ϵ como parámetros de ajuste. El valor de ϵ debería ser siempre el de una sección perpendicular a la dirección del flujo (Calvelo, 1985), pero la medición es poco reproducible en lechos que presenten orientación al azar de partículas.

Se puede deducir entonces que, para un lecho dado, existirían diversos D_p y ϵ que harían cumplir la ecuación original de Ergun con sus coeficientes originales, dependiendo de la relación entre orientación de las partículas y dirección del flujo de aire.

Más allá de la relación entre pérdida de carga y orientación de las partículas, hay otros aspectos que van contra el uso de la ecuación (2.15) en la práctica. Obsérvese que la sensibilidad paramétrica de la ecuación (2.15) es tal en la zona de transición que variaciones de D_p de $\pm 10\%$ se trasladan a cambios de $\pm 15\%$ en Δp_u , mientras que desviaciones similares en ϵ modifican los valores de Δp_u en $\pm 40\%$. Esta fuerte dependencia determina que ni la ecuación de Ergun completa, ni las versiones de coeficientes "corregidos", sean recomendables con fines de diseño.

Por otra parte, si bien el efecto del contenido de finos en trigo podría ser juzgado, teóricamente, a partir de los cambios de porosidad (ϵ) y del diámetro de partícula promedio (D_{pm}), la consideración de los mismos en la ecuación de Ergun (ec. (2.15)) no sería conveniente toda vez que la expresión citada no predice bien los casos más simples de grano

sin finos no orientados en la dirección del flujo. En consecuencia, será más difícil predecir bien aquellos lechos con finos, que agregan distribución de tamaño de partícula. Obsérvese que la fórmula de cálculo de D_{pm} (media armónica) (Calvelo, 1975):

$$D_{pm} = \frac{1}{\rho_m \sum_{i=1}^N \frac{X_i}{D_{pi} \rho_i}} \quad (2.23)$$

requiere conocer ρ_m , una densidad media de la mezcla, X_i la fracción en peso de partículas de diámetro característico D_{pi} y las densidades individuales de fracción ρ_i . La densidad media se puede estimar con la expresión:

$$\rho_m = \frac{1}{\sum_{i=1}^N \frac{X_i}{\rho_i}} \quad (2.24)$$

Mas aún, los finos no constituyen una fracción de tamaño de partícula acotado (como los granos limpios), sino que están formados por varias subfracciones de tamaño, forma y densidad diversa, cuyas proporciones relativas son variables. Además, cada posible subfracción presenta una geometría muy irregular y sus densidades plantean dificultades de medición.

Se considera entonces que, a diferencia de casos de mezclas conocidas de proporciones constantes (fundamentalmente productos no biológicos), no se justificaría caracterizar las mezclas de trigo y finos de esa manera.

En consecuencia, es conveniente apelar al uso de ecuaciones simplificadas tipo Ergun, donde la pérdida de carga dependa directamente de parámetros de ajuste, de valor más predecible y manejable.

Secadoras continuas de trigo

2.5.4. Expresión elegida para predecir pérdidas de carga

Se ha indicado en la literatura (Green y Maloney, 1984) que el flujo de fluidos a través de medios porosos consolidados como rocas o tierra obedece a reglas similares a las de flujo en lechos de partículas y que, dado que los medios porosos consisten en redes complejas de canales, la descripción del flujo en términos de tamaño de partícula es muy difícil. Se considera aquí que la complejidad de los lechos de trigo, que involucra anisotropía, partículas de forma irregular, orientación variable, es suficiente como para justificar el uso de ecuaciones tipo Ergun de medios porosos. La expresión a utilizar es la siguiente:

$$\Delta p_u = a \mu V + b \rho V^2 \quad (2.25)$$

como base para estudiar el efecto de la humedad y, separadamente, el de finos, en la pérdida de carga.

2.5.5. Efecto de la humedad del grano en la pérdida de carga en trigo

Análisis de los datos experimentales

Las Figuras 2.5a y 2.5b muestran los valores experimentales de pérdida de carga en función de la velocidad del aire para los 4 niveles de humedad analizados en granos limpios. La 2.5a permite apreciar diferencias para $V > 0,1$ m/s mientras que la 2.5 b ayuda a discriminar los resultados a bajas velocidades. En ambos gráficos, los datos muestran que, a velocidad constante, la pérdida de carga disminuye con la humedad.

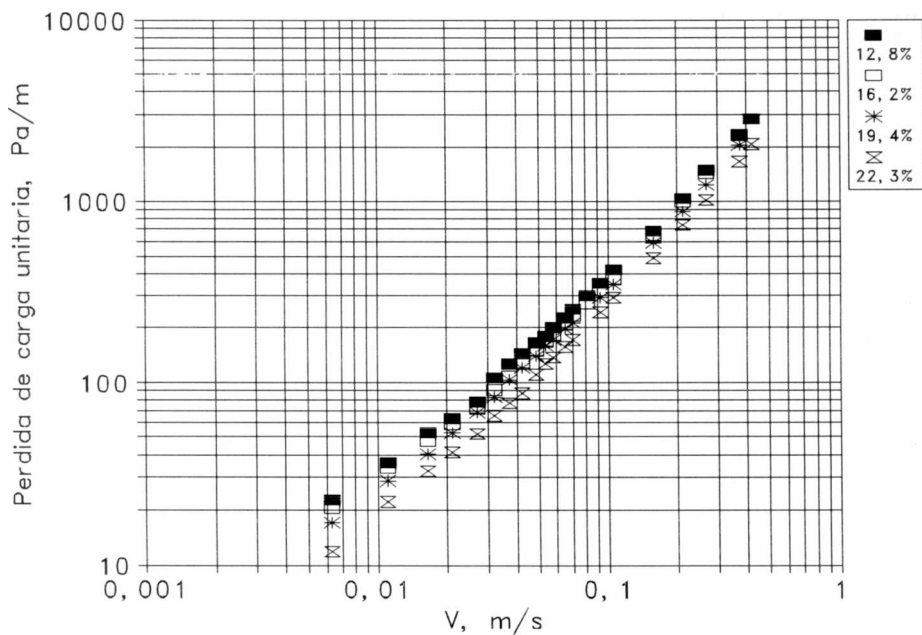
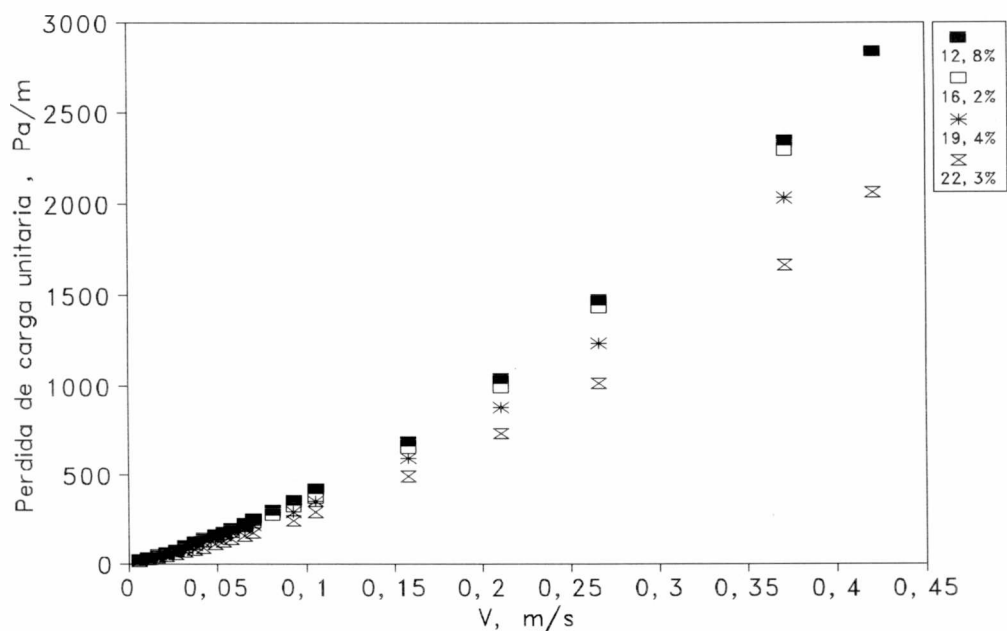


Figura 2.5a. (Gráfico superior). Pérdidas de carga medidas en función de la velocidad del aire para 4 niveles de humedad de trigo (escala normal). Figura 2.5b. (Gráfico inferior). Idem Figura 2.5a, pero incluyendo escala doble logarítmica.

Secadoras continuas de trigo

Con respecto a la forma en que la pérdida de carga decrece con la humedad, La Figura 2.6 muestra que la disminución de Δp_u con M es no lineal, haciéndose más brusca a medida que aumenta la humedad. No parece existir un efecto apreciable de la velocidad en la forma en que la pérdida de carga depende de la humedad

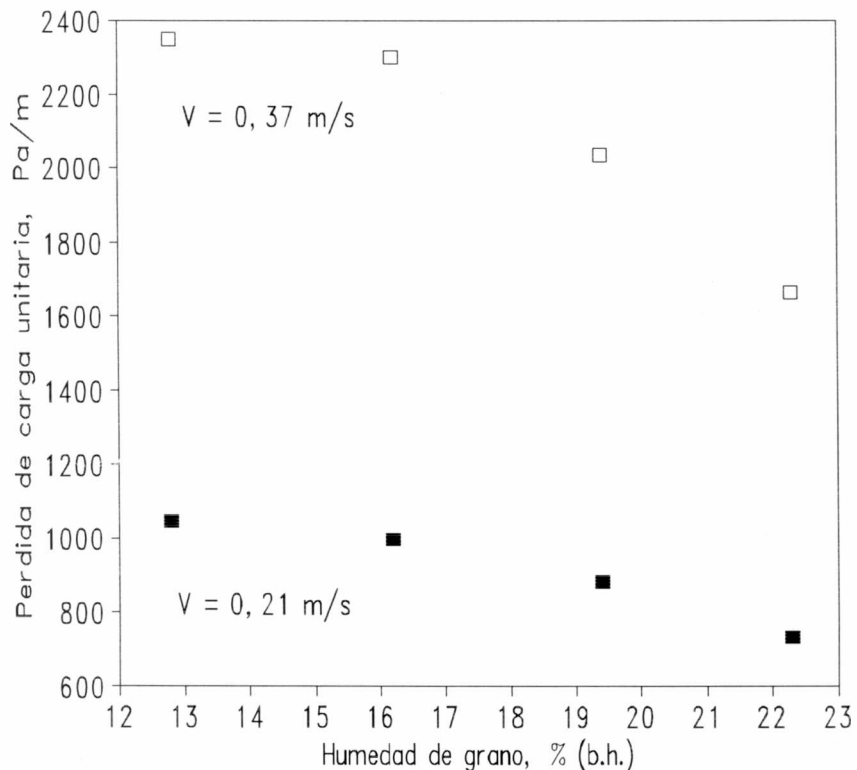


Figura 2.6. Pérdida de carga en función de la humedad de grano para dos velocidades de aire.

Si bien esta figura se realizó para el rango de velocidades típico de secadoras de granos, el comportamiento de Δp_u vs M fue similar a velocidades más bajas (datos no mostrados). Sin embargo, para observar más detalladamente si la velocidad afecta la magnitud del cambio de Δp_u con M, se calcularon los cocientes entre los valores

experimentales de Δp_u a la humedad M (16,2, 19,4, 22,3%) y los valores a 12,8% de humedad. Tales cocientes, denominados C_M , se representan en función de la velocidad en la Figura 2.7.

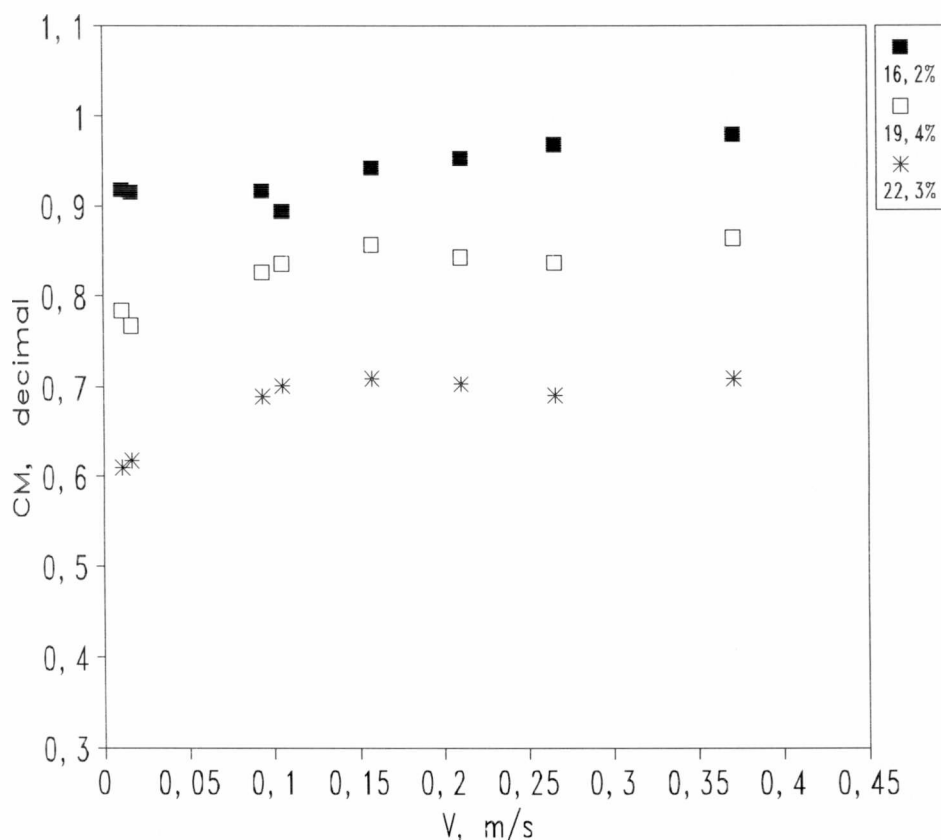


Figura 2.7. Cocientes entre la pérdida de carga a humedad de grano M y a 12,8%, en función de la velocidad del aire.

Se puede observar que el aumento de humedad de 12,8 a 22,3% reduce la pérdida de carga entre un 38% a $V < 0,01$ m/s ($C_M=0,62$) y un 30% ($C_M=0,7$) a 0,37 m/s. Haque y colab. (1982) encontraron una disminución del 40% en un rango de M un poco más estrecho que el estudiado aquí. Los autores propusieron una variación lineal para la caída de Δp_u con M , aunque sus datos podrían haber sido descriptos con una variación no lineal, de

Secadoras continuas de trigo

tendencia similar a la de este trabajo. Su ecuación se discutirá a posteriori.

La pequeña variación del efecto de M en Δp_u con la velocidad obedecería al cambio de régimen laminar a régimen de transición donde la Δp_u cambia gradualmente su dependencia de las propiedades de partícula, lecho y aire (ver ec. (2.15)). De todas maneras, el efecto de V en la variación de Δp_u con la humedad es bajo, especialmente para $V > 0,1$ m/s, rango donde se ubican las condiciones de operación de las secadoras de granos.

Obtención de una ecuación tipo Ergun simplificada

La escasa variación del efecto de la humedad con la velocidad permitiría simplificar la ecuación (2.25) a una expresión con sólo un parámetro ajustable. Para esto, se podría considerar que la relación b/a es constante en los distintos niveles de humedad, y el valor de la relación se podría obtener por ajuste a los datos. Sin embargo, se prefiere aquí recurrir, a éste efecto específico, a la forma "corregida" de la ecuación de Ergun con parámetros 235 y 1,75 citada previamente en 3.2. Esto conduce a:

$$\frac{b}{a} = \frac{1,75 D_p}{235 (1 - \epsilon)}$$

Tomando los valores de ϵ y D_p de las Tablas 2.1 y 2.3, respectivamente, para valores de M de 12,8, 16,2, 19,4 y 22,3, el cociente $b/a \times 10^5$ da 4,00, 4,01, 4,21 y 4,43, respectivamente, esto es, con una variación del 9% entre extremos, cuando la variación del Δp_u con la humedad varía entre el 30 y 39% en ese rango. Si, por conveniencia se elige $b/a \times 10^5 = 4$, se obtendrá $b = 4 \times 10^{-5} a$. Así, la ecuación elegida para este trabajo, queda:

$$\Delta p_u = a_p V (\mu + 4 \times 10^{-5} \rho V) \quad (2.26)$$

donde el ajuste de a_p permitirá equilibrar el pequeño error cometido al suponer constante el cociente b/a . Obsérvese que la ecuación (2.26) considera como rectas horizontales los

cocientes de pérdida de carga de la Figura 2.6, puesto que el factor que contiene la velocidad se simplificaría al calcular los C_M . El uso de la ecuación (2.26) presenta la ventaja que el efecto de variables distintas de V en Δp_u estará contenido, y reflejado, del parámetro a_p .

Ajuste de la ecuación propuesta

La ecuación (2.26) fué utilizada para interpretar los datos experimentales de la Figura 2.4. El método constó de tres pasos: en el primero, se ajustó la expresión de Δp_u vs V en cada nivel de humedad, obteniéndose los siguientes valores de a_p (Tabla 2.4).

Tabla 2.4. Valores de a_p de la ec. (2.26) a distintas humedades de grano

M %, b.h.	$a_p \times 10^{-9}$	$s(a_p) \times 10^{-9}$	r^2	s_y Pa/m
12,8	0,174	0,001	1	13,8
16,2	0,168	0,001	0,998	26,1
19,4	0,149	0,001	0,999	14,7
22,3	0,124	0,001	0,999	18,5

donde s_y es el desvío típico de la estima, que viene dado por:

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\text{predicho}_i - \text{observado}_i)^2}{N - p}} \quad (2.27)$$

siendo N es el número de datos experimentales utilizado en cada ajuste y p el número de parámetros ajustados. El valor promedio de s_y en los cuatro niveles de humedad fué de 18,3 Pa/m.

Puede verse que la ecuación interpreta bien los datos de pérdida de carga versus velocidad para cada M . Los datos de $a_p \times 10^{-9}$ de la Tabla 2.4 se representaron en función de M en la Figura 2.8, donde se comprueba que su funcionalidad refleja la de la pérdida de carga.

Secadoras continuas de trigo

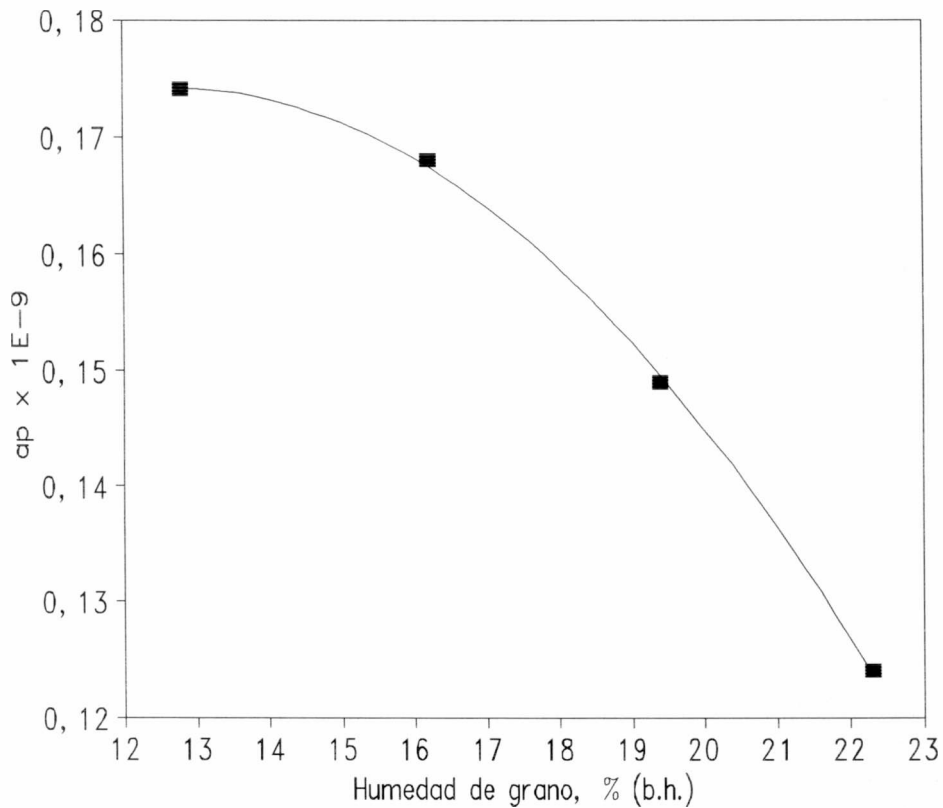


Figura 2.8. Parámetro a_p de la ecuación (2.26) y correlación de ajuste en función de la humedad. Nota: $1E-9 \equiv 1 \times 10^{-9}$

El segundo paso consistió en preajustar los valores de $a_p \times 10^{-9}$ vs M , con una expresión polinómica de 2° grado. Para facilitar el ajuste, el polinomio se expresó de tal forma que a $M = 12,8\%$, el valor de $a_p \times 10^{-9}$ fuera igual al de la Tabla 2.4 (0,174):

$$a_p \times 10^{-9} = 0,174 + C_1^* (M - 12,8) + C_2^* (M - 12,8)^2$$

Los valores obtenidos fueron $C_1^* = -6,56 \times 10^{-5}$ y $C_2^* = -5,50 \times 10^{-4}$ dando el muy buen ajuste observado en la Figura 2.8.

Distribuyendo ahora los coeficientes preliminares obtenidos, se encuentra:

$$a_p \times 10^{-9} = 0.085 + C_1 M + C_2 M^2 \quad (2.28)$$

donde $C_1 = 1,40 \times 10^{-2}$ y $C_2 = -5,5 \times 10^{-4}$.

La ecuación (2.26) se combinó con la ec. (2.28) para ser ajustadas ahora en forma directa a los datos completos de V , Δp_u y M . Se utilizaron los valores preliminares de C_1 y C_2 como primera estimación, encontrándose coincidencia con los valores definitivos; para éstos, las desviaciones típicas fueron despreciables. El r^2 fué igual a 0,999 mientras que s_y resultó ser 18,8 Pa/m, un desvío típico muy bajo de la estima, equivalente a menos de 2 mm de columna de agua (c.a.), no muy superior al de medición en altas Δp_u (± 1 mm ca).

En consecuencia, la ecuación desarrollada para la predicción de pérdidas de carga en granos limpios, en función de la velocidad del aire y la humedad de los granos es:

$$\Delta p_u = 1 \times 10^9 [0.085 + 1.40 \times 10^{-2} M - 5.50 \times 10^{-4} M^2] V (\mu + 4 \times 10^{-5} \rho V)$$

Ecuación (2.29)

válida para velocidades de aire entre 0,006 y 0,4 m/s y humedades de grano entre 12,8 y 22.3% (b.h.). El rango de validez de la ecuación comprende operaciones que van desde aireación de granos secos en silos hasta secado en secadoras continuas.

Secadoras continuas de trigo

Comparación con la ecuación de Haque y colab. (1982)

A los efectos de comparar el comportamiento de la ecuación (2.29) con la de Haque y colab. (1982), ésta última también fué ajustada a los datos medidos de Δp_u vs V y M de la Figura 2.4. La misma se escribe a continuación:

$$\Delta p_u = \alpha V + \beta V^2 - \gamma M V \quad (2.30)$$

que, como se observa, es una versión tipo Ergun sin consideración de las propiedades del aire y con un término extra incluyendo una funcionalidad lineal con la humedad. Los parámetros de ajuste y sus desviaciones típicas resultaron: $\alpha = 5765$ (140), $\beta = 7880$ (229) y $\gamma = 177$ (6,8). El r^2 fue de 0,997, con un error típico de la estima de $s_y = 33,4$ Pa/m, prácticamente el doble del obtenido con la ecuación desarrollada en esta tesis (ec. (2.29), $s_y = 18,8$ Pa/m). Además, presenta una inconsistencia, al agregar un término extra de la ec. (2.30), conteniendo una función lineal de Δp_u con M y V; al observar más detenidamente la ecuación (2.30), se encuentra que el término adicional no es tal sino que puede agruparse con el primero, en virtud de que ambos son funciones lineales de la velocidad. Así, la ec. (2.30) puede reescribirse como:

$$\Delta p_u = (\alpha - \gamma M) V + \beta V^2$$

que indica que la funcionalidad lineal de Δp_u con M queda limitada al término laminar, dejando constante el turbulento. Esto restringe la adaptabilidad a cambios con la humedad en régimen de transición, típico de secadoras de granos. La ecuación (2.29), desarrollada en

este trabajo, no muestra tal limitación pues la funcionalidad con la humedad afecta tanto al término laminar como al turbulento.

2.5.6. Efecto del contenido de finos en la pérdida de carga

Los granos limpios de trigo superior a un tamaño mínimo (como los utilizados en la sección anterior) vienen acompañados desde la cosecha por una cierta proporción de "rechazo", esto es, granos anormalmente pequeños, granos rotos, pequeños restos de espiga y tallo, y material extraño como tierra, semillas de maleza, etc. En la mayoría de los casos, la pequeña porción de rechazo cuyo tamaño de partícula es mayor que el grano, pero que es poco densa, se elimina en la "prelimpieza" por aspiración en la parte superior de la "noria" (elevador de cangilones de la planta de acopio). Sin embargo, la "prelimpieza" deja en su mayor parte los finos mezclados con los granos (Casalins, 1994).

En muchos casos, estos finos no son adecuadamente extraídos antes del secado o aireación de grano del seco, provocando, de acuerdo a Haque y colab. (1978) y Grama y colab. (1984), un incremento apreciable de la pérdida de carga del aire y de la potencia instalada de ventiladores. Visto de otra manera, ventiladores diseñados en base a datos de grano limpio entregarán un caudal insuficiente en lechos de granos con finos, lo que destaca la importancia de considerar su efecto.

La Figura 2.9 muestra una fotografía de los granos utilizados ($M=12,8\%$) junto a los finos obtenidos con el procedimiento descrito en 2.4.6. En Argentina, el trigo grado 1 tolera hasta 1,5% de finos (f), el de grado 2 hasta 3%, mientras que el de grado 3 puede tener hasta un 5% de finos (SAGyP, 1994). Se ha indicado que es poco común encontrar lechos de trigo con porcentajes de finos mayores del 5% (Casalins, 1994), lo que correspondería a trigo sin grado, de menor valor comercial.

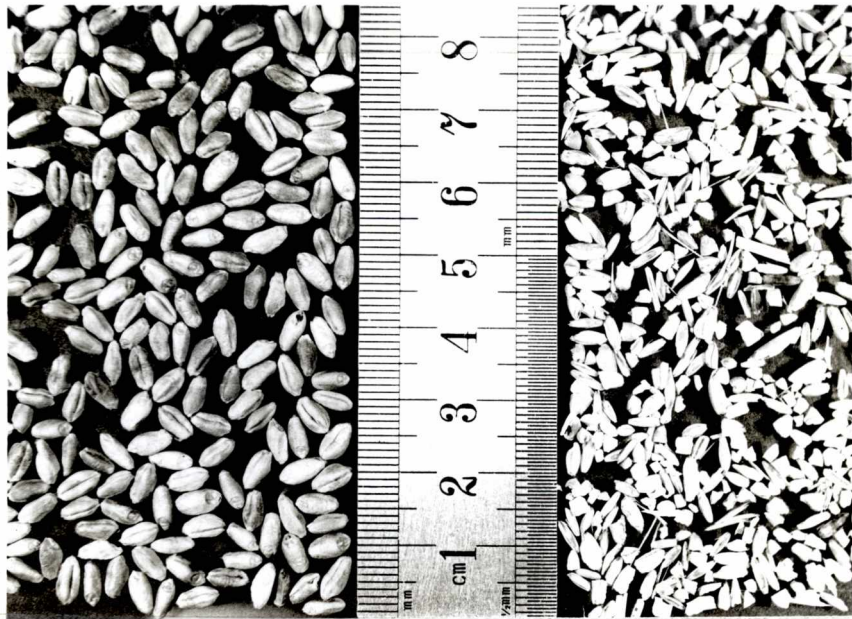


Figura 2.9. Fotografía de granos limpios de trigo "PROINTA-Isla Verde" y finos.

El efecto de los finos fué analizado en un rango mayor al de interés práctico, lo que permitió una mayor separación de condiciones. Como se indicó en 2.4.6., se prepararon mezclas de trigo de 12,8% de humedad con distintas cantidades de finos: 2,86, 5,65, 8,42 y 10,60% p/p. La Figura 2.10 a (escala normal) permite observar las pérdidas de carga medidas en función de la velocidad para la curva de 0% finos (grano limpio 12,8% de humedad) y para los cuatro niveles de finos indicados previamente. La Figura 2.10b (escala logarítmica) permite discriminar valores a bajas V . Puede observarse que el efecto de f es significativo, dado que al pasar de 0 a 10,6%, la Δp_u se incrementa un 75% a $V = 0,27$ m/s. Dada la especial dificultad ya analizada que presenta la ecuación de Ergun (ec. (2.15)) en lechos con importante distribución de tamaño y densidad de partícula, la ecuación simplificada (ec. (2.26)) puede resultar adecuada para estudiar el efecto de los finos en la pérdida de carga. Como se ha indicado, la ec. (2.26) asume que la variación de Δp_u con variables distintas de la velocidad, no cambia con V .

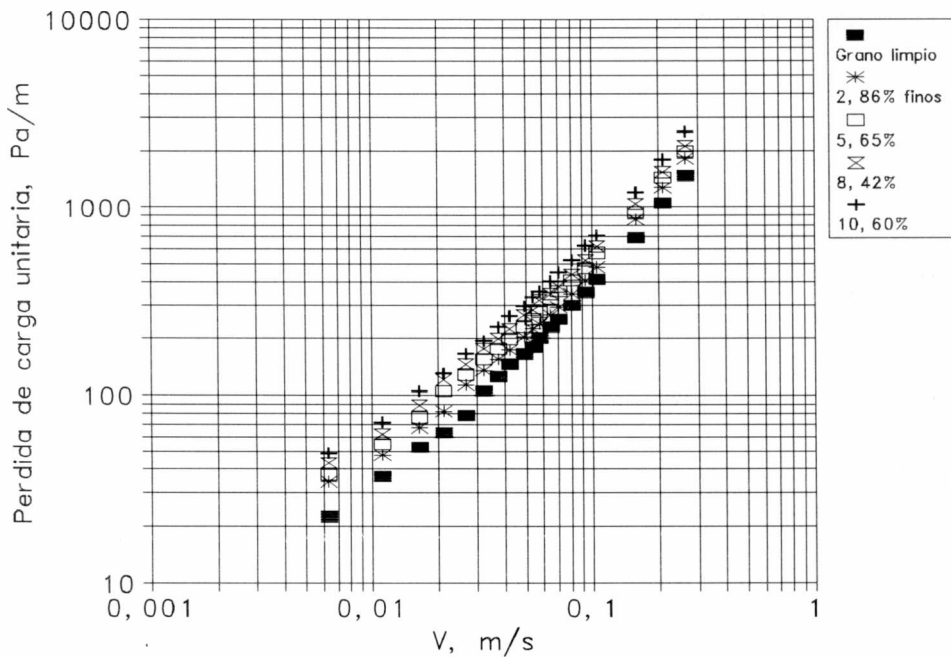
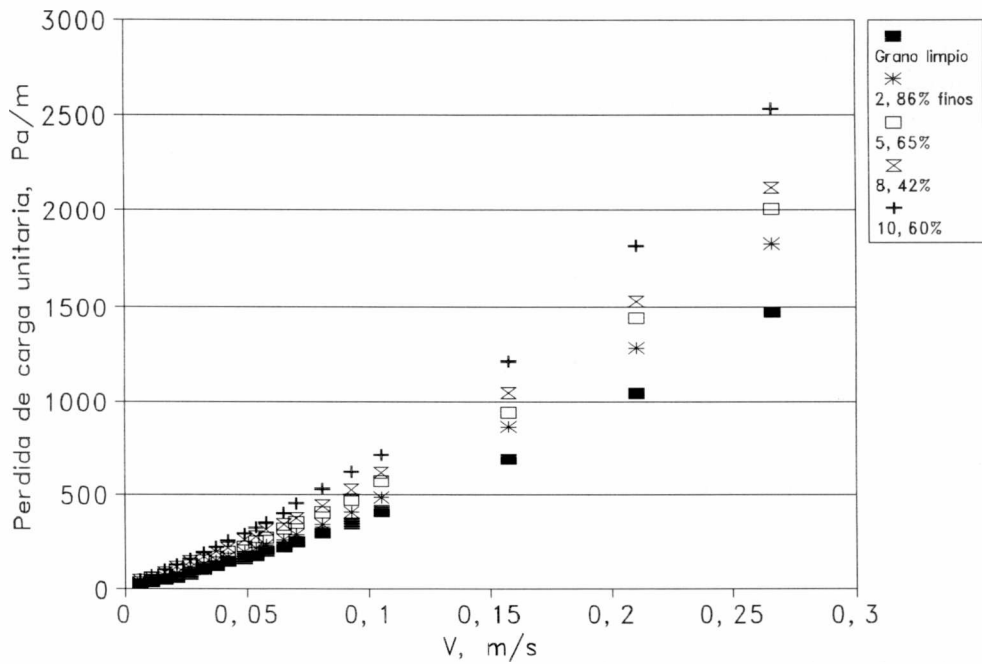


Figura 2.10a (gráfico superior): Pérdida de carga en lechos de trigo con distintas proporciones de finos, en función de la velocidad del aire. Figura 2.10 b. (Gráfico inferior). Idem Figura 2.10a, pero en escala doble logarítmica.

Secadoras continuas de trigo

En la Figura 2.11 se representan los cocientes experimentales C_F , en función de la velocidad del aire. Los C_F se definen como el cociente entre la pérdida de carga en mezclas con un porcentaje "f" de finos y las correspondientes a grano limpio ($f = 0\%$),

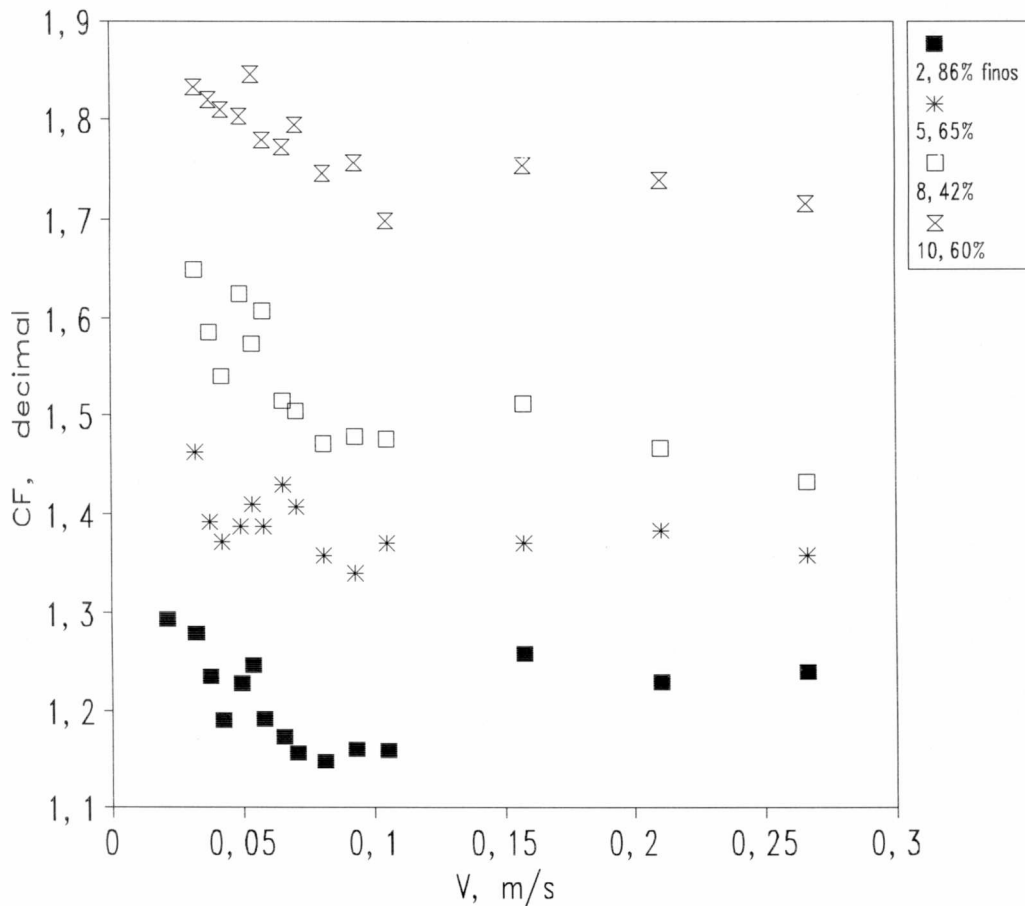


Figura 2.11. Cocientes entre la pérdida de carga a contenido de finos f (% p/p) y a 0% de finos (grano limpio), en función de la velocidad del aire.

Puede verse que C_F depende poco de la velocidad. Para confirmar esto, se realizaron tests estadísticos de la correlación de C_F con V . En tres casos (2,86, 5,65 y 10,60%), no hubo una correlación significativa mientras que en el caso restante (8,42% de finos), la

correlación fué significativa pero con muy bajo coeficiente r^2 . Es posible que, por el cambio de régimen fluidodinámico, exista una muy leve dependencia de C_F con V , pero ésta no es lo suficientemente significativa como para ser interpretada en forma numérica. Se confirma entonces que la ec. (2.26) es aplicable al caso de lechos con finos.

Los resultados del ajuste de la ecuación (2.26) para cada una de las cuatro mezclas de trigo y finos se indica en la Tabla siguiente:

Tabla 2.5. Valores de a_p de la ec. (2.26) a distintos contenidos de finos

f % p/p	$a_p \times 10^{-9}$	$s(a_p) \times 10^{-9}$	r^2	s_y Pa/m
2,86	0,213	0,002	0,997	26,3
5,65	0,237	0,001	0,999	16,6
8,42	0,253	0,001	1	11,0
10,60	0,300	0,001	0,999	16,9

puede observarse que los ajustes son muy buenos para cada f , y que a_p crece con el % de finos. El valor promedio de s_y fué nuevamente bajo, 17,7 Pa/m. La regresión lineal dió un r^2 de 0,963, con una ordenada al origen ($a_p \times 10^{-9}$ para $f = 0$) de 0,176, muy similar al valor de $a_p \times 10^{-9}$ de la Tabla 2.4, a $M = 12,8\%$ para grano limpio (0,174). La pendiente obtenida fué de 0,01084, Dado que a_p refleja los cambios de Δp_u , se ha encontrado aquí que la pérdida de carga varía linealmente con el contenido de finos. El ajuste preliminar de a_p con f puede observarse en la Figura 2.12.

Secadoras continuas de trigo

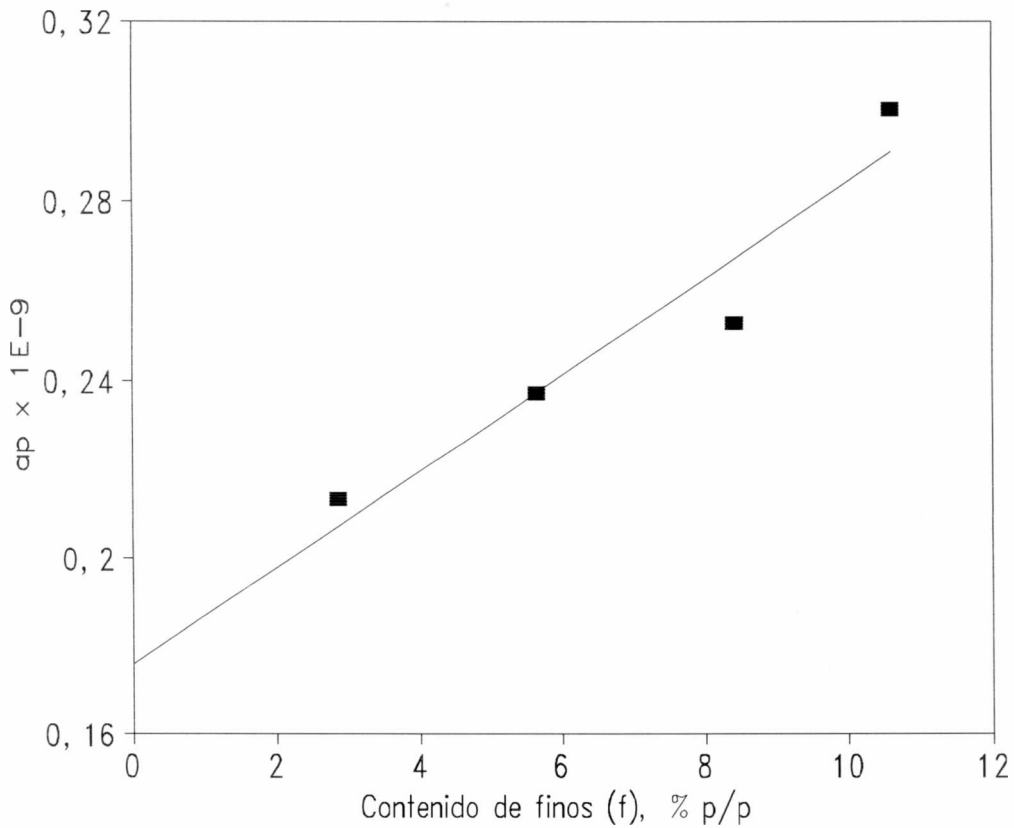


Figura 2.12. Parámetro a_p de la ecuación (2.26) en función del contenido de finos y correlación lineal de ajuste. (Nota: $1E-9 \equiv 1 \times 10^{-9}$). El valor de a_p refleja la variación de la pérdida de carga con variables del lecho distintas a la velocidad.

Por consistencia con el valor de $a_p \times 10^{-9}$ ajustado previamente para $f=0$, se fijó la ordenada al origen en 0,174. Así, combinando la ec. (2.26) con la siguiente:

$$a_p \times 10^{-9} = 0,174 + D_0 f \quad (2.31)$$

se realizó el ajuste final directo a los datos completos de V , Δp_u y f de la Figura 2.10. El resultado fue $D_0 = 0,0111$, con un error estándar despreciable; el coeficiente de determinación r^2 fue de 0,997 y el desvío típico de la estima, $s_y = 28,2$ Pa/m, equivalente a 2,9 mm ca/m.

La ecuación resultante para interpretar el efecto conjunto de la velocidad y contenido de finos, para granos de 12.8% de humedad, es la siguiente:

$$\Delta p_u = 1 \times 10^9 (0.174 + 0.0111 f) V (\mu + 4 \times 10^{-5} \rho V) \quad (2.32)$$

Puede observarse que dividiendo esta expresión general para $f > 0$, por aquella del caso particular en que $f = 0$, se obtienen los cocientes C_F mencionados previamente, cuya forma resulta $C_F = 1 + Kf$, donde $K = 0,0111/0,174 = 0,0638$. Esta expresión de C_F surge aquí analíticamente, a diferencia de Haque y colab. (1978) y Grama y colab. (1984), quienes la propusieron como fórmula de ajuste a cocientes de pérdida de carga. Haque y colab. (1978) encontraron una disminución pequeña, aunque significativa, de K con la velocidad del aire, a diferencia de lo obtenido en este trabajo, donde se dedujo una forma en que K no depende de la velocidad en coincidencia con el trabajo de Grama y colab. (1984).

De todas formas, la ecuación (2.32) obtenida aquí para Δp_u es más versátil que la expresión de C_F pues permite relacionar simultáneamente pérdidas de carga, velocidades y contenidos de finos.

2.5.7. Efecto de la temperatura en la pérdida de carga

La ecuación (2.26), tipo Ergun simplificada, incluye la viscosidad de aire μ en el término laminar y la densidad ρ en el turbulento. La densidad, ρ , presenta una dependencia inversa de la temperatura absoluta $\rho = p M_a / (R(T+273,2))$, mientras que μ (kg/(ms)), en un rango limitado, crece linealmente con T : $\mu = \mu_1 + \mu_2 T$ ($\mu_1 = 1,735 \times 10^{-5}$, $\mu_2 = 4,138 \times 10^{-8}$). Si se incluyen estas expresiones en la ecuación (2.26) para grano limpio a $M = 12,8\%$ y se calculan los cocientes entre la pérdida de carga unitaria a temperatura T y el valor a $T = 0^\circ\text{C}$ (C_T), se obtiene la expresión siguiente:

Secadoras continuas de trigo

$$C_T = \frac{\mu + 4 \times 10^{-5} \rho V}{\mu_0 + 4 \times 10^{-5} \rho_0 V} \quad (2.33)$$

donde se observa que el factor $a_p V$ se simplifica. La Figura 2.13 muestra los valores de C_T en función de T entre 0 y 100 °C a 5 velocidades de aire desde 0,006 a 0,5 m/s.

Podrá observarse que C_T aumenta con T a bajas velocidades (régimen laminar donde predomina el flujo viscoso), mientras que a velocidades moderadas del régimen de transición (0,3 m/s) la dependencia directa de μ con T es balanceada por la dependencia hiperbólica decreciente de ρ , haciendo a C_T prácticamente independiente de T . En consecuencia, no hay efecto práctico de la temperatura en la pérdida de carga para velocidades de aire típicas en secadoras continuas de aire caliente. Finalmente, a velocidades más altas (0,5 m/s), el efecto de T en ρ predomina y C_T pasa a decrecer con la temperatura.

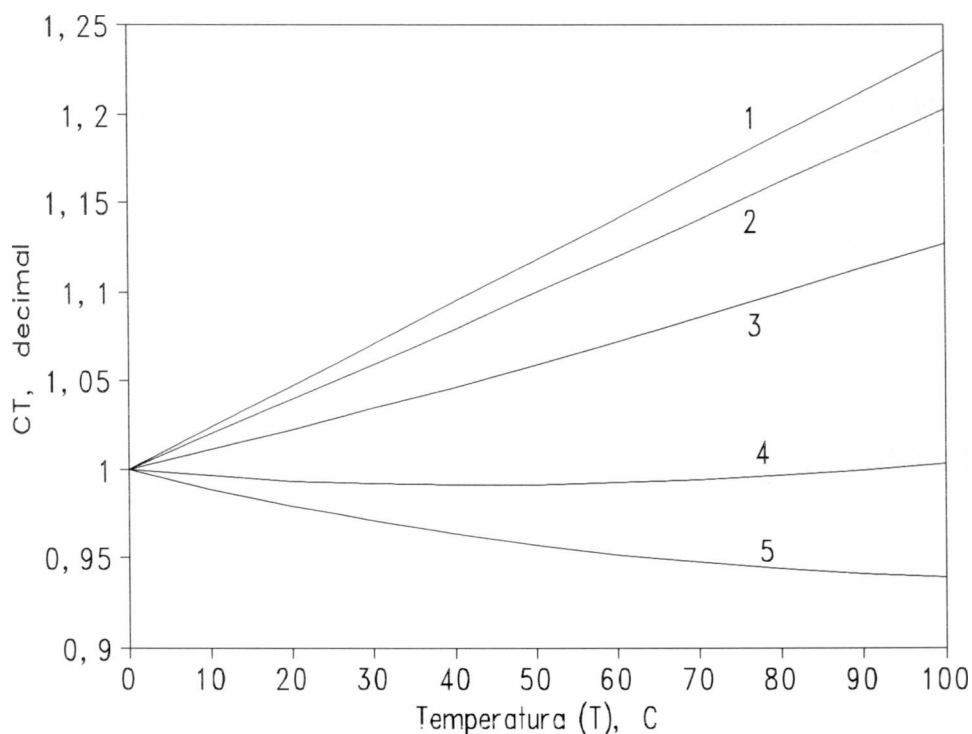


Figura 2.13. Cociente entre la pérdida de carga a una temperatura T y la correspondiente a 0°C, en función de la temperatura, para las siguientes velocidades de aire (en m/s). Curva 1: 0,006; 2: 0,030; 3: 0,100; 4: 0,300; 5: 0,500.

Obsérvese que la dependencia con la temperatura expresada a través de C_T provee información más precisa que los diagramas doble logarítmicos de f_k vs Re_m sobre los cambios de régimen fluidodinámico: si bien en la sección 2.3.2 se había calculado una velocidad de 0,03 m/s como la de fin de régimen laminar o comienzo de transición, la figura 2.13 muestra que ya a 0,03 m/s el crecimiento de C_T con T no es tan fuerte como a 0,006 m/s, indicando que a esa velocidad ya se tiene un componente claro de régimen de transición para trigo.

La Figura 2.13 permite concluir que aquellas operaciones que se realicen a bajas velocidades de aire (aireación de grano seco en silos, seca-aireación, secado con aire natural (Rodríguez, 1994) deberán considerar el efecto de la temperatura, que aumenta la pérdida de carga. En secadoras continuas, como se mencionó, no hay efecto práctico de T en Δp_u . Por el contrario, sistemas que trabajen cerca de la fluidización ($V > 0,5$ m/s) o directamente con lechos fluidizados de trigo (Giner y Calvelo, 1987), podrán favorecerse con la disminución de la pérdida de carga con la temperatura.

Habiéndose cubierto la parte de desarrollo de la ecuación constitutiva, donde se mostró la dependencia de la pérdida de carga con la velocidad del aire (V), contenido porcentual (b.h.) de humedad de los granos (M), contenido (%p/p) de partículas finas (f) y temperatura del aire (T), se retomará ahora la ecuación de la potencia (ecuación (2.3)) a efectos de construir gráficos para el diseño de sistemas de aireación en silos y secadoras continuas.

2.5.8. Diseño de gráficos de estimación de la potencia de aireación

En la sección 2.3.1 (ec. (2.3.)) se había planteado que la potencia absorbida por el aire, por unidad de sección transversal para un lecho de altura o espesor Z_{max} era:

$$P_{TS} = \Delta P_u Z_{max} V \quad (2.3)$$

y que era necesaria una ecuación constitutiva de pérdida de carga para utilizarla en diseño.

Secadoras continuas de trigo

Habiéndose observado a lo largo de este capítulo que Δp_u disminuye con la humedad del grano pero que aumenta con el contenido de finos, la ecuación de potencia podrá basarse en un grano seco (por ejemplo $M = 12,8\%$) con un contenido de finos a fijar, por ejemplo $f=8\%$. Así, el coeficiente de la ecuación valdrá $a_p = 0,263 \times 10^9$, esto es un 50% mayor que el correspondiente a grano limpio ($0,174 \times 10^9$), lo que está de acuerdo con las recomendaciones de McKenzie y colab. (1980).

Las operaciones de baja velocidad de aire, como aireación y enfriamiento de granos ensilados secos, donde la pérdida de carga aumenta con la temperatura, se hacen mayormente en el rango ambiente, mientras que en secado en secadoras continuas, el efecto de T es despreciable. Así, se utilizarán valores a 20°C , donde $\mu = 1,85 \times 10^{-5} \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ y $\rho = 1,2 \text{ kg}/\text{m}^3$. De esta forma, reemplazando los valores citados y agrupando, se obtiene la expresión particular de cálculo:

$$\Delta p_u = 0.263 \times 10^4 V (1.85 + 4.8 V)$$

reemplazando esta expresión en la ecuación de potencia (ec. (2.3)) y distribuyendo factores se obtiene:

$$P_{rs} = (4865 V^2 + 12624 V^3) Z_{\max} \quad (2.34)$$

que muestra que la potencia requerida dependerá del cuadrado de la velocidad del aire en régimen laminar y a una potencia intermedia entre 2 y 3 en transición o del cubo de la velocidad del aire en régimen turbulento.

Utilizando ahora la eficiencia energética típica (50%) del conjunto motor eléctrico más ventilador (Morey y Cloud, 1973) y considerando un factor por pérdidas en las conducciones del 30% (Jensen, 1995) se obtiene la potencia eléctrica estimada (P_{els}) de ventilación en kW/m^2 :

$$P_{els} = \frac{2 \times 1.3}{1000} (4865 V^2 + 12624 V^3) Z_{\max} \quad (2.35)$$

Esta forma de la ecuación, sin embargo es más apropiada para secadoras continuas de granos, donde, debido a que la altura (o espesor) del lecho (Z_{\max}) varía dentro del mismo orden de magnitud (0,2 - 0,5 m), la cantidad de aire se recomienda en términos de la velocidad. En operaciones de flujo lento, llevadas a cabo en condiciones de cuasi-equilibrio entre grano y aire, es preferible recomendar los caudales volumétricos específicos Q_{vv} , que, como se ha mencionado, se relacionan con la velocidad superficial como $V = Q_{vv} Z_{\max}$.

Por consiguiente, reemplazando V en la ecuación de P_{els} y distribuyendo factores, se obtiene:

$$P_{els} = \frac{2 \times 1.3}{1000} (4865 Q_{vv}^2 + 12624 Q_{vv}^3 L) Z_{\max}^3 \quad (2.36)$$

que anticipa una fuerte dependencia de la potencia con Q_{vv} y el espesor o altura de lecho, Z_{\max} .

Las Figuras 2.14, 2.15 y 2.16 muestran, cada una, un gráfico superior y otro inferior. El superior presenta la pérdida de carga (en mm c.a) versus la altura del lecho, mientras que el inferior muestra la potencia eléctrica de ventilación. En la Figura 2.14 (aireación de granos secos y seca-airación) y en la 2.15 (secado con aire natural) los valores paramétricos son de Q_{vv} , mientras que en la Figura 2.16, el valor paramétrico es la velocidad superficial V para secadoras de granos con aire caliente.

Podrá observarse que los gráficos doble logarítmicos permiten agrupar un amplio rango de condiciones, mostrando a su vez la fuerte dependencia de Δp_u y P_{els} con Q_{vv} o V y con la altura del lecho, Z_{\max} . La potencia eléctrica por unidad de sección (P_{els}) dará lugar al valor verdadero (P_{el}) para un equipo dado por medio de $P_{el} = P_{els} S$, donde S es la sección transversal al flujo de aire.

Secadoras continuas de trigo

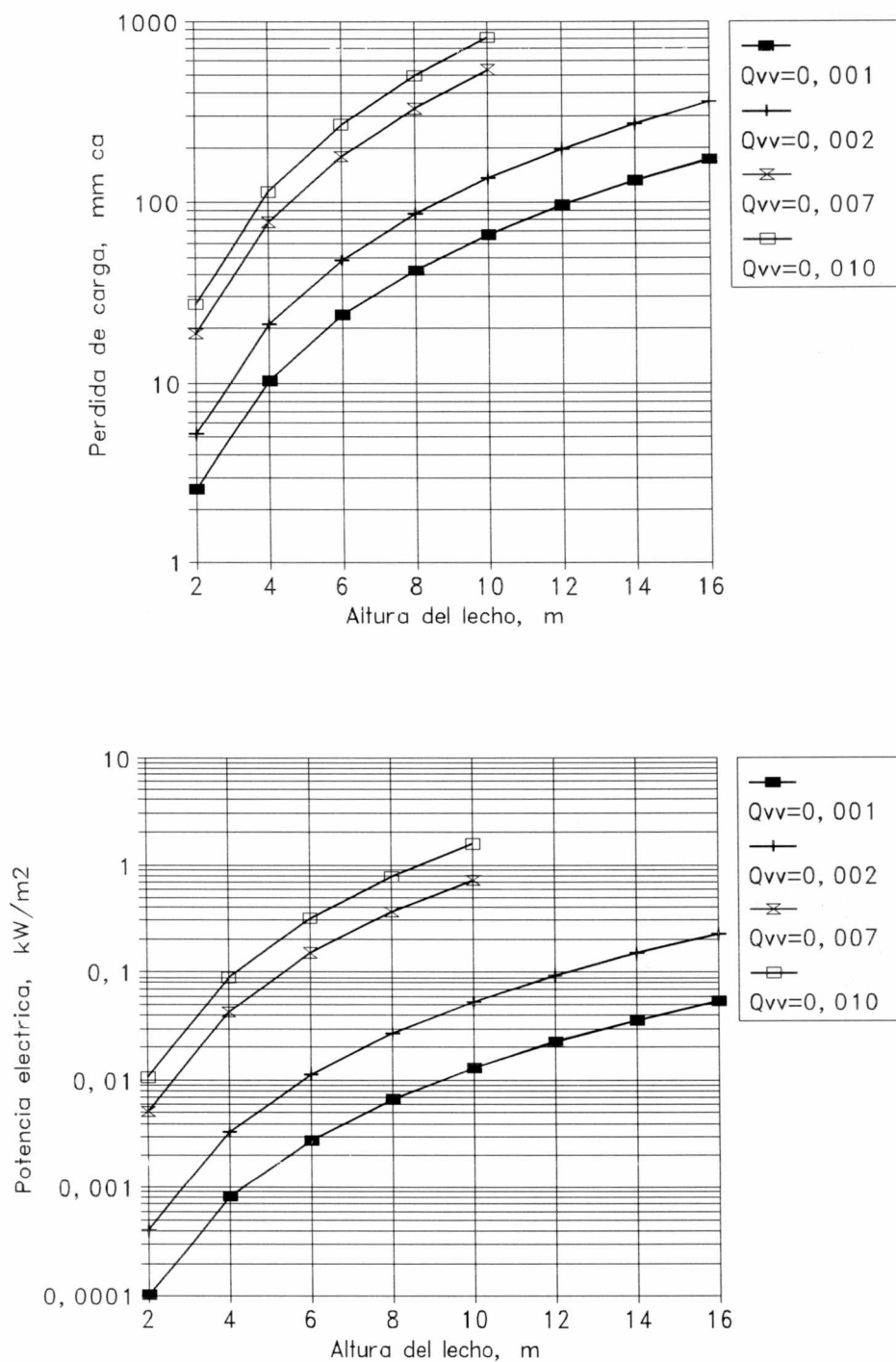


Figura 2.14. Pérdida de carga (gráfico superior) y potencia por unidad de sección (gráfico inferior) en aireación de trigo, para distintos Q_{vv} (m^3 aire /(m^3 lecho. s))

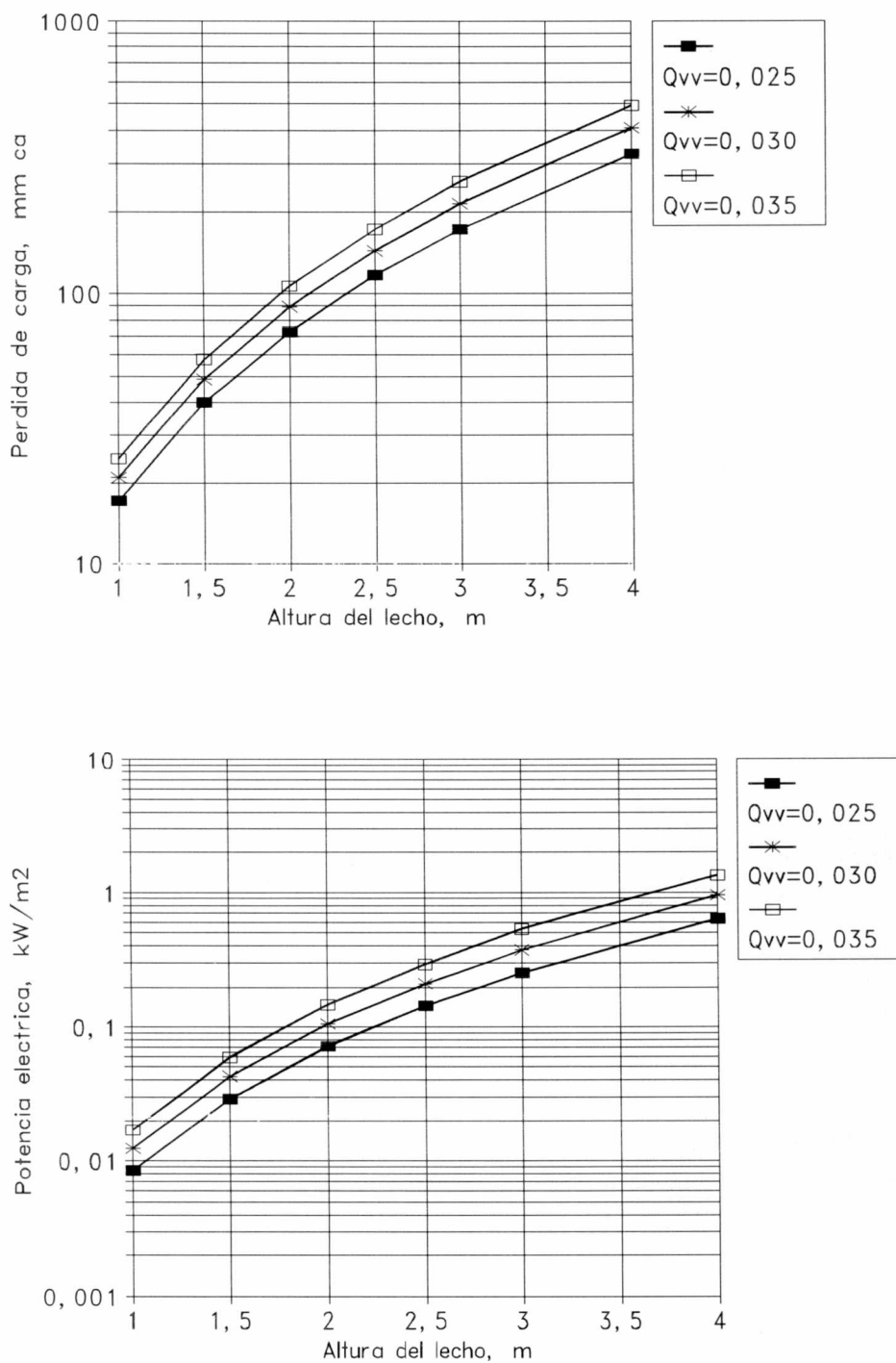


Figura 2.15. Pérdida de carga (gráfico superior) y potencia por unidad de sección (gráfico inferior) en secado con aire natural, para distintos Q_{vv}

Secadoras continuas de trigo

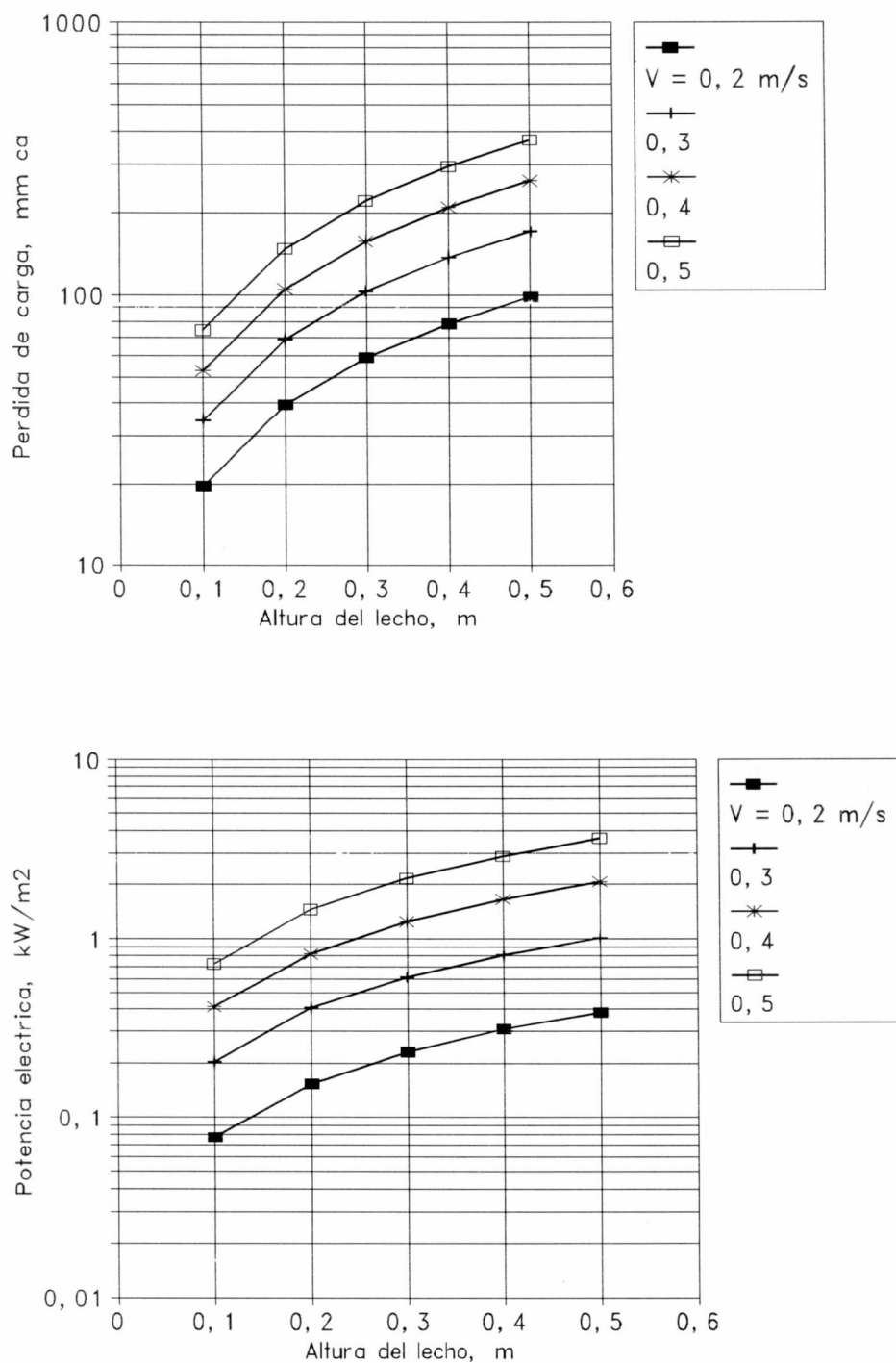


Figura 2.16. Pérdida de carga (gráfico superior) y potencia por unidad de sección (gráfico inferior) en secado con aire caliente, para distintas velocidades superficiales, V.

Ejemplos de diseño

En esta parte, se brindan ejemplos de diseño de condiciones de aireación para las operaciones post cosecha típicas en granos mencionadas anteriormente:

- 1) Aireación de Grano seco en silo
- 2) Seca-Aireación de granos (que debe decirse que no es habitual para trigo)
- 3) Secado con aire natural
- 4) Secadoras continuas de trigo. En el caso 4) se dan dos casos a velocidad de aire diferente, para observar su influencia.

En 1), 2) y 3) se considerará un silo de fondo plano perforado, con un diámetro (D) de 10 m . En 1) se usará un Q_{vv} de $0,002 \text{ m}^3 \text{ aire / (m}^3 \text{ lecho s)}$; en 2) el Q_{vv} será bastante mayor, $0,007$ pero a una altura menor $Z_{\max} = 8 \text{ m}$ (los resultados de 1) y 2) se hallan en la Figura 2.14). En 3) se aumenta considerablemente el Q_{vv} a $0,03$ pero se reduce Z_{\max} a 3 m (resultados en Figura 2.15).

En el caso 4) la secadora continua de flujo cruzado está compuesta por cuatro columnas iguales, cada una con un espesor de lecho de $Z_{\max} = 0,3 \text{ m}$. La altura de la columna se fija en 8 m con un ancho de 4 m . Así, $S = 128 \text{ m}^2$. Para este caso, los cálculos se realizan a $0,3$ y $0,4 \text{ m/s}$ de velocidad superficial. Los resultados se obtienen de la Figura 2.16). Los cálculos se resumen en la Tabla 2.6:

Secadoras continuas de trigo

Tabla 2.6. Ejemplos numéricos de cálculo de pérdida de carga y potencia de ventilación para distintas operaciones post-cosecha de trigo.

Operación	Tipo de equipo y parámetro del aire	Δp_u mmca/m	P_{els} kW/ m ²	P_{el} kW	
Aireación de grano seco (1)	Silo $S = 78,5 \text{ m}^2$ $Z_{max} = 10 \text{ m}$ $Q_{vv} = 0,002 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \text{ s})$ $V = Q_{vv} Z_{max} = 0,02 \text{ m/s}$	150	0,055	4,3	
Seca-Aireación (2)	Silo $S = 78,5 \text{ m}^2$ $Z_{max} = 8 \text{ m}$ $Q_{vv} = 0,007 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \text{ s})$ $V = Q_{vv} Z_{max} = 0,056 \text{ m/s}$	330	0,36	28,3	
Secado con aire natural (3)	Silo $S = 78,5 \text{ m}^2$ $Z_{max} = 3 \text{ m}$ $Q_{vv} = 0,03 \text{ m}^3/(\text{m}^3 \text{ s})$ $V = Q_{vv} Z_{max} = 0,09 \text{ m/s}$	220	0,38	29,8	
Secado continuo	Equipo de 4 columnas $Z_{max} = 0,3 \text{ m}$	$V = 0,3 \text{ m/s}$	105	0,61	77
	$S = 128 \text{ m}^2$	$V = 0,4 \text{ m/s}$	158	1,24	158

El caso de secado continuo permite apreciar la importancia de optimizar el valor de V , pues el aumento de la velocidad tendrá un gran impacto en la inversión inicial del equipo y en el consumo eléctrico. Obsérvese que el incremento de V del 33% se traduce en un aumento del 105% en la potencia instalada. Asimismo, estos cálculos muestran que la importancia del tema de aireación en el entendimiento y en el diseño de la operación de secadoras y equipos de aireación de granos.

CAPITULO 3. PSICROMETRIA Y EVAPORACION DE AGUA PURA

CAPITULO 3. PSICROMETRIA Y EVAPORACION DE AGUA PURA

3.1.PSICROMETRIA

3.1.1. INTRODUCCION

Van Arsdel (1963), en su importante libro de deshidratación de alimentos indica que los diagramas psicrométricos facilitan los cálculos requeridos para el diseño de equipamiento de secado con aire, permitiendo la correlación y el análisis de resultados de experiencias de secado y la visualización rápida de las relaciones matemáticas y fenómenos complejos que existen en una secadora. En consecuencia, se prestará especial atención a la psicrometría como base para el estudio del secado.

La psicrometría estudia las propiedades y el comportamiento de mezclas de gases y vapores, en condiciones tales que los primeros se consideran incondensables y los segundos, condensables (ASHRAE, 1997). Dada su definición, se pueden encontrar numerosas mezclas psicrométricas, pero en secado de alimentos y muchas otras aplicaciones, la mezcla psicrométrica más importante es el aire húmedo: aire seco mas vapor de agua. El tema de psicrometría se describe en varios manuales de ingeniería (ASHRAE, 1997; Green y Maloney, 1984; Masters, 1991) y libros de secado de sólidos (Nonhebel y Moss, 1979), secado de alimentos (Van Arsdel, 1963), secado de granos (Brooker y colab., 1992), o ingeniería de alimentos (Heldman y Singh, 1981).

Los diagramas psicrométricos son usados por ingenieros y técnicos para calcular humedades relativas a partir de otras propiedades psicrométricas, estimar el calor a añadir o remover del aire en algunas evoluciones, describir los cambios de temperatura y humedad del aire en operaciones de secado o calcular gráficamente los resultados de mezclas de corrientes de aire, entre otros usos.

El diagrama fué definido como una "Ayuda Gráfica" por Himmelblau (1988) y puede ser interpretado como una forma particular de otra ayuda gráfica, el diagrama

Secadoras continuas de trigo

Entalpía-Concentración. El diagrama psicrométrico es relativamente fácil de usar, pero los fundamentos de las ecuaciones utilizadas para predecir las curvas que contiene son menos conocidos, y se considera que los conceptos involucrados pueden ser revisados empleando una metodología consistente de Ingeniería Química.

Asimismo, es importante destacar que el uso del diagrama psicrométrico introduce problemas de unidades - todavía hay muchos diagramas que no incluyen unidades SI y, cuando se leen escalas muy comprimidas, provoca errores de lectura.

Para evitar estos problemas, autores previos como Zimmerman y Levine (1945) ofrecieron tablas precisas de datos psicrométricos, pero son muy numerosas y de tediosa utilización; además, no incluyen unidades SI.

Los problemas descritos pueden evitarse con un programa de computadora confiable que "genere" las cartas psicrométricas, tanto a efectos de trazar evoluciones del aire, como para calcular incógnitas psicrométricas en un estado dado. El programa desarrollado por Ratti (1991) es muy útil en este sentido, no obstante lo cual se considera que es posible realizar aquí una descripción paso por paso de la naturaleza de las ecuaciones psicrométricas, de su implementación computacional para generar diagramas psicrométricos, y de las analogías existentes entre algunas evoluciones psicrométricas y otras que normalmente se describen bajo el tema de "evaporación de agua", o "secado de sólidos".

A su vez, este capítulo permite introducir muchas de las variables y conceptos que luego se utilizarán en forma directa en la parte de secado de granos.

Se verá que la evolución del aire húmedo conocida como curva isoentálpica o de saturación adiabática, puede considerarse como una forma idealizada de la operación de equipos de secado, donde la "fase" aire cambia su humedad y temperatura. A su vez, el fenómeno del enfriamiento del bulbo húmedo permite introducir las ecuaciones de velocidad de transferencia de calor y materia interfacial, que luego se podrán utilizar en la parte de evaporación de agua pura y de secado de partículas sólidas individuales, donde el aire, debido a su alto caudal, pasa sin modificarse quedando los cambios confinados al sistema

desde el cual se evapora el agua.

Como resultado de este tratamiento, se remarcarán las diferencias entre los métodos de cálculo de las temperaturas de saturación adiabática (T_{sa}) y bulbo húmedo (T_{bh}), que se asumen a menudo como propiedades indiferenciadas en el sistema aire-vapor de agua.

Finalmente, se destacarán las relaciones entre la temperatura de rocío (T_R) y la humedad del aire (h_a), en vista que la T_R es una propiedad fundamental de la psicrometría que posibilita la forma más precisa de determinar el contenido de vapor en el aire, y de controlar la humedad relativa de una corriente de secado (Bruce, 1991). Será necesario, asimismo, definir propiedades del sistema del agua-aire húmedo.

El capítulo concluirá con la descripción de la programación de los módulos necesarios para realizar un programa de generación de evoluciones del aire para el diagrama psicrométrico y de cálculo de variables psicrométricas, usando en el segundo caso dos datos independientes. Se brindará un ejemplo comparativo de su utilización.

3.1.2. DEFINICIONES BASICAS EN PSICROMETRIA

3.1.2.1. Aire seco y húmedo

Aire seco

El aire atmosférico contiene un gran número de constituyentes gaseosos así como también vapor de agua y una variedad de contaminantes (humo, polen, contaminantes gaseosos no presentes normalmente en áreas lejanas a fuentes de contaminación).

Por definición, el aire seco existe cuando todo el vapor y los contaminantes se remueven del aire atmosférico. Se ha demostrado que la composición del aire seco puede considerarse aproximadamente constante para los cálculos de secado aunque, estrictamente, ocurren pequeñas variaciones de los componentes individuales en el tiempo, localización

Secadoras continuas de trigo

geográfica y altitud. La Tabla 1 muestra la composición aproximada del aire seco, %v/v, aproximadamente igual a % mol/mol (ASHRAE (1997)).

Tabla 3.1. Composición del aire seco

Componente	Composición (% v/v)
N ₂	78,084
O ₂	20,9476
Ar	0,934
CO ₂	0,0314
Ne	0,001818
He	0,000524
CH ₄	0,0002
SO ₂	0,0 - 0,0001
H ₂	0,00005

Constituyentes menores: Kr, Xe, y O₃ \approx 0,0002 % v/v. El peso molecular del aire seco (M_a) es de 28,9645 g/gmol, que se tomará $M_a = 29$ g/gmol, 0,029 kg/gmol, ó 29 kg/kgmol, según la conveniencia del caso.

Aire húmedo

El aire húmedo se define como la mezcla binaria de dos componentes: aire seco y vapor de agua. En secado, el aire seco puede tomarse como un pseudo componente toda vez que sus constituyentes gaseosos no actúan por separado. La cantidad de vapor de agua en el aire húmedo es variable, cambiando desde cero (aire seco) hasta un máximo que depende principalmente de la temperatura y en menor medida de la presión total, donde se dice que el aire húmedo está *saturado* existiendo un equilibrio entre el aire húmedo y la fase agua condensada.

Diagrama psicrométrico

Las evoluciones de corrientes de aire húmedo son diversas; algunas de ellas involucran únicamente transferencia de calor sensible como calentamiento o enfriamiento sin condensación, requiriendo solamente la aplicación del balance macroscópico de energía. Sin embargo, la mayoría comprende transferencia simultánea de materia y energía, como la saturación adiabática, dehumidificación de aire por enfriamiento (que produce condensación de agua) y humidificación por adición de agua atomizada o vapor; otra operación importante es el mezclado adiabático de corrientes de aire húmedo. Todas estas operaciones se analizan en términos de balances macroscópicos simultáneos de materia y energía.

Las expresiones resultantes son comúnmente algebraicas y pueden resolverse analítica o numéricamente, según la variable a calcular.

Los resultados de la resolución de balances macroscópicos para diversas evoluciones graficadas en forma superpuesta dan lugar a los Diagramas Psicrométricos que, como se ha mencionado, representan una forma particular del diagrama Entalpía-Concentración de la solución de aire seco y vapor de agua. Esta característica se ve con claridad en el Diagrama psicrométrico de Mollier, de amplia utilización en ingeniería mecánica. El gráfico, desarrollado por Mollier, entre 1923 y 1929 (Van Arsdel, 1963) representa la entalpía del aire en uno de los ejes cartesianos y la temperatura en otro, con una escala especial que permite calcular gráficamente las propiedades de las mezclas de corrientes de aire húmedo.

Sin embargo, la mayor parte de los diagramas utilizados en ingeniería química son previos al de Mollier, y datan de 1908, con el trabajo de Grosvenor, continuado por Carrier en 1911 (Van Arsdel, 1963). En éstos, se representa la masa de vapor de agua del aire por unidad de masa de aire seco (humedad absoluta) en ordenadas y la temperatura del aire en abscisas, agregándose la entalpía en una escala auxiliar diagonal, perpendicular a las líneas isoentálpicas de saturación adiabática.

Secadoras continuas de trigo

3.1.2.2. Humedad absoluta

Una masa de aire húmedo está constituida por el aire seco (m_a) más el vapor disuelto (m_v). La humedad absoluta (h_a) es una relación de partes entre la masa de vapor y la de aire seco. Así, $h_a = m_v/m_a$. Aplicando la ecuación de estado de los gases ideales junto a la ley de las presiones parciales se tiene :

$$p_{va} V = \frac{m_v}{M_v} R T$$
$$p_a V = \frac{m_a}{M_a} R T$$

donde M_v , p_{va} y M_a , p_a son los pesos moleculares y presiones parciales del vapor y aire seco, respectivamente. De aquí, resulta $h_a = m_v/m_a = M_v p_{va}/M_a p_a$. Si $M_v/M_a = 18/29 = 0,621$ y se sabe que la presión parcial del aire seco puede obtenerse a partir de $p_a = p - p_v$, (p : presión total), la forma final de la definición de humedad absoluta para el sistema aire/vapor de agua resulta:

$$h_a = 0,621 \frac{p_{va}}{p - p_{va}} \quad (3.1)$$

Puede observarse que, a p constante, habrá un valor determinado de la presión parcial de vapor para cada humedad absoluta y viceversa, independientemente de la temperatura del aire. Este concepto permite determinar la humedad relativa por el método del punto de rocío, que se verá en secciones posteriores.

3.1.2.3. Grado de Saturación del Aire y Humedad Relativa

Como se mencionó anteriormente, existe un contenido de vapor máximo o de saturación para cada temperatura, definido como h_{as} , que se alcanza cuando la presión parcial del vapor p_{va} iguala la presión de saturación líquido-vapor del agua, p_s . El valor de h_{as} viene dado por una forma particular de la ecuación (3.1)

$$h_{as} = 0,621 \frac{p_s}{p - p_s} \quad (3.2)$$

donde p_s es una función exclusiva de la temperatura. Se puede definir como Grado de Saturación del aire (g_s), a la relación existente entre la humedad que tiene el aire y la máxima humedad que podría tener por saturación a temperatura constante. Así, $g_s = h_a/h_{as}$, que en términos de las ecuaciones (3.1) y (3.2), queda:

$$g_s = \frac{p_{va}(p - p_s)}{p_s(p - p_{va})} \quad (3.3)$$

a menudo expresado en forma porcentual. En la saturación, $p_v = p_s$, resultando $g_s = 1$.

La Figura 3.1 muestra la relación entre h_a , h_{as} y g_s para un aire de temperatura T_a , a la cual se evalúa p_s . El gráfico muestra que g_s permite una visualización directa de la "distancia" existente entre un aire de T_a y h_a y el correspondiente aire saturado a T_a , h_{as} .

Secadoras continuas de trigo

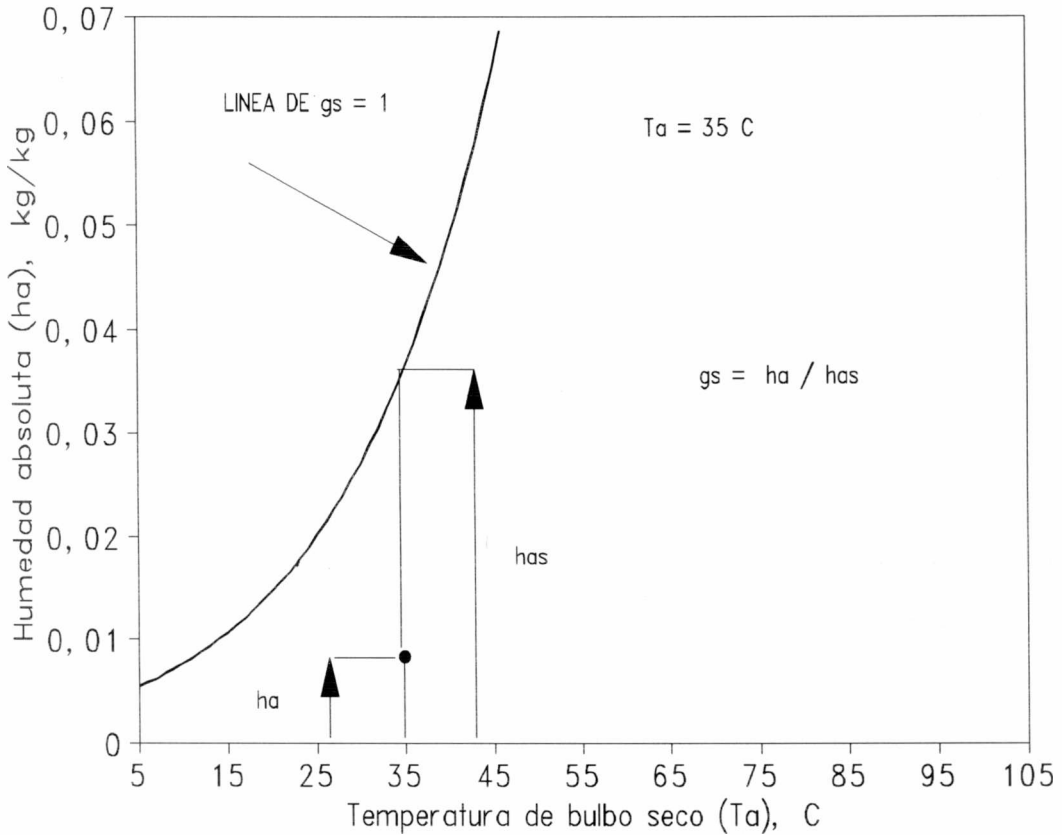


Figura 3.1. Humedad absoluta y humedad absoluta de saturación a temperatura de bulbo seco constante.

A pesar de la evidente utilidad de g_s como para representar justamente el grado de saturación del aire, la variable más utilizada con este propósito es la Humedad Relativa (h_r), en virtud de que posee un significado termodinámico más preciso. La h_r viene dada por:

$$h_r = \frac{p_{va}}{p_s} \tag{3.4}$$

que también vale 1 en la saturación. Podrá verse en la definición del grado de saturación (ecuación (3.3)) que si $p \gg P_s$ (que implica necesariamente $p \gg p_{va}$), el valor de g_s

tiende a coincidir con h_r , lo cual es una situación típica para aire a temperaturas bajas y para aire de poca humedad a temperaturas moderadas.

La humedad relativa es la variable más apropiada para las fuerzas impulsoras de transferencia de materia entre aire húmedo y agua o sólido húmedo, pues su definición coincide con la de la actividad acuosa, a_w (Iglesias y Chirife, 1976). De hecho, la humedad relativa es la actividad acuosa del aire. El a_w permite establecer, para transferencia de materia, una continuidad de los gradientes entre fases diferentes, de la misma forma en que la temperatura lo establece en transferencia de calor.

3.1.2.4. Entalpía del aire húmedo

En las condiciones de presiones bajas y temperaturas moderadas o altas que estamos analizando, la entalpía del aire húmedo (H_a) se toma como la suma de las contribuciones del aire seco y del vapor de agua:

$$H_a = H_{ad} + H_v h_a \quad (3.5)$$

y puede verse que, para un aire de humedad h_a , la entalpía de cada término está referida solamente a la masa seca del aire, lo que facilita los cálculos. El valor de H_{ad} es la contribución del aire seco, mientras que el producto $H_v h_a$ representa la del vapor contenido en la unidad de masa de aire seco. El valor H_v es la entalpía del vapor de agua. Normalmente, se toma un estado de referencia de entalpía $T_r = 0^\circ\text{C}$ y agua en estado líquido (ASHRAE, 1997). Así, la expresión de entalpía resulta:

$$H_a = C_{pa} T_a + (L_{w0} + C_{pv} T_a) h_a \quad (3.6)$$

donde L_{w0} es el calor de vaporización del agua pura a 0°C .

Los calores específicos del aire seco C_{pa} y vapor C_{pv} se tomarán en este trabajo como independientes de la temperatura, lo cual introduce un error mínimo, bastante menor al 1% (Heldman y Singh, 1981) y facilita los cálculos.

Secadoras continuas de trigo

En ocasiones, se prefiere agrupar la definición de entalpía de aire húmedo para definir un calor específico variable:

$$H_a = (C_{pa} + C_{pv} h_a) T_a + L_{wo} h_a \quad (3.7)$$

donde $C_{pa} + C_{pv} h_a$ es el denominado "calor húmedo".

3.1.3. PROPIEDADES DEL AIRE Y AGUA UTILIZADOS EN ESTE TRABAJO

Presión de saturación líquido-vapor del agua, p_s

Utilizando datos de p_s de literatura entre 0 y 100°C (101 puntos experimentales), se ajustó la correlación de Kiefer (Weast, 1975; Zuritz y Singh, 1982):

$$p_s = \text{EXP} \left(A - \frac{B}{T_k} - C \ln T_k \right) \quad (3.8)$$

donde T_k es la temperatura en K, para p_s expresada en Pa. La correlación dió un $r^2 = 1$, y los parámetros y sus desviaciones estándar (indicadas entre paréntesis), resultaron: $A = 54,119 (0,1)$; $B = 6547,1 (5,131)$; $C = 4,230 (0,015)$. La desviación típica de la estima s_y fué de 5,033 Pa, unos 0,04 mmHg. Si se considera que a 0°C la p_s es de unos 4,6 mmHg, se obtiene un error menor al 1% a 0°C, que decrece considerablemente al aumentar la temperatura. El valor de s_y se calculó según:

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\text{experimental}_i - \text{predicho}_i)^2}{N - np}} \quad (3.9)$$

siendo N el número de datos y np el de parámetros ajustados.

Calores específicos

Como se indicó, se tomarán valores constantes en J/(kg K), $C_{pa}=1008$ y $C_{pv} = 1883$

(Heldman y Singh, 1981). Nótese que al estar los calores específicos referidos a una diferencia de temperatura, indicar J/(kg°C) o J/(kg K) es indiferente. En el caso de utilizar el C_p del agua líquida (C_{pw}), se tomará un valor de 4187.

Calor de vaporización del agua pura (L_w)

Se utilizó aquí la ecuación de Clapeyron (Weast, 1975) que relaciona la curva de presión de vapor de una sustancia con el calor latente. En el equilibrio líquido-vapor, la expresión toma la forma siguiente:

$$\frac{dp_s}{dT_k} = \frac{L_w}{T_k(V_v - V_l)} \quad (3.10)$$

Dado que el volumen específico molar del vapor (V_v) es mucho mayor que el del líquido (V_l) y expresando $V_v = R T_k / p_s$ se obtiene:

$$\frac{dp_s}{dT_k} = \frac{L_w p_s}{R T_k^2}$$

que inmediatamente permite ser reescrita como:

$$\frac{dp_s / p_s}{dT_k} = \frac{d \ln p_s}{dT_k} = \frac{L_w}{R T_k^2} \quad (3.11)$$

para despejar un calor de vaporización molar L_w en función de la temperatura con:

$$L_w = R T_k^2 \frac{d \ln p_s}{dT_k} \quad (3.12)$$

Desarrollando la derivada $d \ln p_s / dT_k$ de la correlación de Kiefer (ec. (3.8)), la expresión final del L_w , ahora en J/kg de agua, queda:

$$L_w = \frac{R}{M_v} (B - C T_k) \quad (3.13)$$

que predice una disminución lineal del calor latente de vaporización de agua con la

Secadoras continuas de trigo

temperatura, en coincidencia con lo obtenido por Brooker y colab. (1992). Los resultados de la funcionalidad obtenida aquí pueden verse en la Figura 3.2.

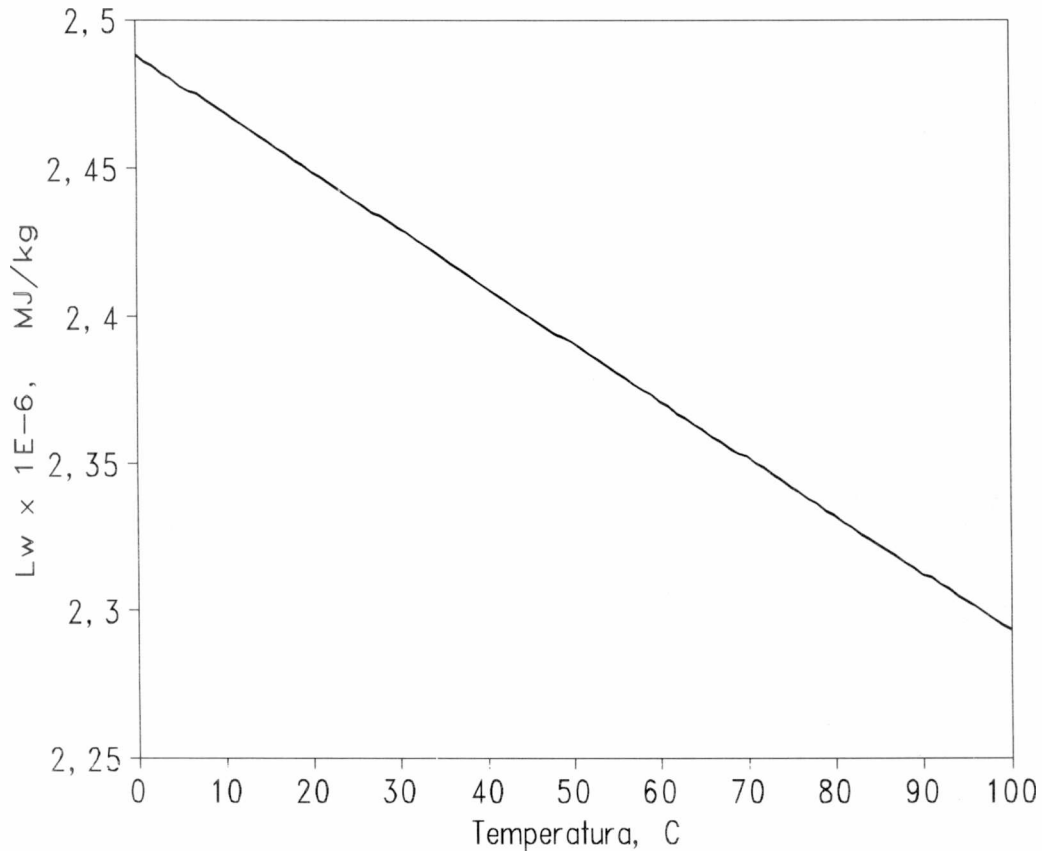


Figura 3.2. Calor de vaporización del agua pura (L_w) en función de la temperatura.

Nota: $1E-6 \equiv 1 \times 10^{-6}$

Viscosidad (μ) y conductividad térmica del aire (k_{Ta})

Se emplearon datos experimentales de estas propiedades para temperaturas (T_c) entre -20 y 140 °C listados por Heldman y Singh (1981) y se los regresionó linealmente con T_c (r^2 superior a 0,999 en ambos casos). La viscosidad viene dada en $kg/(m.s) \equiv Pa.s$, mientras que la conductividad, en $W/(m \text{ } ^\circ C) \equiv W/(m K)$. Las expresiones obtenidas son:

$$\begin{aligned} \mu &= 1.735 \times 10^{-5} + 4.318 \times 10^{-8} T_c \\ k_{T_a} &= 0.0238 + 6.838 \times 10^{-5} T_c \end{aligned} \quad (3.14)$$

Estas expresiones, junto a la difusividad del sistema vapor de agua-aire son necesarias para determinar los coeficientes de transferencia de calor y materia aire-partícula.

Difusividad aire-vapor de agua (D_{AB})

Reid y colab. (1977) presentan la correlación de Fuller, Schetter y Giddings para el D_{AB} en mezclas binarias de gases, que tiene validez para el sistema vapor de agua-aire:

$$D_{AB} = \frac{10^{-7} T_k^{1.75} \left[\frac{(M_A + M_B)}{M_A M_B} \right]^{1/2}}{P \left[\left(\sum V \right)_A^{1/3} + \left(\sum V \right)_B^{1/3} \right]} \quad (3.15)$$

donde D_{AB} se expresa en m^2/s para p en atmósferas y T_k en K. Los subíndices A y B pueden denotar agua o aire indistintamente en virtud de que $D_{AB} = D_{BA}$ (Treybal, 1980). Las sumatorias del denominador son parámetros moleculares cuyos valores son 20,1 y 12,7, para aire y agua, respectivamente.

3.1.4. TRAZADO DE CURVAS DE IGUAL HUMEDAD RELATIVA

Para cumplir el objetivo de construir un diagrama básico $T_a - h_a$ con dos tipos de curvas donde estas variables están relacionadas: las de h_r constante y las curvas de saturación adiabática (T_{sa}), se comenzará aquí con las de h_r constante. De acuerdo a la forma del diagrama tipo Carrier, se graficará la humedad absoluta (h_a) contra la la temperatura del aire T_a (a partir de aquí la "temperatura de bulbo seco" del aire) para igual humedad relativa. El diagrama puede inducir la idea de que h_a siempre es función de T_a , pero esto es así solamente en algunas evoluciones de aire mientras que en otras, son independientes entre sí, análogamente a lo que sucede con presión y temperatura en gráficos p - T de sustancias puras. El cálculo de la familia de curvas de h_r constante se describe en el diagrama de la Figura 3.3.

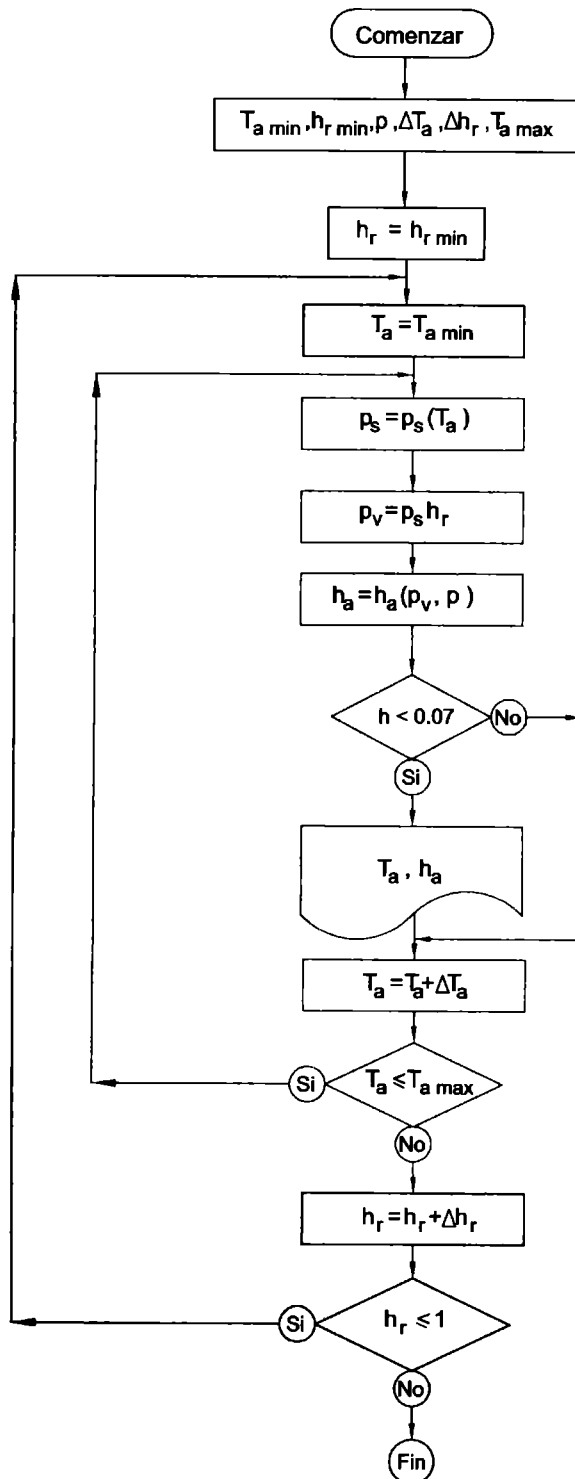


Figura 3.3. Diagrama de bloques para cálculo de familia de curvas h_a vs T_a a h_r constante.

La Figura 3.4 muestra una familia de estas curvas h_a versus T_a cada una para h_r constante.

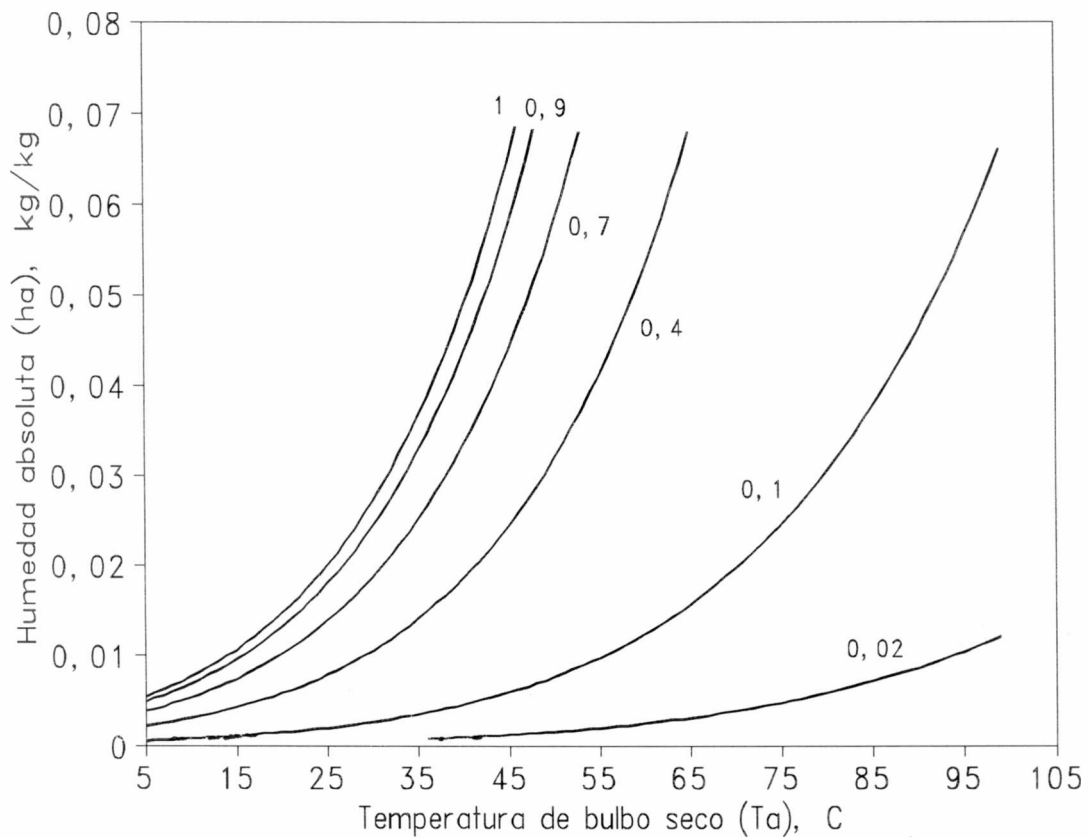


Figura 3.4. Curvas de igual humedad relativa, parte constitutiva de los diagramas psicrométricos.

Puede verse que la curva para $h_r = 1$ es la de aire saturado y representa esencialmente la curva de presión de saturación líquido-vapor del agua, pero expresada en unidades de humedad absoluta, por medio de la ecuación (3.2).

Por otro lado, la Figura 3.4 muestra que la capacidad del aire para disolver vapor (curva de $h_r = 1$) aumenta notablemente con la temperatura, lo que se traduce en mayores

Secadoras continuas de trigo

fuerzas impulsoras para evaporación de agua y, en consecuencia, un secado más rápido. Este gráfico permite hacer otra observación para una etapa típica previa al secado: el calentamiento del aire. Si éste es llevado a cabo sin agregado ni remoción de vapor (por ejemplo, a través de un intercambiador de calor), se evolucionará desde una temperatura inicial del aire a un valor final de izquierda a derecha por una línea de h_a constante, obteniéndose una gran disminución de la humedad relativa. Por ejemplo, a $h_a = 0,01$ kg/kg, el aumento de 25 a 95°C implica una reducción de h_r de 0,55-0,60 a 0,02.

Debe resaltarse que la h_r no disminuye aquí por reducción de h_a o, más precisamente, de p_{va} , sino por el aumento considerable de la humedad de saturación h_{sa} , o bien de la presión de saturación p_s , lo que reduce considerablemente el cociente $h_r = p_{va}/p_s$. En consecuencia, un calentamiento a h_a constante reduce h_r por un alejamiento relativo de la condición de saturación y no por reducción del contenido de vapor en el aire.

3.1.5 TEMPERATURA DE SATURACION ADIABATICA (T_{sa}) Y TRAZADO DE CURVAS A T_{sa} CONSTANTE

Esta es una de las evoluciones psicrométricas más importantes y representa, como se verá, una forma idealizada de lo que ocurre en un equipo de secado de sólidos. El objetivo aquí es obtener otra familia de curvas que relacionen a h_a con T_a . Considérese para esto el esquema de la Figura 3.5, donde un aire no saturado ingresa a una cámara aislada suficientemente grande, con caudal másico de aire seco \dot{m}_a , temperatura T_a y humedad absoluta, h_a . Esta cámara recibe también agua líquida atomizada con caudal \dot{m}_w , a temperatura genérica, T_w . El intercambio de calor y materia es suficientemente prolongado en la cámara como para que, a la salida, ambas fases estén en equilibrio y en consecuencia el aire quede saturado de humedad. En tales condiciones, el aire saldrá a la "Temperatura de saturación adiabática", T_{sa} , y a la humedad absoluta de saturación a esa temperatura, h_{sa} .

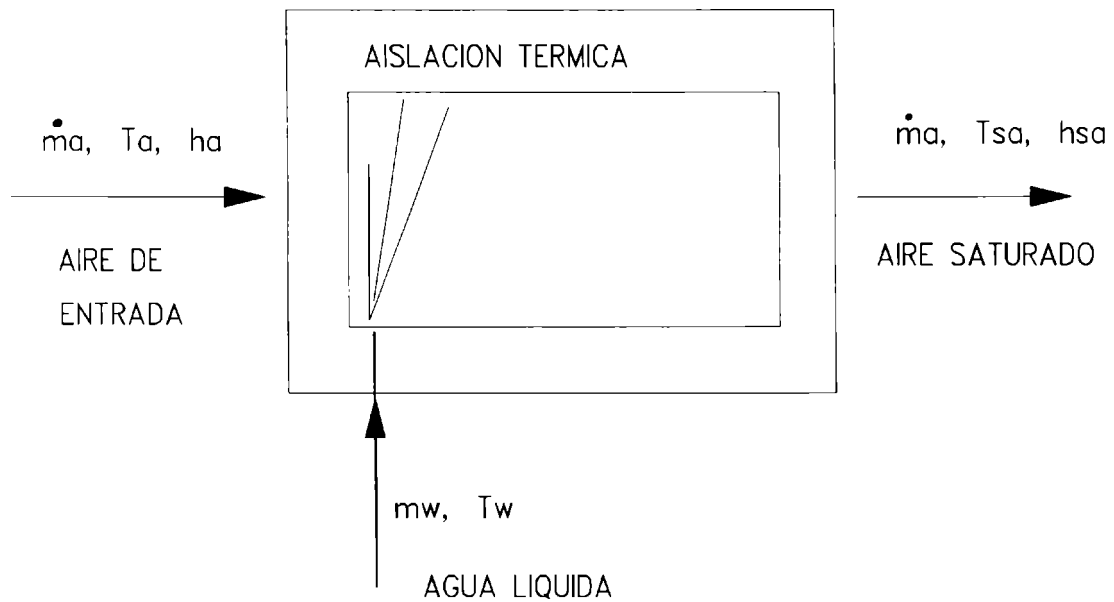


Figura 3.5. Esquema de una cámara donde se produce la saturación adiabática de una corriente de aire.

El balance de materia (agua) para tal situación es:

$$\dot{m}_a h_a + \dot{m}_w = \dot{m}_a h_{sa} \quad (3.16)$$

que es ilustrativo, pero no práctico, para el propósito de trazar esta evolución del aire. Con este fin se debe recurrir al balance macroscópico de energía (primer principio de la termodinámica para sistemas abiertos), tomar el interior de la cámara como sistema adiabático y considerar estado estacionario, ausencia de cambios de energía cinética y potencial e inexistencia de trabajo desarrollado contra partes móviles. El resultado es un

Secadoras continuas de trigo

cambio total de entalpía nulo, que puede expresarse como sigue:

$$\dot{m}_a H_a + \dot{m}_w H_w = \dot{m}_a H_{sa} \quad (3.17)$$

Tomando el caso general de estado de referencia de entalpía a T_r y agua en estado líquido, se tiene:

$$\dot{m}_a [(C_{pa} + C_{pv} h_a)(T_a - T_r) + L_{wr} h_a] + \dot{m}_w C_{pw}(T_w - T_r) = \dot{m}_a [(C_{pa} + C_{pv} h_{sa})(T_{sa} - T_r) + L_{wr} h_{sa}]$$

Ecuación (3.18)

donde L_{wr} es el calor latente de vaporización a T_r . Reordenando la ecuación se obtiene una primera expresión general para h_a versus T_a a T_{sa} constante.

$$h_a = h_{sa} + \frac{(C_{pa} + C_{pv} h_{sa})(T_{sa} - T_r) - (C_{pa} + C_{pv} h_a)(T_a - T_r)}{L_{wr}} - \frac{\dot{m}_w C_{pw}}{\dot{m}_a L_{wr}} (T_w - T_r) \quad (3.19)$$

que como se verá, requiere conocer T_w y establecer una temperatura de referencia T_r . Si T_r se toma 0°C , se obtiene:

$$h_a = h_{sa} + \frac{(C_{pa} + C_{pv} h_{sa}) T_{sa} - (C_{pa} + C_{pv} h_a) T_a}{L_{w0}} - \frac{\dot{m}_w C_{pw}}{\dot{m}_a L_{w0}} T_w \quad (3.20)$$

Sin embargo, estas expresiones podrían inducir la idea de que la temperatura de saturación adiabática (T_{sa}) depende de la temperatura de entrada del agua T_w , cuando es en realidad una propiedad del aire de entrada.

No obstante, si se toma la misma T_{sa} como temperatura de referencia de entalpía y se considera que el agua ingresa a $T_w = T_{sa}$, se obtiene que $H_w = 0$. Así, el balance general se reduce a $H_a = H_{sa}$, o bien:

$$h_a = h_{sa} - \frac{(C_{pa} + C_{pv} h_a)}{L_{wsa}} (T_a - T_{sa}) \quad (3.21)$$

representando la primera versión de la ecuación h_a vs T_a buscada para la línea de saturación adiabática. Sin embargo, dado que h_a aparece en ambos miembros, la resolución de la

ecuación debe expresarse en la forma siguiente:

$$h_a = \frac{h_{sa} - \frac{C_{pa}}{L_{wsa}} (T_a - T_{sa})}{1 + \frac{C_{pv}}{L_{wsa}} (T_a - T_{sa})} \quad (3.22)$$

El valor L_{wsa} es el calor de vaporización a T_{sa} y, por tanto, no varía a lo largo de cada una de estas líneas. La ecuación no es estrictamente una recta por la no constancia del término $(C_{pv}/L_{wsa})(T_a - T_{sa})$ en el denominador; pero como éste es muy pequeño frente a 1 (varía entre 4×10^{-4} a 8×10^{-3} en condiciones ambientes y puede valer hasta 4×10^{-2} en condiciones de secado con aire caliente) la relación hallada (ec. (3.22)) es esencialmente lineal. Si se ignora el término indicado, la ecuación podría reordenarse para obtener la típica expresión de saturación adiabática (Green y Maloney, 1984).

$$h_{sa} - h_a = \frac{C_{pa}}{L_{wsa}} (T_a - T_{sa}) \quad (3.23)$$

Esta ecuación tiene un interés particular por su semejanza con la ecuación de la "temperatura de bulbo húmedo" (sección 3.1.8), que se utiliza para determinar la humedad relativa del aire. Sin embargo a efectos de trazar las líneas de saturación adiabática se prefiere la forma previa (ec. (3.22)) con denominador variable. Debe indicarse que h_{sa} es una humedad de saturación a T_{sa} y como tal se la calcula de acuerdo a la ecuación (3.1) que, escrita para T_{sa} , toma la notación particular:

$$h_{sa} = 0.621 \frac{p_{sa}}{p - p_{sa}} \quad (3.24)$$

donde p_{sa} es la presión de saturación líquido-vapor del agua a T_{sa} .

Para graficar entonces la familia de curvas de de temperatura de saturación adiabática constante, se utilizará la ec. (3.22) de acuerdo al diagrama de bloques de la Figura 3.6:

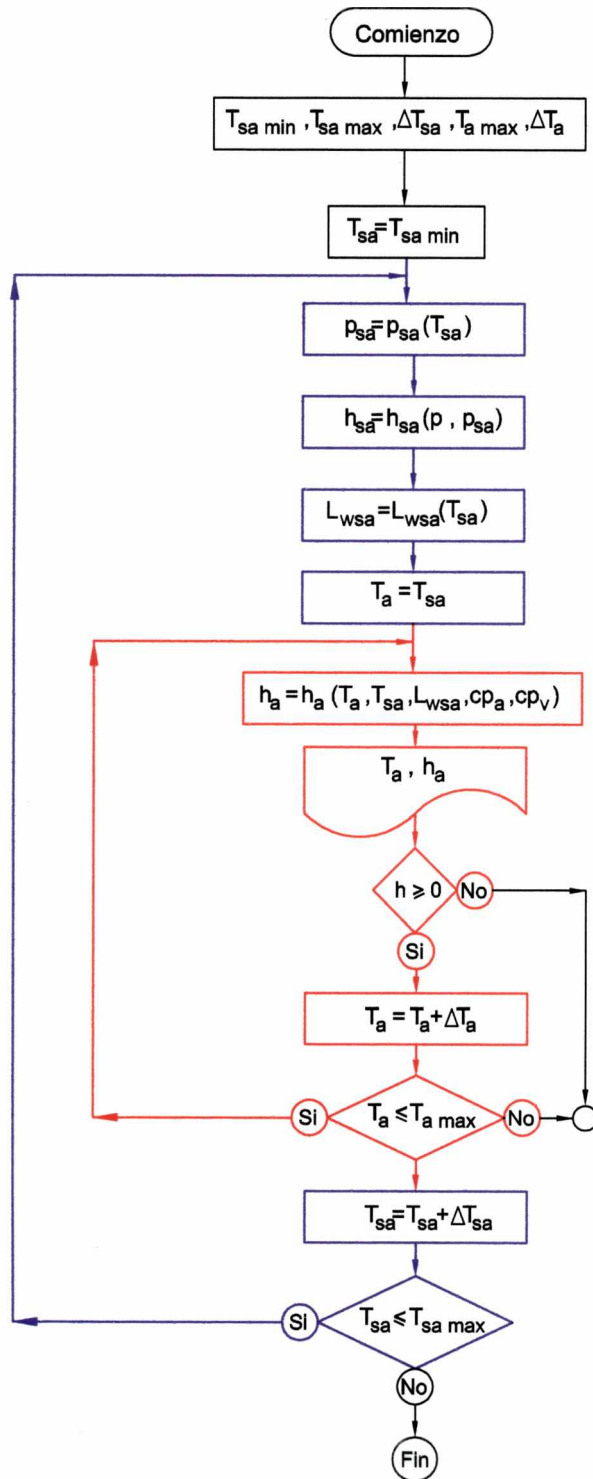


Figura 3.6. Diagrama de bloques para cálculo de familia de curvas h_a vs T_a a T_{sa} constante.

En la Figura 3.7 se grafican los resultados de este proceso de cálculo y se observa la familia de líneas h_a en función de T_a , cada una de ellas a un valor constante de T_{sa}

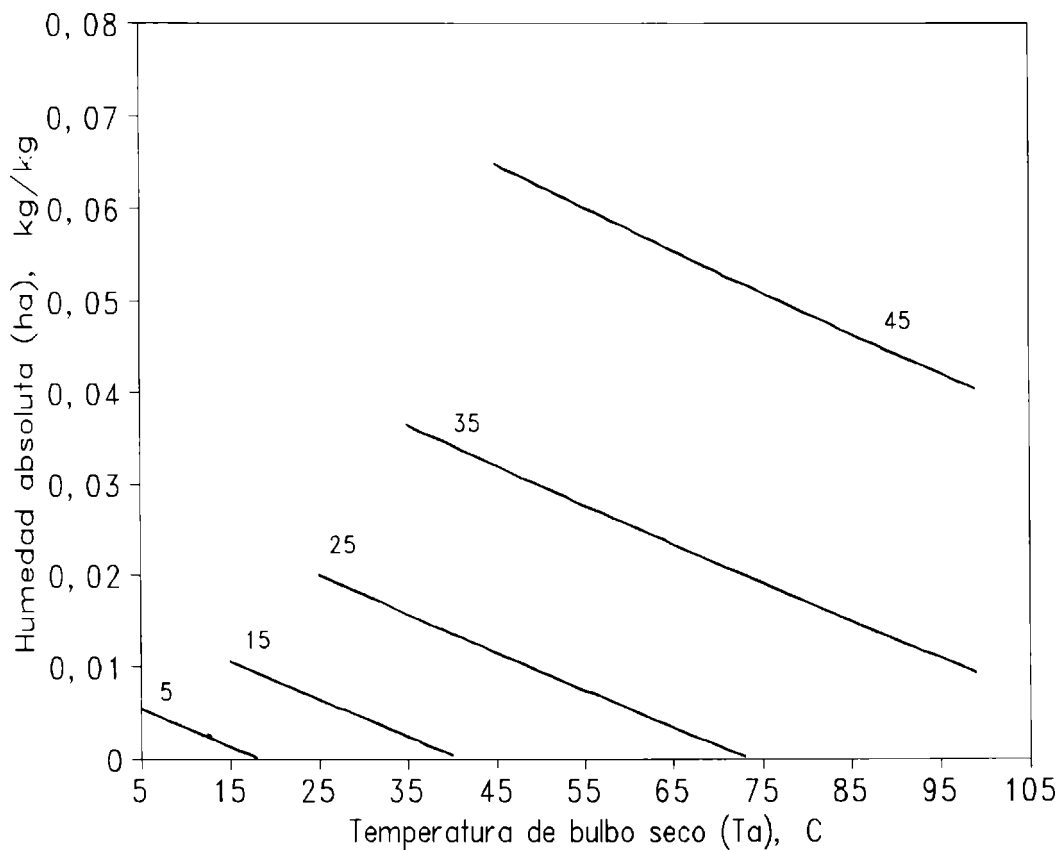


Figura 3.7. Familia de curvas de T_{sa} constante, parte constitutiva de los diagramas psicrométricos.

3.1.5.1. Relación entre las curvas de T_{sa} constante y la evaporación de agua.

La Figura 3.7 permite "seguir" la evolución de un aire en una condición idealizada de secado, tal como lo es la evaporación de una cantidad significativa de agua pura. Consideremos un aire de $T_a = 95^\circ\text{C}$ y $T_{sa} = 35^\circ\text{C}$ que, según el gráfico, contiene una h_a de aproximadamente 0,01 kg agua/kg aire seco. El aire evolucionará a lo largo de la línea

Secadoras continuas de trigo

de $T_{sa} = 35^{\circ}\text{C}$ hacia la izquierda del gráfico, enfriándose al ceder calor sensible que es tomado como calor latente por el agua que se evapora. Ese vapor pasa al aire, elevando su humedad absoluta.

Al no existir acumulación de calor en la fase agua, el calor cedido por el aire es recuperado en términos energéticos por el vapor que acarrea en su paso. Por tal razón la línea de T_{sa} constante es también una línea isoentálpica, como ya se había demostrado matemáticamente.

Obsérvese que la evolución del aire de derecha a izquierda de la Figura 3.7 termina para $T_a = T_{sa}$, donde la $h_r = 1$, condición de saturación.

3.1.6 DIAGRAMA PSICROMETRICO BASICO

Superponiendo las figuras 3.4. (curvas a h_r constante) y la 3.7 (líneas de T_{sa} constante), se obtiene un diagrama psicrométrico básico en la Figura 3.8.

Puede verse aquí que la coincidencia de las líneas diagonales de T_{sa} constante con líneas de entalpía constante de aire húmedo permitiría establecer una escala de entalpías, perpendicular a estas líneas. En los diagramas completos tipo Carrier (Heldman y Singh, 1981), esta escala se ubica por encima de la línea de $h_r = 1$.

3.1.6.1. Diagrama psicrométrico y eficiencias de secado

Con el diagrama desarrollado (Figura 3.8), resulta interesante analizar una situación ideal de secado con aire caliente, que comprende dos evoluciones básicas (1) el calentamiento previo del aire a h_a constante y (2), el secado. La parte (1) sería una línea horizontal hacia la derecha del gráfico, que puede partir de un punto a $h_a = 0,01$ y temperatura ambiente $T_a = 25^{\circ}\text{C}$, por donde pasaría una línea de h_r de 0,55 y una de T_{sa} de 19°C . El segundo punto podría ser $T_a = 50^{\circ}\text{C}$, por donde pasaría una línea de h_r igual a 0,2 y una línea de T_{sa} de 25°C . Incidentalmente, puede comprobarse que, aún a h_a constante, las variaciones de la temperatura de bulbo seco (T_a) producen variaciones de T_{sa} .

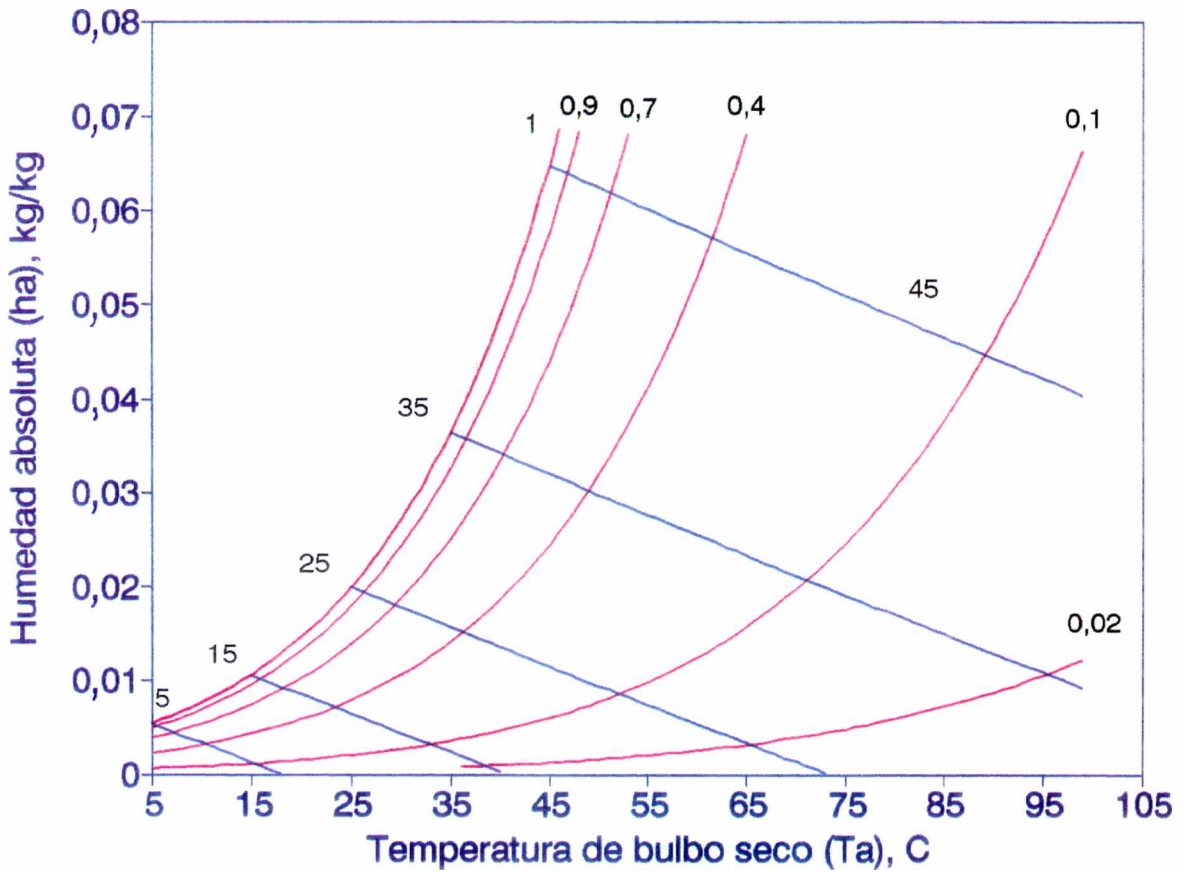


Figura 3.8. Diagrama psicrométrico básico tipo Carrier con curvas de saturación adiabática y humedad relativa constantes.

Si (2), la operación de secado, comenzara en el segundo punto y el aire evolucionase por la línea de $T_{sa} = 25^\circ\text{C}$ hasta una humedad relativa de, por ejemplo, 0,7, la corriente abandonaría el equipo con una h_a de 0,018 kg/kg y a una temperatura aproximada de bulbo seco de 30°C . En consecuencia, el aire se humidificaría casi al doble durante el secado y se enfriaría de 50 a 30°C .

Secadoras continuas de trigo

La evolución es estrictamente válida para evaporación de agua pura, no adsorbida en sólidos, pero es ilustrativa de una situación de secado en equipos, donde se prefiere que el aire abandone la cámara a h_r inferior a 1 (T_a de salida $> T_{sa}$, menor eficiencia térmica), para mantener una cierta fuerza impulsora que no haga muy lenta la operación.

3.1.7. MEDICION PSICROMETRICA DE LA HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE Y TEMPERATURA DE SATURACION ADIABATICA

Se ha observado que fijando una h_a y una T_a , se encontrará la h_r correspondiente, pero h_a no es una magnitud que pueda medirse directamente y su variable asociada, la presión parcial del vapor en el aire p_v , es muy baja y de difícil medición. En consecuencia, para calcular la humedad relativa del aire se suelen medir dos temperaturas: una es T_a , temperatura de bulbo seco, y la otra podría ser T_{sa} , pero su medición es complicada, requeriría una cámara muy grande, saturar aire y utilizar un eliminador de niebla.

Por esta razón, se mide otra propiedad psicrométrica, la "temperatura de bulbo húmedo" (T_{bh}). Es conocido que T_{bh} y T_{sa} son muy similares en aire húmedo (Green y Maloney, 1984), a tal punto que en la gran mayoría de los casos se las utiliza indiferenciadamente; pero ambas representan conceptos diferentes que puede ser útil remarcar.

3.1.8. MEDICION PSICROMETRICA DE LA HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE Y TEMPERATURA DE BULBO HUMEDO

En la Figura 3.9 se observa un termómetro con su bulbo rodeado por una película de agua. Esta se puede mantener por medio de una tela humedecida cuyo extremo esté en

contacto con un reservorio de agua. El termómetro está expuesto a una corriente de aire no saturado en régimen turbulento, de caudal \dot{m}_a y temperatura de bulbo seco T_a , siendo su contenido de humedad h_a (presión parcial de vapor p_{va}).

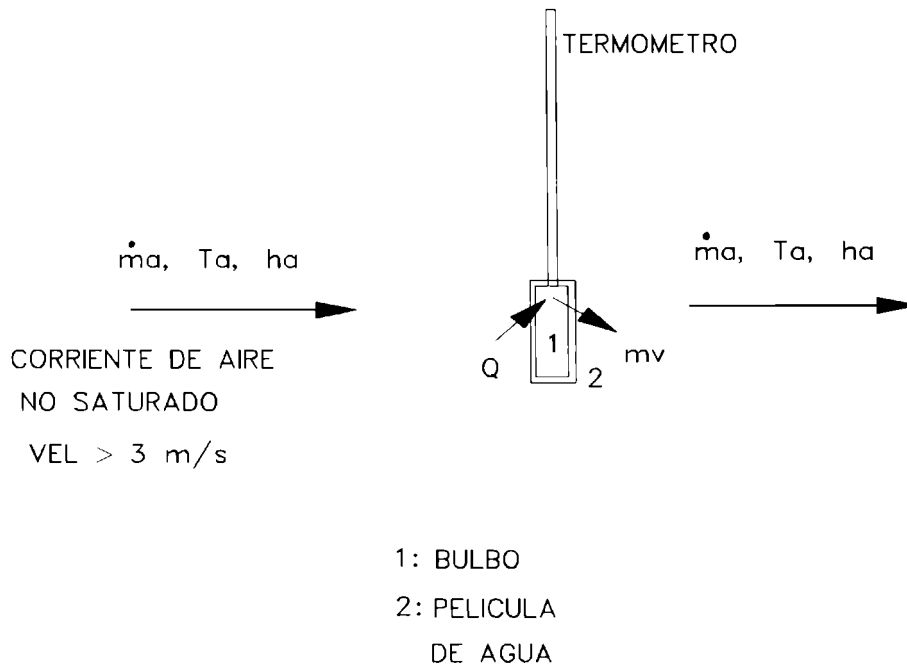


Figura 3.9. Esquema de un termómetro húmedo colocado en una corriente de aire en régimen turbulento.

Se necesitan caudales de aire elevados por dos causas:

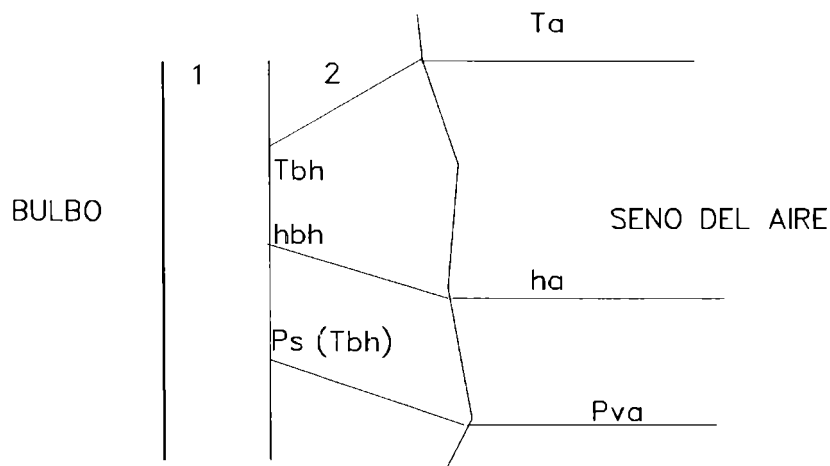
- (i) la medición requiere régimen turbulento ($V > 3 \text{ m/s}$) para minimizar el espesor de película de aire estanca alrededor del bulbo (Wiederhold, 1995).
- (ii) el estudio del fenómeno de bulbo húmedo requiere que las condiciones del aire no se modifiquen al pasar por el bulbo en evaporación.

Secadoras continuas de trigo

Si se supone que el agua del termómetro está inicialmente a $T_w = T_a$, el aire no podrá suministrar calor al agua; sin embargo, existe una fuerza impulsora positiva de presiones de vapor entre el termómetro mojado y el aire, que debe satisfacerse. Así, el termómetro experimentará un enfriamiento gradual convirtiendo calor sensible, surgido de su energía interna, en calor latente de vaporización (Beroqui, 1981). Este enfriamiento produce ahora una fuerza impulsora térmica positiva del aire al bulbo ($T_a > T_w$), de manera que el aire comienza a transferir calor al termómetro, pero no todavía en la medida necesaria, por lo que la temperatura del bulbo sigue decreciendo.

La tendencia continua hasta que T_w se estabiliza en un valor conocido como Temperatura de bulbo húmedo ($T_w = T_{bh}$), donde la transferencia de calor alcanza ahora la velocidad necesaria para evaporar el agua al ritmo impuesto por la fuerza impulsora de materia ($p_{sbh} - p_{va}$). Así, se llega a un estado de no-equilibrio estacionario.

Los perfiles estabilizados de temperatura, presión de vapor y humedad absoluta a través de la película de aire estanca, se indican cualitativamente en la Figura 3.10.



- 1: Película de agua
- 2: Película de aire estanco

Figura 3.10. Interfase agua-aire en el termómetro de bulbo húmedo. Nota $p_s(T_{bh}) \equiv p_{sbh}$.

3.1.8.1. Situaciones de no equilibrio estacionario y equilibrio dinámico.

Se considera importante remarcar que la temperatura de bulbo húmedo tiene lugar en un estado de no-equilibrio estacionario (Beroqui, 1981) en vista de que existe literatura, incluso reciente, donde se la denomina como un valor de "equilibrio dinámico".

La definición de equilibrio dinámico es más apropiada para un fenómeno en un sistema cerrado, tal como el de la curva de saturación líquido-vapor, que para un caso de sistema abierto circulante como el de bulbo húmedo. En la curva líquido-vapor, como es conocido, se establece un equilibrio a una temperatura dada entre el número de moléculas que abandona la fase líquida y el que regresa a ella; si se eleva la temperatura, habrá, al principio, más moléculas abandonando la fase líquida que volviendo a ella, pero finalmente se igualarán, ahora en un nivel más alto de flujo molecular. En evaporación en corriente de aire, sin embargo, se supone que cada molécula de agua que pasa a la fase vapor es acarreada por una corriente de aire hacia el exterior del sistema; si la fuerza impulsora se mantiene en el tiempo, se tendrá entonces una situación estacionaria de no-equilibrio y no de equilibrio dinámico.

3.1.8.2. Relación entre la humedad del aire y la temperatura de bulbo húmedo

El fenómeno de bulbo húmedo establece una vinculación directa entre la velocidad de transferencia de calor por convección, \dot{Q} , y la velocidad de evaporación de agua, \dot{m}_v .

Expresando $\dot{m}_v = \dot{Q}/L_{wbh}$ (L_{wbh} es el calor latente evaluado a T_{bh}) en términos de las expresiones de velocidad de transferencia en interfases, se tiene:

$$\dot{m}_v = k_p A (P_{sbh} - P_{va}) = \frac{h_T}{L_{wbh}} A (T_a - T_{bh}) \quad (3.25)$$

donde h_T es el coeficiente de transferencia aire-termómetro y k_p el de transferencia de materia basado en fuerza impulsora en unidades de presión.

Secadoras continuas de trigo

La ecuación (3.25) puede ser modificada en base a la relación entre presión de vapor y humedad absoluta $p_v = h p / (0,621 + h)$, válida para la humedad real del aire (h_a), como para la humedad de saturación a T_{bh} (h_{bh}). Si se asumen condiciones moderadas donde $M_v/M_a = 0,621$ es mucho mayor que h (que usualmente varía de 0,01 a 0,03 kg/kg), pueden justificarse las aproximaciones $p_v = h_a p/0,621$ y $p_s = h_{bh} p/0,621$. Reemplazando éstas en la ec. (3.25), queda definido un coeficiente de transferencia de materia $k_h = k_p p_a/0,621$, basado en fuerza impulsora en unidades de humedad absoluta. Obsérvese que se usó p_a , presión parcial de aire seco y no p , presión total, para ser consistente con la expresión $M_v/M_a \gg h$. En consecuencia, la expresión de la temperatura de bulbo húmedo puede escribirse:

$$k_h (h_{bh} - h_a) = \frac{h_T}{L_{wbh}} (T_a - T_{bh}) \quad (3.26)$$

y reordenarse en la forma conocida, dada por Green y Maloney (1984).

$$h_{bh} - h_a = \frac{h_T}{L_{wbh} k_h} (T_a - T_{bh}) \quad (3.27)$$

Deducción alternativa de k_h

Se ha visto que para definir k_h , se asumió a la pequeña cantidad de vapor h despreciable frente al cociente M_v/M_a . Siguiendo esta suposición, vale $h_a = C_v/\rho_a$ donde C_v , concentración de vapor, viene dado en kg vapor/m³ aire seco, siendo ρ_a la densidad de aire seco (kg aire seco/m³ aire seco). Surge entonces que $k_h = \rho_a k_c$, donde k_c el coeficiente de transferencia de materia basado en fuerza impulsora en unidades de C_v . Si, por la ley de los gases ideales, $k_c = k_p R T/M_v$ (para flujo de masa) y ρ_a se expresa como $p_a M_a/RT$, resulta $k_h = k_p p_a/(M_v/M_a)$, igual a la obtenida en la ec. (3.27).

3.1.8.3. Semejanza entre la ecuación de bulbo húmedo y de saturación adiabática

Dado que las ecuaciones (3.23) para T_{sa} y la (3.27) para T_{bh} son muy similares, las mismas se repetirán juntas aquí:

$$h_{sa} - h_a = \frac{C_{pa}}{L_{wsa}} (T_a - T_{sa})$$

$$h_{bh} - h_a = \frac{h_T}{L_{wbh} k_h} (T_a - T_{bh})$$

Puede observarse que el calor específico del aire seco C_{pa} ocupa en la ecuación de T_{sa} la misma posición que h_T/k_h tiene en la expresión de T_{bh} . En consecuencia, para que T_{bh} sea similar a T_{sa} , el cociente h_T/k_h debería ser aproximadamente igual a $C_{pa} = 1008 \text{ J}/(\text{kg}^\circ\text{C})$.

A pesar de las similitudes que pudiera haber entre T_{sa} y T_{bh} debe recordarse que la saturación adiabática es una forma idealizada del secado en equipos, donde el aire se enfría y se humidifica significativamente, mientras que el fenómeno de bulbo húmedo constituye una forma ideal del secado de una partícula en una gran corriente de aire, donde los cambios se limitan sólo a la partícula. Además, el método del bulbo húmedo constituye la forma más difundida y económica de determinar la humedad del aire.

Debe destacarse, asimismo, que en virtud de que la temperatura y humedad del aire no experimentan cambios al pasar por el bulbo húmedo, no es adecuada la definición de algunas publicaciones de "línea de temperatura de bulbo húmedo constante" como representativa de evoluciones de saturación adiabática del aire, donde el aire se modifica.

Secadoras continuas de trigo

3.1.8.4. Evaluación de la relación de coeficientes de transferencia h_T/k_h para la ecuación de bulbo húmedo

Las expresiones generalizadas para el factor de Colburn en transferencia de calor (J_H) y materia (J_M) son (Treybal, 1980):

$$\begin{aligned} J_H &= Nu Re^{-1} Pr^{-1/3} \\ J_M &= Sh Re^{-1} Sc^{-1/3} \end{aligned} \quad (3.28)$$

siendo el $Re = G_a D_p / \mu$, el Número de Reynolds para objetos sumergidos. Nu es el número de Nusselt, o coeficiente de transferencia de calor adimensional $Nu = h_T D_p / k_{Ta}$, mientras que $Pr = \nu / \alpha = (\mu / \rho) / (k_{Ta} / \rho C_p) = \mu C_p / k_{Ta}$ es el número de Prandtl, relación entre las difusividades de cantidad de movimiento y térmica. Por su parte, $Sh = k_c D_p / D_{AB}$ es el número de Sherwood o coeficiente de transferencia de materia adimensional, siendo $Sc = \nu / D_{AB}$ el número de Schmidt, o cociente de las difusividades de cantidad de movimiento y materia.

Reemplazando las definiciones de los números adimensionales en la ec. (3.28), se obtiene:

$$\begin{aligned} J_H &= \frac{h_T}{C_p G} Pr^{2/3} \\ J_M &= k_c \frac{\rho_a}{G} Sc^{2/3} \end{aligned} \quad (3.29)$$

donde, si se asume la analogía de Chilton-Colburn (Treybal, 1980) por la cual $J_M = J_H$, se obtiene: $h_T / (k_c \rho_a) = C_{pa} (Sc/Pr)^{2/3}$. Pero, en vista de que $k_h = k_c \rho_a$, el cociente de coeficientes de transferencia h_T/k_h puede plantearse directamente como:

$$\frac{h_T}{k_h} = C_{pa} \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{2/3} \quad (3.30)$$

donde $Sc/Pr \equiv \alpha/D_{AB}$ es el número de Lewis (Treybal, 1980).

Si se toma un $Pr = 0,72$, prácticamente constante en un rango de temperaturas y $C_{pad} = 1008 \text{ J/(kg K)}$, se obtiene:

$$\frac{h_T}{k_h} = 1255 Sc^{2/3} \quad (3.31)$$

La literatura muestra una correlación específica para termómetros de bulbo húmedo, medida por Bedingfield y Drew en 1950 (Green y Maloney, 1984):

$$\frac{h_T}{k_h} = 1231 Sc^{0,56} \quad (3.32)$$

que es similar a la ec. (3.31) pero más específica, pudiendo compensar empíricamente los errores que surgen de la suposición $M_v/M_a \gg h$ asumida para la definición de k_h . En una revisión más reciente para el fenómeno de bulbo húmedo citada por Treybal (1980), se muestra una correlación prácticamente coincidente con la ec. (3.32).

Un valor típico del Sc en condiciones ambientes es 0,61, de manera que el uso de la ec. (3.31) daría $h_T/k_h = 1255 Sc^{2/3} = 903$ que, siendo C_{pa} apenas superior a 1000, muestra que las pendientes de las ecuaciones de saturación adiabática (ec. (3.23)) y bulbo húmedo (ec. (3.27)) diferirían en un 10% aproximadamente. La aplicación de la correlación específica de Bedingfield y Drew (ec. (3.32)) daría $h_T/k_h = 1231 Sc^{0,56} = 933$, reduciendo la diferencia de pendientes al 7%.

Secadoras continuas de trigo

3.1.8.5. Comparación de los valores de la temperatura de saturación adiabática y de bulbo húmedo para el sistema aire seco - vapor de agua.

Dado que la medición de T_a y T_{bh} es, en sí misma, conceptualmente válida para determinar la humedad absoluta del aire (h_a) por medio de la ec. (3.25), la suposición implícita que se hace habitualmente en el sistema aire vapor de agua: $h_T/k_h \approx C_{pa}$ no es realmente necesaria.

De todos modos, resulta interesante ver como se trasladan esas diferencias del 7 al 10% entre h_T/k_h y C_{pa} a las discrepancias entre los valores de T_{bh} y T_{sa} .

Con este fin, la Tabla 3.2 muestra casos donde, a partir de valores de T_a y T_{bh} se realiza el cálculo directo de h_a con la ecuación de bulbo húmedo (ec. (3.27)), usando el cociente h_T/k_h dado por la correlación ec. (3.32). El valor de h_a calculado junto al de T_a se utilizan luego como datos para resolver, esta vez iterativamente, la ecuación de saturación adiabática ec. (3.23) para T_{sa} .

TABLA 3.2. Comparación de valores de T_{bh} y T_{sa} para aire húmedo a distintas condiciones

T_a °C	T_{bh} °C	h_a kg/kg	h_r decimal	T_{sa} °C
25	16	0,0081	0,408	16,4
25	20	0,0129	0,649	20,2
50	25	0,0108	0,139	25,7
50	40	0,0450	0,550	40,2
70	35	0,0234	0,120	35,8
70	50	0,0785	0,369	50,4
90	33	0,0111	0,025	34,2
90	70	0,2682	0,436	70,3

Puede verse que las diferencias entre T_{bh} y T_{sa} son pequeñas cuando ambas no son mucho menores a T_a , esto es cuando las h_r son moderadas o elevadas. Cuando h_r es baja, las

diferencias de T_{bh} y T_{sa} se amplían, pudiendo superar 1°C , indicando que en esos casos ya no se justificaría considerar $T_{bh} \approx T_{sa}$. Por otra parte, obsérvese que T_{sa} es siempre mayor a T_{bh} .

La semejanza numérica entre T_{bh} y T_{sa} ocurre sólo en el sistema aire-vapor de agua donde el número de Lewis es cercano a 1, lo que hace que h_T/k_h sea comparable al C_{pa} (ver ecuación (3.30)). Un valor del Le cercano a 1 indica que las difusividades térmicas y de materia son comparables. Esto no ocurre en mezclas psicrométricas distintas a la aire-vapor de agua, donde T_{bh} y T_{sa} difieren apreciablemente.

No obstante lo visto en la Tabla 3.2., se considera que aún en el sistema aire-vapor de agua, T_{bh} y T_{sa} deben diferenciarse, lo cual se demuestra a continuación.

3.1.8.6. Importancia de diferenciar las temperaturas de bulbo húmedo y saturación adiabática en el cálculo de la humedad relativa

Si bien se mostró en la Tabla 3.2 que un uso consistente de las ecuaciones de bulbo húmedo y saturación adiabática conducen a diferencias entre T_{bh} y T_{sa} de $0,2$ a $1,2^\circ\text{C}$, que no parecen muy importantes, éstas resultan ser sin embargo lo suficientemente grandes como para causar errores significativos en el cálculo de la h_r , si los conceptos de T_{bh} y T_{sa} se utilizaran indiferenciadamente. Supóngase que se mide T_a y T_{bh} como es habitual, ya que T_{sa} no se mide normalmente; se ha visto que la humedad absoluta (h_a) debe calcularse de la ecuación de bulbo húmedo (ec. (3.27)) para luego calcular p_v y posteriormente $h_r = p_v/p_s(T_a)$. Pero se verá que sucede si se asume automáticamente que $T_{sa} \approx T_{bh}$ y se calcula h_a con la ecuación de saturación adiabática (ec. (3.22)), para luego calcular h_r . La Tabla 3.3. muestra 9 casos en condiciones ambientes más un caso en aire caliente:

Secadoras continuas de trigo

Tabla 3.3. Valores de h_r calculados a partir de datos de temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo, sin asumir y asumiendo $T_{sa} \approx T_{bh}$.

T_a °C	T_{bh} °C	h_r decimal	
		Método correcto, basado en la ecuación de T_{bh} (ec. (3.27))	Método incorrecto, basado en la ecuación de T_{sa} (ec. (3.22))
15	8	0,391	0,363
15	12	0,721	0,709
15	14	0,904	0,900
20	10	0,277	0,248
20	15	0,606	0,591
20	19	0,915	0,912
30	15	0,196	0,173
30	22	0,516	0,502
30	28	0,865	0,861
70	30	0,063	0,055

y puede verse que utilizar la T_{bh} en la ecuación de T_{sa} puede llevar a subestimar la humedad relativa con errores absolutos de hasta 3% (en unidades de %h_r). Las diferencias se acentúan en condiciones de aire ambiente seco y se vuelven más importantes, en términos proporcionales, en aire caliente y seco. En el caso de aire a 70°C el error relativo porcentual entre los dos casos es del 12,6%. Se considera entonces que, aún en el caso del sistema aire-vapor de agua, conviene tener en cuenta ya no sólo formalmente, sino también numéricamente, que T_{bh} y T_{sa} son diferentes. Los cálculos de secado de alimentos presentan numerosas fuentes de error debidas a suposiciones en los modelos, formas irregulares, variabilidad biológica, etc., y no resulta conveniente acarrear más errores que los necesarios.

3.1.9. TEMPERATURA DE ROCÍO (T_R).

La temperatura de rocío es una propiedad psicrométrica fundamental para la medición de la humedad relativa. Para ejemplificar su definición, se tomará un punto del diagrama psicrométrico básico (Figura 3.8), por ejemplo, temperatura de bulbo seco, $T_a = 25^\circ\text{C}$ y $h_a = 0,01 \text{ kg/kg}$, que determina una h_r de 0,55-0,60; se supondrá un enfriamiento a h_a constante: la condición del aire se moverá horizontalmente hacia la izquierda por la línea de $h_a = 0,01$. A la inversa del caso de calentamiento, aquí h_r crecerá por reducción de p_s o acercamiento relativo a la condición de saturación. La temperatura alcanzada en esta trayectoria para $h_r = 1$ se denomina *temperatura de rocío* o *punto de rocío* (T_R) y resulta, para $h_a = 0,01$, de unos 15°C .

Podrá verse inmediatamente que, a presión total constante, p , todo aire con $h_a = 0,01$ tendrá la misma temperatura de rocío de 15°C , independientemente de la temperatura de bulbo seco (T_a) a la que se halle (siempre será $T_a \geq T_R$). Surge entonces que T_R está vinculado sólo a h_a o la presión parcial del vapor, p_{va} y no a la temperatura de bulbo seco. Esto la diferencia de las temperaturas de bulbo húmedo y saturación adiabática vistas antes, que aún a humedad absoluta constante dependen de la temperatura de bulbo seco, T_a .

3.1.9.1. Utilización del concepto de punto de rocío en la determinación y control de humedad relativa.

Las propiedades del punto de rocío determinan que la (buena) medición de T_R sea un mejor método para determinar el contenido de vapor del aire. Dado que en T_R se tiene $h_r = 1$, entonces $p_{va} = p_s(T_R)$. Conociendo la temperatura de bulbo seco T_a además de la T_R , se puede calcular la h_r a cualquier T_a .

$$h_r = \frac{P_v}{P_s(T_a)} = \frac{P_s(T_R)}{P_s(T_a)} \quad (3.33)$$

La temperatura de rocío es muy importante en control de condiciones de corrientes de aire. Si se desea mantener constante T_a y h_r y se controlan directamente ambas variables con sendos lazos de control, éstos interfieren mutuamente al tomar acciones correctivas pues h_r depende de T_a .

Sin embargo, al controlarse h_r fijando la temperatura de rocío, los lazos de control de T_a y T_R resultarán independientes: el primero se ocupa de controlar la temperatura de bulbo seco y el otro, del contenido de vapor (Bruce, 1991).

3.1.10. PROGRAMA DE CALCULOS PSICROMETRICOS: CURVAS DEL DIAGRAMA Y CALCULO DE VARIABLES EN UNA CONDICION DADA

Con la información reunida en este capítulo, se ha desarrollado un programa FORTRAN 77 modularizado que realiza dos tareas alternativas: (1) "Generar" las familias de curvas de humedad relativa constante y de saturación adiabática, guardando los resultados en sendos archivos ASCII para, por medio de su posterior graficación superpuesta, dar lugar a diagramas psicrométricos básicos como el de la Figura 3.8. (2) Calcular las variables psicrométricas del aire en un estado dado, definido por la entrada de dos valores independientes, uno de ellos fijado como la temperatura de bulbo seco (T_d) y el otro a elección entre cinco posibles, a efectos de calcular los cuatro restantes. Esto otorga flexibilidad de uso y evita los errores de lectura de los diagramas psicrométricos.

Se describe a continuación la estructura del programa:

1) Programa principal VAPAIR

Este módulo lee una clave numérica para elegir una de las dos alternativas de funcionamiento del programa: modo (1) "Generación" de curvas, donde llama a la subrutina DIAGSICR o modo (2) Cálculo de Variables, llamando a las subrutina VARSICR.

Operación en modo 1

- Subrutina DIAGSICR

Esta subrutina llama primero a la subrutina TSATAD que calcula la familia de curvas de temperatura de saturación adiabática y luego a la subrutina HUMRE, que predice la familia de curvas de humedad relativa constante.

Operación en modo 2

- Subrutina VARSICR

Esta subrutina llama a la subrutina DATSICR, que solicita la entrada de la temperatura de bulbo seco y otra variable psicrométrica a elegir entre (a) humedad relativa (b) temperatura de bulbo húmedo (c) temperatura de saturación adiabática (d) temperatura de rocío (e) humedad absoluta. El parámetro alternativo debe ingresarse con su identificación alfanumérica seguido de su valor numérico.

Luego de este paso, el control vuelve a VARSICR que identifica la variable alternativa ingresada para luego calcular, por el método que esta variable alternativa defina, la humedad absoluta y la presión parcial de vapor y posteriormente las variables restantes de la lista (a)-(e).

Si T_{sa} , T_{bh} o T_R no son datos, las mismas no pueden despejarse analíticamente por estar incluidas en la ecuación de presión de vapor de Kiefer (ec. (3.8)) (Weast, 1975; Zuritz y Singh, 1982), sino en forma numérica. Esto requiere utilizar la subrutina SOLNUME.

Secadoras continuas de trigo

-Subrutina SOLNUME

Este módulo del programa presenta una programación particular que utiliza el método del punto medio para resolver ecuaciones no lineales. Esto es así pues la subrutina debe reconocer la variable a calcular, sea temperatura de saturación adiabática, de bulbo húmedo o de rocío, en base a una cadena de caracteres enviada por la subrutina VARSICR. Una vez reconocida la variable, esta subrutina identifica la función a resolver y procede con el método del punto medio hasta una cota de error menor a $0,01^{\circ}\text{C}$.

-Funciones FUNTSA, FUNTBH, FUNTROC

Los nombres indicados representan las funciones $F(T_{sa}) = 0$, $F(T_{bh}) = 0$, $F(T_R) = 0$, respectivamente, que son llamadas cuando es necesario por la subrutina SOLNUME. La función FUNTBH llama a TRANSRA para el cálculo del cociente de coeficientes de transferencia.

-Función TRANSRA

Esta función calcula el cociente de coeficientes de transferencia h_T/k_h de la ecuación de temperatura de bulbo húmedo (ec. (3.27)) por medio de las correlaciones vistas en este capítulo (ec. (3.30) o ec. (3.32)). Con este fin, calcula previamente, a la temperatura de bulbo seco ingresada, propiedades del aire como viscosidad, conductividad térmica, densidad, difusividad binaria aire seco-vapor de agua y los números de Pr y Sc.

-Funciones HSAT, ELEW y PSAT

Estas funciones son llamadas desde distintos puntos del programa y dan la humedad absoluta de saturación, el calor de vaporización del agua a la temperatura indicada, y la presión de saturación líquido-vapor, respectivamente.

3.1.10.1. Comparación de "VAPAIR" con un programa previo "PSYCHR"

El programa desarrollado VAPAIR (1) se comparó en una condición de $T_a = 79,4 \text{ }^\circ\text{C}$ y $h_a = 0,0072 \text{ kg/kg}$ con resultados del programa PSYCHR (2) (Ratti, 1991), obteniéndose, los siguientes resultados: T_{bh} , (1) $29,24^\circ\text{C}$, (2) $30,36^\circ\text{C}$; T_{sa} , (1): $30,36^\circ\text{C}$, (2) n.d., T_R , (1) $9,09^\circ\text{C}$, (2) $9,09^\circ\text{C}$; h_r , (1) $0,025$ (2) $0,025$. La coincidencia es satisfactoria.

La Figura 3.11 muestra la estructura modular que contiene el programa VAPAIR. El programa FORTRAN 77 siguió un diseño descendente ("Top-Down") y cada módulo se programó siguiendo, en lo posible, las reglas de la programación estructurada (López Román, 1995).

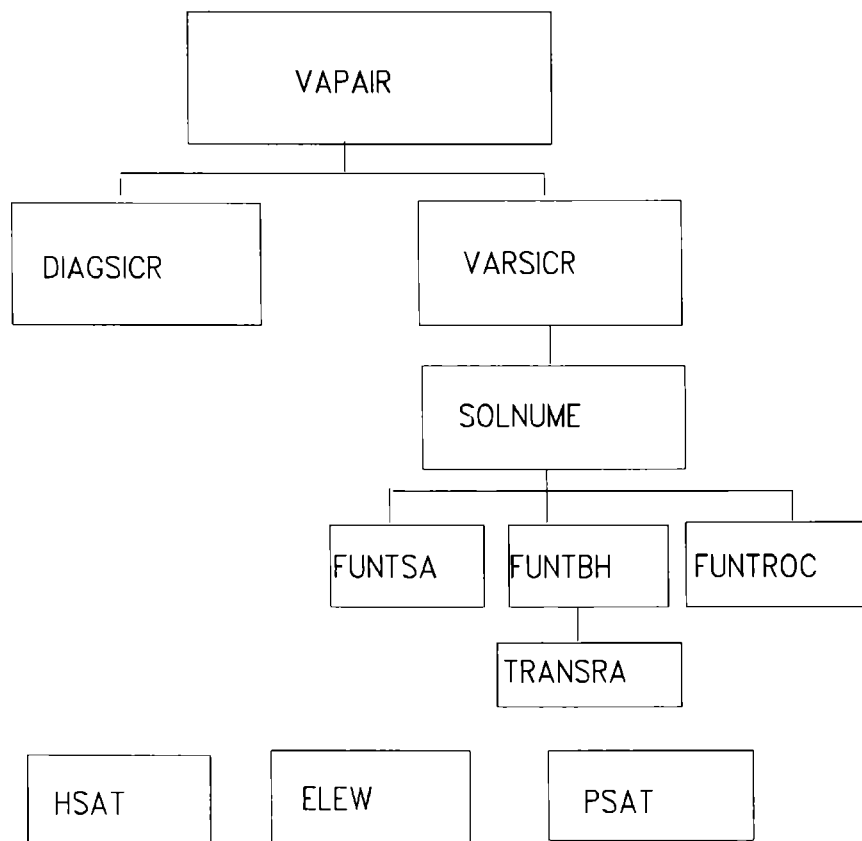


Figura 3.11. Estructura modular del programa de cálculos psicrométricos VAPAIR.

Secadoras continuas de trigo

3.2. EVAPORACION DE AGUA

Se considerará la evaporación de agua desde una superficie libre, sobre la cual pasa una corriente de aire de alto caudal másico G_a , temperatura de bulbo seco T_a y humedad relativa h_r . Se enfatiza que el caudal del aire es alto relativo a la superficie del espejo, a los efectos de asumir que T_a y h_r no variarán en su paso sobre la misma.

Si la corriente de aire que circula por encima de la superficie de agua no está saturado, es decir, si $h_r < 1$, entonces el fenómeno es enteramente análogo al de la evaporación de agua desde el termómetro de bulbo húmedo, estribando las diferencias en el coeficiente de transferencia particular de calor o materia debido a la geometría del espejo de agua en evaporación y a la dirección del aire respecto del espejo.

Una vez que la superficie del agua estabiliza su temperatura en el valor de T_{bh} , se tiene un estado de no equilibrio estacionario, como se destacó previamente. Sin embargo, a diferencia del caso del termómetro húmedo, el objetivo de esta parte es la evaluación de la velocidad de evaporación (\dot{m}_v).

3.2.1. ECUACIONES DE VELOCIDAD DE TRANSFERENCIA DE MATERIA Y CALOR

Si la evaluación de \dot{m}_v se realiza por la ecuación de transferencia de materia, se tendrá:

$$\dot{m}_v = - \frac{dm_w}{dt} = k_p A_T (p_{sbh} - p_{va}) \quad (3.34)$$

donde p_s está evaluada a la temperatura de la superficie evaporativa, T_{bh} , siendo p_{va} la presión parcial del vapor en el seno del aire y A_T el área de transferencia. Obsérvese que $\dot{m}_v \equiv - dm_w/dt$: si se considera que el sistema termodinámico utilizado para este fenómeno es la fase aire, incluyendo la película estanca de coeficiente de transferencia k_p , la misma está

en una situación estacionaria, por lo que resulta conveniente expresar la velocidad de evaporación como \dot{m}_v (masa de vapor por unidad de tiempo). Sin embargo, en el sistema agua líquida, la inexistencia de reposición provoca una deacumulación de líquido que confiere sentido a la derivada $-dm_w/dt$. En cualquier caso, convendrá expresar la velocidad de evaporación por unidad de área de transferencia (G_w):

$$G_w = - \frac{1}{A_T} \frac{dm_w}{dt} = k_p (p_{sbh} - p_{va}) \quad (3.35)$$

Con respecto a la temperatura del pequeño espejo de agua en evaporación, la misma permanece constante a T_{bh} , debido a que el calor recibido desde el aire por convección se utiliza totalmente como calor latente:

$$h_T A_T (T_a - T_{bh}) - L_{wbh} \left(- \frac{dm_w}{dt} \right) = 0$$

o bien

$$h_T A_T (T_a - T_{bh}) - L_{wbh} k_p A_T (p_{sbh} - p_{va}) = 0 \quad (3.36)$$

que, en evaporación de agua pura, da lugar a una forma más sencilla de estimar G_w :

$$G_w = - \frac{1}{A_T} \frac{dm_w}{dt} = \frac{h_T (T_a - T_{bh})}{L_{wbh}} \quad (3.37)$$

por la mayor comodidad de usar temperaturas (ec. (3.37)) en lugar de presiones de vapor (ec. (3.35)). Más aún, el uso de fuerza impulsora de temperaturas disminuye los errores pues, al ser p_s función exponencial de T_{bh} , posibles errores en la medición de T_{bh} se amplifican al usar presiones.

3.2.2. CALCULO DEL TIEMPO DE EVAPORACION

El tiempo de evaporación de un pequeño espejo de agua, versión simplificada del tiempo de secado de una partícula sólida, se obtiene por integración directa de la ec. (3.37), para el caso común en que se conoce el área inicial de evaporación A_{T0} y la masa de agua a evaporar, m_{w0} . Esto conduce a la integración siguiente:

$$-\int_{m_{w0}}^0 dm_w = \frac{h_T A_{T0} (T_a - T_{bh})}{L_{wbh}} \int_0^{t_{ev}} dt \quad (3.38)$$

dando

$$t_{ev} = \frac{m_{w0} L_{wbh}}{h_T A_{T0} (T_a - T_{bh})} \quad (3.39)$$

Si la masa de agua a evaporar se expresa como $m_{w0} = \rho_w A_{T0} e_{w0}$, siendo e_{w0} el espesor inicial de la capa de agua, la ecuación del tiempo de evaporación (t_{ev}) resulta:

$$t_{ev} = \frac{\rho_w e_{w0} L_{wbh}}{h_T (T_a - T_{bh})} \quad (3.40)$$

donde se observa que t_{ev} es directamente proporcional al espesor inicial de la capa, decreciendo con el aumento de h_T (mayor velocidad del aire) y de la fuerza impulsora ($T_a - T_{bh}$) (menores humedades relativas). Esta diferencia de temperaturas es análoga, para evaporación de agua, a la fuerza impulsora ($p_{sbh} - p_v$).

Las ecuaciones de evaporación vistas aquí para espejo de agua pueden adaptarse rápidamente al secado de gotas, y se verá que la ec. (3.40) para t_{ev} es análoga a la de duración del período de velocidad constante de secado de sólidos.

3.3. EVAPORACION DE AGUA EN SOLIDOS DE ALTA HUMEDAD

3.3.1. DEFINICION DE SECADO DE SOLIDOS

El secado de sólidos se define en Ingeniería Química como aquella operación donde un líquido (por ejemplo agua) impregnado en un sustrato sólido (ejemplos en alimentos: granos, frutas, hortalizas) se evapora en una corriente gaseosa de, generalmente, alta temperatura y baja humedad relativa (Treybal, 1980). Surge directamente que la centrifugación, siendo una extracción mecánica, no es considerada técnicamente una operación de secado.

En el caso de alimentos de alta humedad, como productos frutihortícolas, el agua puede extraerse por mecanismos diferentes del secado convencional. Uno de ellos es la liofilización, que involucra congelación del agua posterior sublimación del hielo y otro es la deshidratación osmótica (Spiazzi y Mascheroni, 1997), realizada contactando el alimento fresco con soluciones de baja actividad acuosa de azúcares y/o sales.

El secado de sólidos puede ser visto como una operación de potenciales o fuerzas impulsoras y resistencias. En transferencia de materia, la fuerza impulsora verdadera es la diferencia de potenciales químicos del agua entre las fases sólido y aire que se traduce en una diferencia de actividades de agua (a_w). Para aire húmedo, la a_w es más conocida como humedad relativa (h_r). Esta fuerza impulsora requeriría un coeficiente de transferencia por unidad de fuerza impulsora de a_w . Sin embargo, como se mostró previamente para la evaporación de un espejo de agua, se prefiere expresar el coeficiente de transferencia de materia en términos de una fuerza impulsora de presiones de vapor (Crapiste y Rotstein, 1997). Podrá verse que el flujo de agua dependerá de la fuerza impulsora, las características del sólido y la fluidodinámica; esta última determina el espesor del film de fluido estanco que rodea al sólido y por ende la resistencia que éste ejerce a la transferencia de materia. Se supone por el momento sólido isotérmico.

3.3.2. PERIODO DE VELOCIDAD DE SECADO CONSTANTE

Cuando el sólido posee alta humedad, o más precisamente, cuando su a_w es cercana a la unidad, una buena proporción del agua está débilmente ligada al sustrato sólidos y se comporta, esencialmente, como agua pura. Mientras la superficie del sólido mantenga una alta actividad acuosa, su presión de vapor será prácticamente igual a P_s . Si, además, la estructura del sólido no ejerce mayor resistencia al pasaje de agua, entonces se tendrá una situación donde el film externo controlará la velocidad de secado. La situación resulta similar, en consecuencia, a la del secado de un espejo de agua por lo que la temperatura de la superficie del sólido será aproximadamente igual a la de bulbo húmedo del aire que circula, siempre y cuando el caudal del mismo sea lo suficientemente elevado como para que sus condiciones no se alteren significativamente al pasar sobre el sólido. Como ejemplo, para el secado de una pieza de material higroscópico cuya geometría pudiera asimilarse a la de una placa plana infinita, la velocidad de transferencia de materia puede plantearse en forma similar a la de evaporación de un espejo de agua, o sea:

$$-\frac{dm_w}{dt} = k_p A_T (p_{vs} - p_{va}) = \frac{h_T A_T (T_a - T_{bh})}{L_{wbh}} \quad (3.41)$$

donde p_{vs} es la presión de vapor en la superficie del sólido. Por definición de actividad acuosa del sólido se tendrá que:

$$p_{vs} = a_{ws} p_s \quad (3.42)$$

donde a_{ws} es la actividad acuosa del sólido en la superficie y p_s la presión de saturación del agua pura evaluada a la temperatura de la superficie evaporativa. Sin embargo, como se supone que tal superficie se mantiene a T_{bh} , el agua que se evapora se comportaría prácticamente como agua pura, por lo que $a_{ws} \approx 1$, y $p_{vs} \approx p_{sbh}$. Entonces, la ecuación

vuelve a ser la misma que para evaporación de espejo de agua (ec. (3.34)).

En secado de sólidos es útil expresar el contenido de agua en base seca (W):

$$W = \frac{m_w}{m_s} \tag{3.43}$$

donde m_s es la masa seca del sólido, un valor constante. Así la ecuación de transferencia puede reescribirse:

$$- m_s \frac{dW}{dt} = k_p A_T (p_{sbh} - p_{va}) = \frac{h_T A_T (T_a - T_{bh})}{L_{wbh}} \tag{3.45}$$

donde, por geometría plana, $m_s = \rho_{s0} A_T d$, siendo "d" el semiespesor cuando la evaporación tiene lugar a través de las dos caras de la placa, o el espesor cuando evapora sólo por una de ellas; el valor de "d" se suele considerar constante durante este período de evaporación.

El símbolo ρ_{s0} representa la masa seca de la placa por unidad de volumen inicial

$\rho_{s0} = \rho_s / (1 + W_0)$, siendo ρ_s la densidad del sólido a humedad inicial base seca (W_0). Así, la velocidad de secado resulta:

$$- \frac{dW}{dt} = \frac{h_T (T_a - T_{bh})}{L_{wbh} \rho_{s0} d} \tag{3.46}$$

donde se tiene una dependencia inversa con el espesor o semiespesor de la placa.

Obsérvese que la velocidad de secado permanecerá constante siempre que se mantengan constantes las condiciones del aire (incluyendo velocidad), las condiciones de actividad acuosa prácticamente unitaria en la superficie del sólido (temperatura superficial del sólido igual a T_{bh}) y en tanto no haya contracción del espesor. Este es el denominado

Secadoras continuas de trigo

Período de Velocidad Constante de Secado (PVCS) en el cual el mecanismo controlante de la velocidad de secado es externo y los perfiles de humedad dentro del sólido se consideran planos, aunque no constantes en el tiempo.

3.3.2.1. Ejemplo de curva de secado de un alimento de alta humedad inicial

La Figura 3.12 muestra datos experimentales de secado W vs t para cortes de zanahoria (Giner y Mascheroni, 1990) con un espesor aproximado de 4,5 mm, y una humedad inicial medida de $M_{p0} = 86,4$ (%b.h.), determinando una $W_0 = 6,334$ kg agua/kg sólido seco (véase que $W_0 = (M_{p0} / 100) / [(1 - M_{p0}/100)]$).

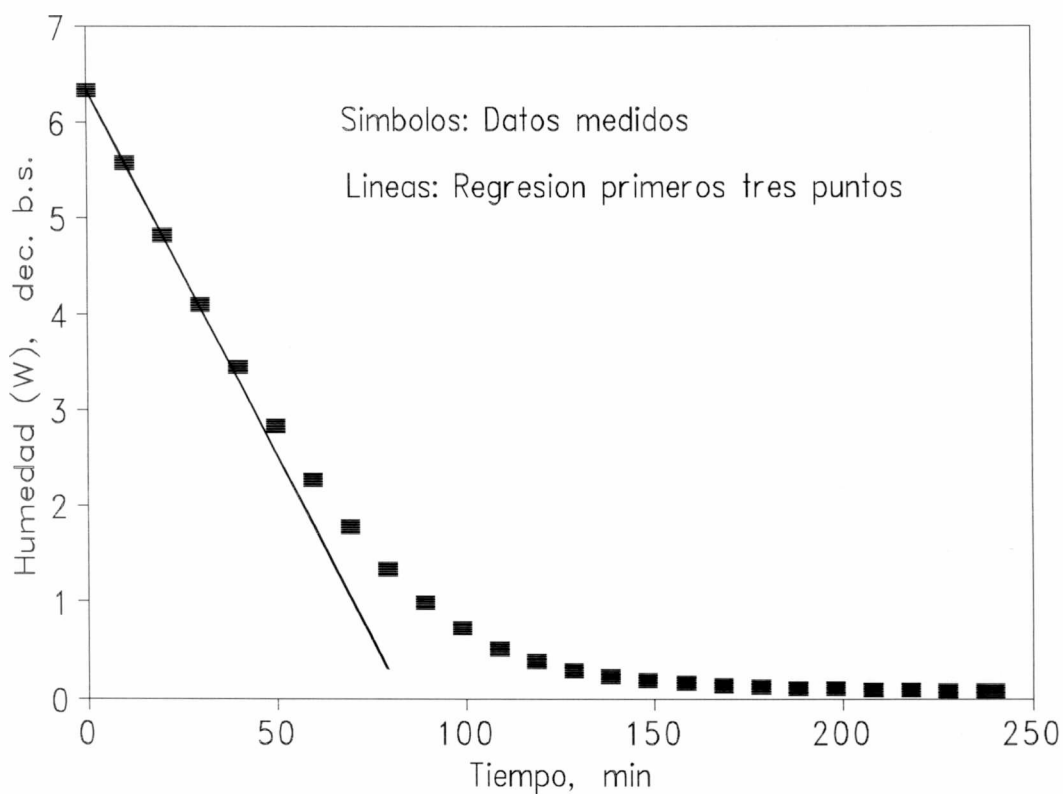


Figura 3.12. Curva de secado de un alimento de alta humedad: cortes de zanahoria fresca.

El material fué secado en un equipo de laboratorio Mettler LP16 a $T_a = 70^\circ\text{C}$ y una humedad relativa $h_r = 0,06$ (T_{bh} de aproximadamente 29°C) con pesada continua de muestra, con registro de peso cada 9,9 min. Puede verse que, al comienzo del secado, la pendiente resulta aproximadamente constante. La recta regresionada con los primeros tres puntos da buena aproximación hasta unos 35-40 min de secado, lo que daría una humedad de finalización del PVCS de aproximadamente 3,5 kg/kg. A partir de ese punto, estimado aquí en forma aproximada, la pendiente o velocidad de secado comienza a disminuir en forma continua, lo que sería una consecuencia directa de la disminución de la presión de vapor en la superficie del sólido, p_{vs} , por debajo del valor original p_s (T_{bh}). Esta reducción responde a las leyes del equilibrio sorcional, al igual que el valor asintótico de humedad (distinto de cero) al cual tiende la curva a tiempos largos. Tal asíntota, sería la "humedad de equilibrio de los sólidos" para esas condiciones constantes de T_a y h_r . Tanto la disminución de la presión de vapor como el concepto de humedad de equilibrio serán estudiados en el capítulo siguiente.

CAPITULO 4. EQUILIBRIO SORCIONAL

CAPITULO 4. EQUILIBRIO SORCIONAL

4.1. INTRODUCCION

4.1.1. Disminución de la presión de vapor del trigo respecto del valor de agua pura.

Como se ha podido observar hacia el final del capítulo 3, aún los alimentos húmedos como zanahoria (Humedad inicial: 86,3% b.h.) presentan sólo un período muy corto de velocidad constante de secado. Precisamente, Parry (1985) ha indicado que los productos agrícolas no presentan usualmente el período de velocidad constante de secado (PVCS) y que el secado de trigo (con humedades iniciales que varían entre el 17 y el 25% b.h.) transcurre en un período de velocidad decreciente bien definido. En este sentido, las humedades críticas (por debajo de las cuales, el PVCS no se observa) varían entre el 41 y el 46% b.h., que sólo pueden existir en trigos fisiológicamente inmaduros.

En consecuencia, durante el secado de trigo, la superficie del grano no estará saturada de agua, presentando una presión de vapor p_v menor a la del agua pura (p_s). Análogamente a p_s , la p_v del trigo dependerá de la temperatura (T), pero también de su contenido de humedad (W). El conocimiento de las relaciones matemáticas entre p_v , W y T permitirá conocer en todo momento la fuerza impulsora disponible para la evaporación de agua:

$$p_v - p_{va}$$

4.1.2. Humedad de equilibrio de los granos (W_e)

Se ha visto hacia el final del capítulo previo que la curva de secado W vs t de cortes de zanahoria tendía hacia una asíntota inferior (generalmente distinta de $W = 0$) representando la mínima humedad a la que se puede secar el producto en las condiciones operativas utilizadas, denominada humedad de equilibrio (W_e).

Secadoras continuas de trigo

Se define W_e como la humedad de un material higroscópico que resulta de exponer el mismo durante un período muy largo (teóricamente infinito) a una atmósfera de temperatura de bulbo seco (T_s) y humedad relativa (h_r) constantes (Brooker y colab., 1992). Obsérvese que la definición dada vale tanto para el equilibrio obtenido luego de secado (desorción) o hidratación del material (adsorción).

En una atmósfera fija, un material dado de humedad W se secará si $W > W_e$, estará en equilibrio si $W = W_e$ y se hidratará cuando $W < W_e$. Las variables termodinámicas relevantes para el establecimiento del equilibrio sorcional son la h_r del aire y la actividad acuosa del grano, a_w . La definición de ambas es análoga, $a_w = p_v/p_s$, mientras que $h_r = p_{v_a}/p_s$. La igualdad $a_w = h_r$ sólo ocurre cuando el grano y el aire se hallan en equilibrio. Este incluye el equilibrio térmico de granos y aire, de manera que los denominadores de las definiciones de a_w y h_r serán iguales. Así, en el equilibrio, se tiene $p_v = p_{v_a}$. Precisamente, la humedad de equilibrio de los granos puede definirse en forma alternativa como el contenido de agua para el cual su presión de vapor iguala la presión parcial del vapor en la atmósfera que lo rodea.

4.1.3. Métodos de medición de datos de equilibrio

-Método Gravimétrico

El contenido de humedad que alcanza la muestra de granos al llegar al equilibrio se determina utilizando atmósferas de h_r constante, provistas por soluciones salinas saturadas (método estático-gravimétrico) (Iglesias y Chirife, 1976). Cuando el procedimiento se repite a la misma temperatura para varias h_r en el rango completo 0-1, se tendrá la denominada isoterma de equilibrio o isoterma de sorción. El método tiene la desventaja de ser muy lento.

La isoterma de adsorción puede construirse con una muestra deshidratada ($W = 0$) que va siendo equilibrada en forma sucesiva con atmósferas de h_r crecientes. Si se parte de

grano de alta humedad, y se utilizan atmósferas de h_r decreciente, se tendrá una isoterma de desorción. Teóricamente ambas isotermas deberían coincidir pero esto rara vez ocurre. Las curvas de desorción en granos presentan humedades algo mayores que las de adsorción a igual a_w . Shatadal y Jayas (1990) han indicado que todavía no hay una interpretación clara de este fenómeno denominado histéresis. Sun y Woods (1993) han presentado una recopilación de datos sorcionales en trigo, e indicaron que las diferencias de humedad desorción-adsorción pueden variar entre 0,05 y 0,008 (dec., b.s.). La distribución de la histéresis no es simétrica, presentando máximos en el rango de a_w entre 0,2 y 0,4. Los autores indicaron que no sólo no está claro el motivo de la histéresis, sino tampoco la forma en que se ve afectada por la temperatura.

Método higrométrico

Las isotermas pueden medirse más rápidamente por el método higrométrico, que consiste en colocar una muestra de granos en un recipiente hermético pequeño (masa de granos \gg masa del aire confinado) de manera de lograr que la h_r del aire evolucione a un equilibrio con la a_w del grano, que se mantiene prácticamente constante, al igual que su contenido de humedad. Así, el a_w del grano se mide indirectamente a través del h_r del aire en equilibrio.

Los instrumentos más utilizados con tal fin son los higrómetros electrónicos de tipo capacitivo, pero los mismos requieren calibraciones frecuentes en la zona de h_r medida y presentan errores altos para fines científicos. Recientemente se han desarrollado sensores ópticos de punto de rocío (General Eastern Instruments, 1994) que no necesitan calibración por medir una temperatura que se alcanza cuando se produce condensación sobre un espejo (ver capítulo 3). Este tipo de sensores permiten usar el método higrométrico con mayor precisión y confianza.

Secadoras continuas de trigo

Repitiendo el procedimiento para muestras de granos de distinta humedad, se puede construir la isoterma de equilibrio, que será de adsorción o desorción según la forma de obtención de las muestras de granos de distinto contenido de agua.

En el apéndice de este capítulo se listan las a_w de distintas soluciones salinas saturadas en función de la temperatura (Hall, 1971) utilizables tanto para equilibrar muestras de granos por el método gravimétrico como para calibrar sensores higrométricos capacitivos.

Humedades de seguridad para estabilidad microbiana de alimentos

Las isotermas de sorción no sólo son útiles para calcular la fuerza impulsora de secado ($W - W_e$) sino que también permiten establecer de antemano la humedad final de la operación, adecuada para un almacenamiento prolongado del producto en condiciones ambientes. Chirife e Iglesias (1984) han indicado que los microorganismos más habituales no pueden crecer en medios con $a_w < 0,7$, y han establecido ese límite para calcular las humedades de seguridad. En $a_w = 0,7$, la interacción agua-grano es ya lo suficientemente fuerte como para que el agua no esté disponible para el crecimiento microbiano. Las humedades de seguridad se estiman normalmente utilizando isotermas a 25°C. El efecto de la temperatura en la humedad de seguridad es importante, y se lo discutirá en secciones posteriores.

4.1.4. Isotherma típica en cereales

La Figura 4.1 muestra una isoterma típica de cereales (ASAE, 1991) que predice una humedad de seguridad (para $a_w = 0,7$) de aproximadamente 0,169 dec., b.s. La curva isoterma es de tipo sigmoide, y, de acuerdo a la clasificación clásica (Gregg y Sing, 1967) corresponde a adsorción física multicapa BET tipo II.

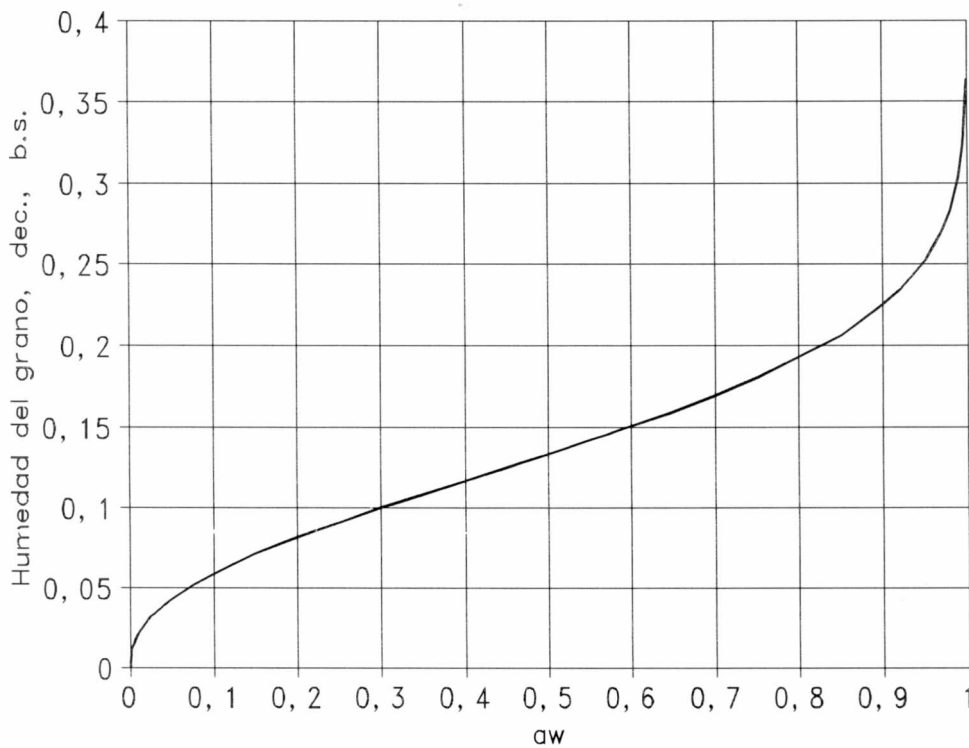


Figura 4.1. Isoterma de sorción típica de un cereal a 25°C.

Parry (1985) ha indicado que una ecuación de isoterma de sorción de agua en granos debe cumplir con los requisitos siguientes:

$$\begin{aligned}
 a_w \rightarrow 0, W \rightarrow 0 & ; \frac{dW}{da_w} \rightarrow \infty \\
 a_w \rightarrow 1, W \rightarrow \infty & ; \frac{dW}{da_w} \rightarrow \infty
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

La primera parte de la isoterma, $0 < a_w < 0,25$, corresponde a la formación de una monocapa de agua tan fuertemente adsorbida que no tiene mayores posibilidades de intervenir en reacciones químicas. La monocapa terminaría de formarse para a_w cercanos a 0,25, y el contenido de humedad (W) en ese punto correspondería a una estabilidad máxima de los alimentos, tanto química como microbiológica (Chirife y colab., 1985). En el intervalo de a_w de 0,25 a 0,7, las moléculas de agua se van adsorbiendo con energía decreciente sobre

Secadoras continuas de trigo

las que ya estaban en contacto con el sólido, pero su disponibilidad para intervenir en reacciones bioquímicas resulta todavía muy restringida (Multon, 1988). Por encima de a_w 0,65-0,7, el agua adicional se adsorbe débilmente y tiende progresivamente a formar parte de soluciones, estando disponible para crecimiento microbiano y reacciones bioquímicas (Shatadal y Jayas, 1990).

Los granos se secan a la humedad de seguridad ($a_w \approx 0,7$) y no hasta el valor de máxima estabilidad de la humedad de monocapa ($a_w \approx 0,25$) por razones económicas, dado que lo que se desea evitar es la posibilidad de crecimiento microbiano (Chirife e Iglesias, 1984).

Rovedo y colab. (1993) han indicado que el contenido de agua de los granos influye en sus propiedades físicas, químicas y funcionales, así como también en su calidad y estabilidad. En consecuencia se considera importante analizar la información existente sobre el comportamiento sorcional en granos y los factores que afectan la actividad acuosa (a_w), vitales para controlar el crecimiento microbiano durante el almacenamiento y esenciales para especificar las velocidades de secado, requerimientos de energía y condiciones operativas para el secado previo a la conservación en silos.

En este capítulo, el objetivo es analizar la conveniencia de la utilización del modelo G.A.B. de sorción multicapa, para describir las isotermas a distintas temperaturas, y de acuerdo a los resultados, decidir entre ésta y una ecuación fenomenológica simple, que sea funcionalmente adecuada para tal propósito. Con la expresión de equilibrio sorcional elegida, más la ecuación de Clapeyron, se deducirá una expresión para el cálculo del calor de sorción (L_g), en función de la temperatura y contenido de humedad del grano. El L_g aparece en los modelos de secado de lecho fijo, y representa la mayor contribución a la demanda de energía de la operación de secado. Las predicciones de la expresión deducida de L_g se compararán con las de un modelo empírico, utilizado habitualmente en la literatura del secado de granos.

4.2. MODELOS FENOMENOLOGICOS DE ISOTERMAS DE SORCION

La investigación del equilibrio higroscópico en alimentos ha buscado cuantificar el fenómeno de sorción de varias formas. En este sentido, debe indicarse que encontrar una ecuación matemática que ajuste bien la isoterma sigmoidea experimental es muy diferente a modelar en forma realista el complejo fenómeno fisicoquímico de sorción. El problema de caracterizar las propiedades físicas y químicas de los componentes de un cereal u oleaginosa, la complejidad de sus interacciones con el agua y el efecto del agua en sus estructuras internas hacen extremadamente difícil modelar estas características con precisión (Shatadal y Jayas, 1990). Young y Corwell (1962) han señalado que una ecuación teórica que pueda tener en cuenta los fenómenos sorcionales sería demasiado compleja y tendría demasiados parámetros como para ser útil, y reconocen que el número de parámetros a ser evaluados simultáneamente con precisión razonable no puede ser mayor que 4.

4.2.1. Preselección de una ecuación fenomenológica simple para la predicción de las isotermas de sorción

Pfost y colab. (1976) mostraron que la ecuación siguiente:

$$W = 0.01 \left[- \frac{\text{Ln}(1 - a_w)}{K_{HT}(T + C_{HT})} \right]^{1/N} \quad (4.2)$$

desarrollada en, primera versión, por Henderson (1952) y modificada por Thompson y colab. (1968), por eso llamada "Henderson-Thompson", describe las isotermas W vs a_w e incluye el efecto de la temperaturas (T) con sólo 3 parámetros, permitiendo despejar analíticamente las tres variables (a_w , W y T). Los autores indicaron que si bien esta ecuación no es la isoterma más precisa en todos los casos, brinda una predicción satisfactoria del comportamiento higroscópico de varios granos, presentando parámetros de ajuste que fueron adoptados para el estándar ASAE (1991). Para trigo duro y blando, tales parámetros surgieron de un trabajo de Pfost y colab. (1976), y se listan en la Tabla 4.1:

Secadoras continuas de trigo

Tabla 4.1. Parámetros utilizados de la ecuación de Henderson-Thompson (ec. (4.2)) para trigos duros y blandos.

Tipo de trigo	k_{HT}	C_{HT}	N
Duro	$2,31 \times 10^{-5}$	55,815	2,2857
Blando	$1,23 \times 10^{-5}$	64,346	2,5558

Esta ecuación de isoterma ha sido recomendada por Morey y colab. (1978) en una revisión del tema de secado y cumple con los requerimientos matemáticos de Parry (1985) (ec. (4.1)).

La revisión más completa de datos sorcionales en trigo fué realizada por Sun y Woods (1993), quienes recopilaron 33 fuentes bibliográficas publicadas entre 1925 y 1988 para diversas variedades. Los autores listaron los datos disponibles -en los cuales se advierte escasez de información a bajas actividades acuosas ($a_w < 0,10$) y altas temperaturas ($T > 50^\circ\text{C}$)- y han concluído que las isotermas más adecuadas para trigo eran las de Strohmman-Yoerger (S-Y), Oswin modificada (OM), Chung-Pfost modificada (C-PM) y Henderson-Thompson (H-T) (ec. 4.2). Las ecuaciones S-Y, OM y C-PM, se listan a continuación:

Ecuación de Strohmman-Yoerger

$$\ln a_w = A_{sy} \ln p_s \text{EXP} (B_{sy} 100 W) + C_{sy} \text{EXP} (D_{sy} 100 W) \quad (4.3)$$

Oswin modificada

$$W = 0.01 (A_{om} + B_{om} T) \left[\frac{a_w}{1 - a_w} \right]^{C_{om}} \quad (4.4)$$

Chung-Pfost-modificada

$$a_w = \text{EXP} \left[- \frac{A_{cp}}{T + C_{cp}} \text{EXP} (- B_{cp} 100 W) \right] \quad (4.5)$$

Obsérvese que si bien el modelo S-Y incluye la funcionalidad con la temperatura en

p_s , no presenta una solución analítica para W , lo cual la hace inconveniente para uso práctico. La O-M es sencilla, pero su forma matemática no cumple con la condición de derivada tendiendo a infinito para $a_w \rightarrow 0$. Por su parte la C-PM requiere tomar logaritmos dos veces para despejar W , que puede hacerla proclive a acumular errores de truncación de decimales. Se ha decidido utilizar la ecuación de Henderson-Thompson (ec. (4.2)), como expresión simple, funcionalmente adecuada para describir las isotermas de trigo.

Ecuación de Nellist-Dumont

Nellist y Dumont (1979) correlacionaron una expresión fenomenológica a datos sorcionales de trigo, al sólo efecto de ser utilizada en modelos de secado en capa delgada y lecho fijo (ecuación de Nellist-Dumont: ND)

$$W = A_{ND} - B_{ND} \ln(1 - h_r) - C_{ND} \ln T_a$$

razón por la cual no se utiliza a_w y T del grano sino la h_r y temperatura de bulbo seco (T_a) del aire de secado. A_{ND} puede valer de 0,113 a 0,143, $B_{ND} = 0,07949$ y $C_{ND} = 0,01577$. La ecuación ND presenta un interés práctico por haber sido empleada en numerosos trabajos previos (Bruce, 1984; Nellist, 1987; Bruce y Giner, 1993), pero no cumple con las condiciones de Parry (1985).

4.2.2. Comparación de las ecuaciones de Henderson-Thompson para trigos duros y blandos

La Figura 4.2. muestra la comparación entre las predicciones de la ecuación de Henderson-Thompson para trigo duro (panificable) y blando a 25°C, en base a los parámetros de la Tabla 4.1.

Secadoras continuas de trigo

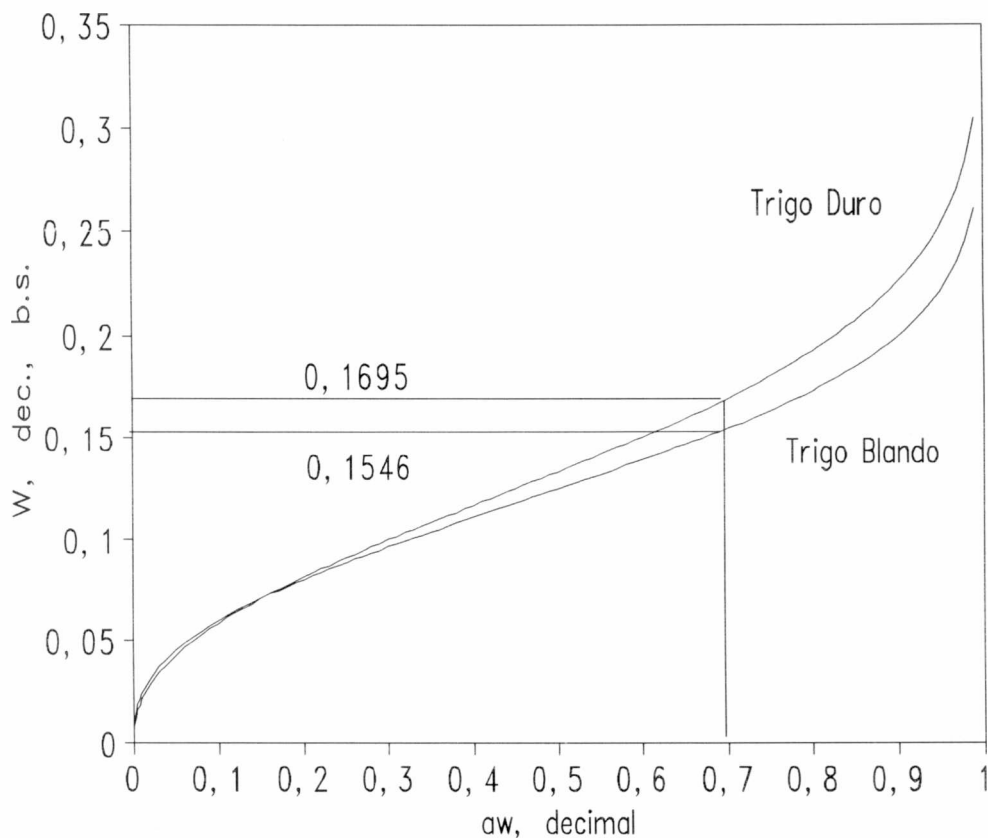


Figura 4.2. Predicciones de la ecuación de Henderson-Thompson para la isoterma de trigos duros y blandos a 25°C.

Puede observarse que la expresión para trigos duros predice mayores humedades adsorbidas que las de trigos blandos en la zona de medias a altas a_w , lo cual puede explicarse por la mayor proporción de proteínas de los primeros (SAGyP, 1995). Así, la humedad de seguridad a $a_w = 0,7$ es de 0,015 dec., b.s. más alta en trigo duro que en blando.

El Estándar Argentino vigente para la Comercialización de Trigo Pan (SAGyP, 1994) indica una humedad de 14% (b.h.) para almacenamientos prolongados, equivalente a un valor base seca de 0,163, que, como podrá verse en la Figura 4.2, cae entre las predicciones de las isotermas H-T de trigo duros (0,169) y blandos (0,155), para $a_w = 0,7$. Se empleará en este trabajo la isoterma de trigo duro compatible con la variedad que habrá de utilizarse en

las mediciones de parámetros cinéticos del secado de trigo (capítulo 6).

4.2.3. Comparación de la ecuación de Henderson-Thompson trigo duro con datos experimentales.

La isoterma de Henderson-Thompson para trigos duros se comparó en la Figura 4.3 con datos experimentales tomados de la recopilación de Sun y Woods (1993). El gráfico abarca el rango 5-25°C, donde, en cada temperatura, se promediaron datos sorcionales de 4 variedades de trigos duros medidos por Pixton y Henderson (1981) para variedades canadienses.

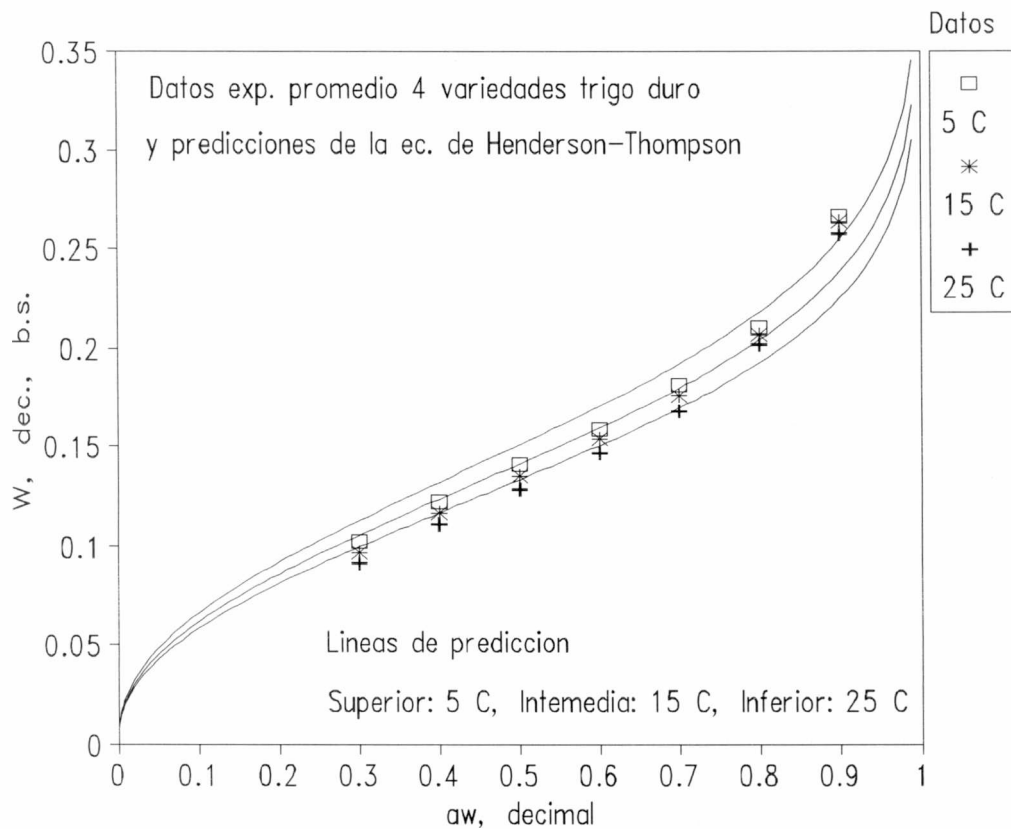


Figura 4.3. Datos experimentales promedio de 4 variedades de trigo duro y predicciones de la ecuación de Henderson-Thompson (ec. 4.2.) a tres temperaturas: 5, 15 y 25°C.

Secadoras continuas de trigo

Se observa que la predicción general de la ecuación H-T esta algo desplazada hacia arriba pero que, no obstante, da una medida correcta de los datos y aproxima su funcionalidad con la temperatura.

A efectos de tener una referencia del comportamiento sorcional de la variedad de trigo duro a utilizarse en las experiencias de secado (Trigo duro PROINTA Isla Verde), se midió la a_w por duplicado por el método higrométrico de sensor óptico de punto de rocío (Giner y colab., 1997) en una muestra de $W = 0,1433$ dec., b.s.. Se obtuvo $a_w = 0,59$ a 25°C , muy similar a la predicción de Henderson-Thompson en la Figura 4.3.

La Figura 4.4. compara la misma ecuación de isoterma con datos experimentales a 35°C y 50°C , listados en la recopilación de Sun y Woods (1993).

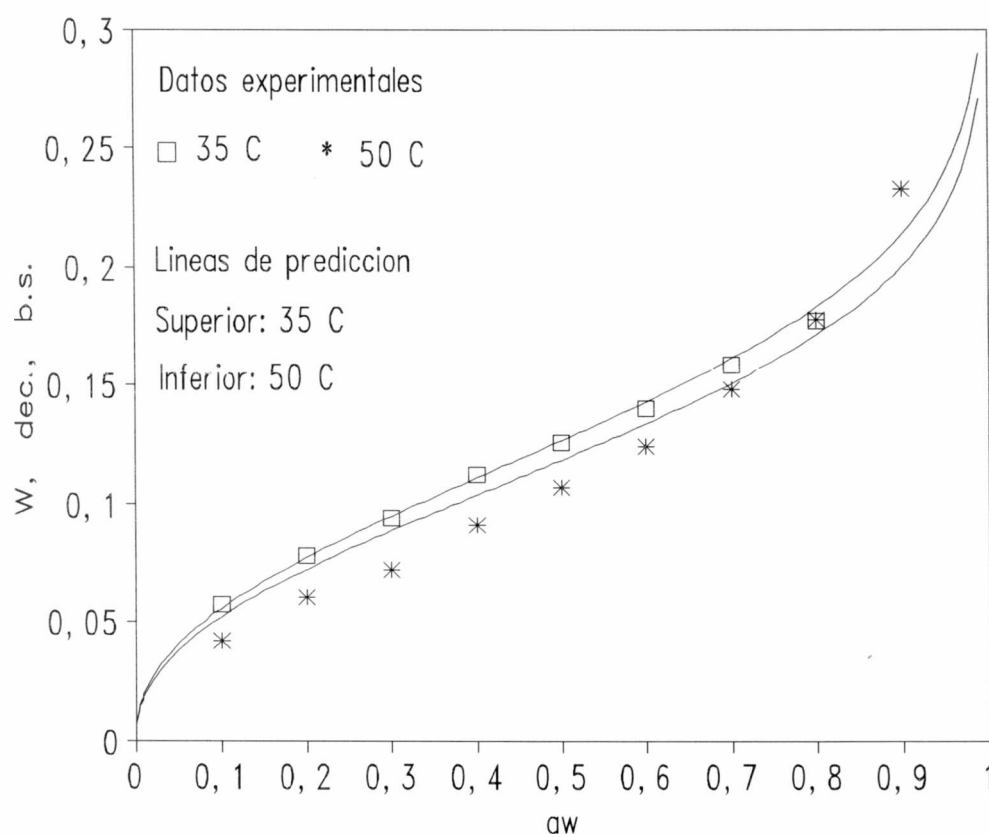


Figura 4.4. Datos experimentales de sorción a 35 y 50°C en variedades de trigo duro y predicciones correspondientes de la ecuación de Henderson-Thompson.

Se observa que la predicción a 35°C es muy buena, y que, a 50°C hay una ligera sobreestimación de los datos en el rango de actividades acuosas bajas e intermedias (0,1-0,7). El desplazamiento vertical predicho entre las isothermas a 35 y 50°C es menor en las curvas predichas que en las experimentales, al contrario de lo observado entre 5 y 25°C. Esto indica que la funcionalidad media con la temperatura es, en promedio, aceptable.

4.2.4. Funcionalidad con la temperatura en isothermas y humedades de seguridad

A efectos de tener un gráfico ilustrativo del efecto de un rango amplio de temperatura en las isothermas de sorción, se empleó la ecuación de H-T para trigo duro entre 5 y 75°C. Las curvas se presentan en la Figura 4.5.

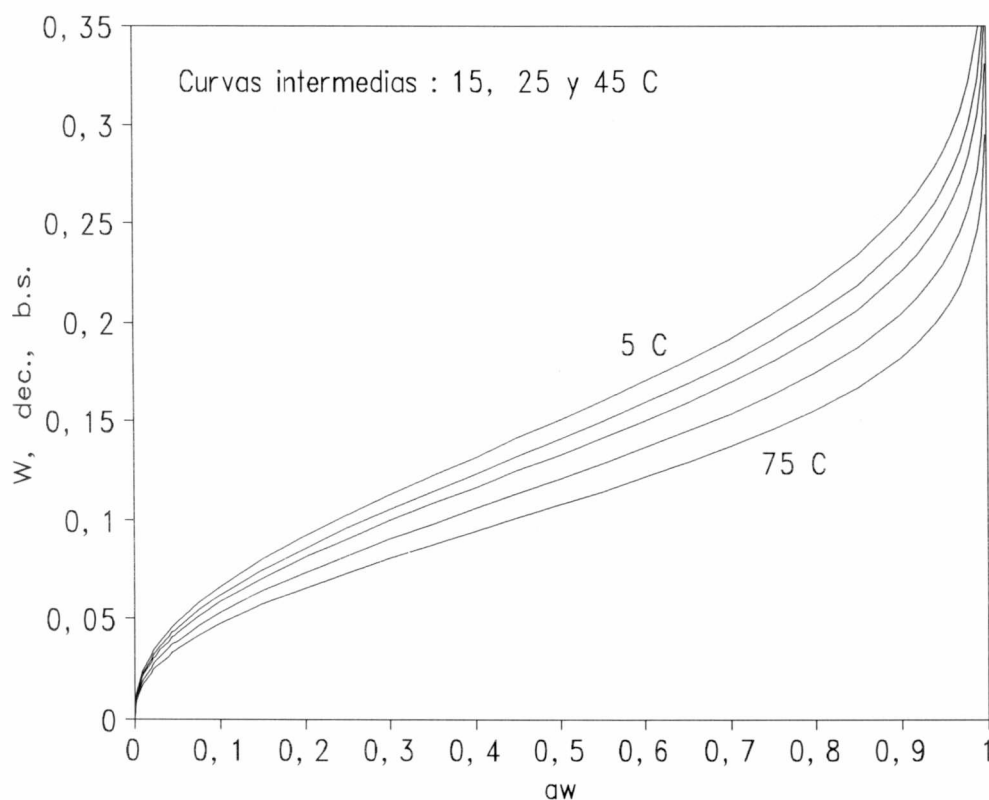


Figura 4.5. Isothermas predichas por la ecuación de Henderson-Thompson para trigo duro a distintas temperaturas.

Secadoras continuas de trigo

Efecto a a_w constante

Excepto el valor a 5°C, que puede verificarse en el almacenamiento refrigerado de granos, el intervalo de temperaturas es típico del manejo postcosecha de trigos secados con aire caliente. La Figura 4.5. muestra que la humedad adsorbida en equilibrio crece cuando disminuye la temperatura. Chirife y colab. (1985) han indicado que la adsorción se favorece a bajas temperaturas por ser un fenómeno exotérmico, análogo a la condensación. Como se mencionó previamente, la humedad de los granos para $a_w = 0,7$ es especialmente importante, puesto que a menores actividades acuosas el crecimiento microbiano es muy poco probable (Chirife e Iglesias, 1984). Así, fijando ese valor de a_w se pueden predecir "humedades de seguridad", que se listan en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Humedades de seguridad de trigo (W a $a_w = 0,7$) estimados por la Ecuacion Henderson-Thompson para trigo duro a distintas temperaturas.

Humedades de grano (W) para $a_w = 0,7$					Diferencia $W_{5^\circ C} - W_{75^\circ C}$ dec., b.s.
Decimal, b.s.					
Temperatura, °C					
5	15	25	45	75	
0,192	0,180	0,169	0,154	0,137	0,055

Se realizó una verificación adicional de la confiabilidad de la humedad de seguridad predicha a 25°C; con este fin, se calculó un promedio de humedades experimentales medidas a esa temperatura para $a_w=0,7$ de 14 variedades de trigo duro tomadas de la recopilación de

Sun y Woods (1993), obteniéndose un valor medio de $0,168 \pm 0,007$, que coincide prácticamente con el estimado en la Tabla 4.2.

Los resultados de la Tabla 4.2. permiten ver más claramente que las humedades de seguridad aumentan cuando disminuye la temperatura. Así, granos refrigerados requerirían menor secado para ser conservados. Más aún, Chirife e Iglesias (1984) han indicado que, a temperaturas bajas, el a_w mínimo de crecimiento también crece, con lo cual el criterio de $a_w=0,7$ aplicado al cálculo de humedades de seguridad resultaría demasiado prudente al aplicárselo a temperaturas $\leq 10^\circ\text{C}$. Si bien el efecto de interacción $a_{w\text{ min}}$ -temperatura en la humedad de seguridad habla de las bondades del almacenamiento refrigerado como sistema complementario o aún alternativo al de secado, debe tenerse en cuenta que esto no es económicamente viable al manejar millones de toneladas de un "commodity" como trigo, de bajo valor unitario, debido al costo involucrado en la cadena de frío. Así, es posible que el sistema de secado hasta la humedad de seguridad a 25°C perdure por mucho tiempo.

Efecto a humedad de grano constante

En la Figura 4.5, se observa que, a humedad de grano constante, por ejemplo, 0,165, el aumento de la temperatura incrementa el a_w . Esta es una de las razones por las cuales se debe mantener el silo ventilado con aire natural, para evitar que la actividad acuosa trepe por encima de 0,7, controlándose así el crecimiento microbiano y el desarrollo de insectos. Estos últimos pueden crecer aún en granos secos, si la temperatura se eleva por encima de $20\text{-}25^\circ\text{C}$. Lasserán (1994) ha mostrado que, en climas templados como el de la Pampa Húmeda, se pueden mantener granos frescos con una juiciosa aireación nocturna o

Secadoras continuas de trigo

matinal, (siempre que la temperatura del aire sea al menos 5°C inferior a la de los granos), lo que haría innecesario el empleo de refrigeración mecánica y pesticidas, permitiendo mantener los costos bajo control.

4.3. ANALISIS DE MODELOS TEORICOS DE SORCION

4.3.1. Descripción del modelo de de Guggenheim, Anderson y De Boer (G.A.B. o GAB)

Van den Berg y Bruin (1981) revisaron 77 ecuaciones diferentes para las isothermas de alimentos, encontrando que algunas ecuaciones estaban relacionadas con las de BET o GAB, mientras que otras eran de tipo empírico, de 2 o 3 parámetros de ajuste para cada temperatura. Los autores recomendaron la ecuación de GAB por presentar parámetros con significado físico y por sus buenas predicciones hasta $a_w = 0,90$, indicando que uno o dos de los 3 parámetros GAB pueden dar cuenta del efecto de la temperatura por medio de ecuaciones tipo Arrhenius.

En un trabajo posterior, Van den Berg, (1984) sugirió la utilización de la ecuación de GAB y presentó parámetros para trigo blando a 25°C.

Por su parte, Lomauro y colab. (1985) utilizaron 88 isothermas experimentales pertenecientes a productos lácteos, café, té, frutas secas, oleaginosas, especias y alimentos ricos en almidón. Entre otras conclusiones, los autores encontraron que el modelo GAB de adsorción física multicapa predecía bien el 75% de las isothermas ajustadas, incluyendo las de trigo, pero los datos experimentales, estaban limitados a la temperatura de 25°C (la más común para isothermas) y al rango de a_w de 0,24-0,96.

van den Berg (1985) listó los requerimientos que deberían cumplir las ecuaciones de isotermas:

- (1) La curva experimental debe poder describirse matemáticamente para aplicaciones prácticas como secado, envasado y almacenamiento
- (2) La ecuación debe tener una forma relativamente simple con un número limitado de parámetros
- (3) Los parámetros deben poseer significado físico
- (4) Los parámetros deberían incluir la dependencia con la temperatura
- (5) La ecuación debe permitir una corrección para tener en cuenta la influencia de la histéresis.

Como se ha observado a lo largo de este capítulo, el fenómeno de sorción en alimentos deshidratables como el trigo comprenden prácticamente el rango completo de actividades de agua (a_w entre 0 y 1) y los datos experimentales existentes permiten indicar que, *al menos funcionalmente*, el fenómeno responde aproximadamente al comportamiento de la *adsorción física multicapa* (Gregg y Sing, 1967) representada por una curva sigmoidea (Iglesias y Chirife, 1976; van den Berg, 1985; Shatadal y Jayas, 1990).

Adsorción monocapa

La sorción monocapa es aquella para la que cada sitio de adsorción o sitio activo del material adsorbente (la materia seca del trigo en nuestro caso) se cubre con *una* molécula del

Secadoras continuas de trigo

adsorbato (el agua). Si no hay posteriores adsorciones sobre las moléculas de la monocapa, el contenido de humedad adsorbida crecería hasta una asíntota horizontal siguiendo una curva representada por el modelo del Langmuir (Gregg y Sing, 1967; Chirife y colab., 1985; Shatadal y Jayas, 1990).

$$W = \frac{W_m C_L a_w}{1 + C_L a_w} \quad (4.6)$$

donde W_m sería la humedad de monocapa correspondiente al cubrimiento de todos los sitios de adsorción con una molécula de agua, mientras C_L es un parámetro.

Esta ecuación no representa, obviamente, los resultados de sorción en alimentos, como ha sido visto en las Figuras 4.1 a 4.5 para trigo. Los mismos muestran la inexistencia de una asíntota horizontal en la humedad de monocapa puesto que las humedades adsorbidas siguen creciendo al aumentar el a_w . En realidad, el modelo de Langmuir representaría bien la isoterma de sorción de alimentos en el rango de a_w 0 - 0,25, donde se forma la monocapa adsorbida (Chirife y colab., 1985).

Adsorción física multicapa

Modelo BET

Brunauer, Emmet y Teller se basaron en el modelo de Langmuir y extendieron el análisis a la segunda y subsiguientes capas adsorbidas. Los autores desarrollaron, en 1938, el modelo B.E.T., acrónimo formado con el nombre de los tres autores (Shatadal y Jayas, 1990).

Este modelo clásico en adsorción multicapa puede representar varios tipos de isotermas de sorción, entre ellas las sigmoideas. Los autores asumieron *adsorción física de*

gases en adsorbentes sólidos no porosos, sugiriendo que la primera capa adsorbida presentaba un comportamiento distinto al de la fase líquida pura del adsorbato, mientras que las capas segunda y subsiguientes se comportarían como adsorbato líquido puro.

La otra suposición es que la multicapa es "vertical" : en cada sitio activo, primero se depositan las moléculas de la monocapa y luego, por encima de ellas, la de las capas segunda y subsiguientes. El fenómeno se representa en la Figura 4.6 de la manera indicada por Gregg y Sing (1967):

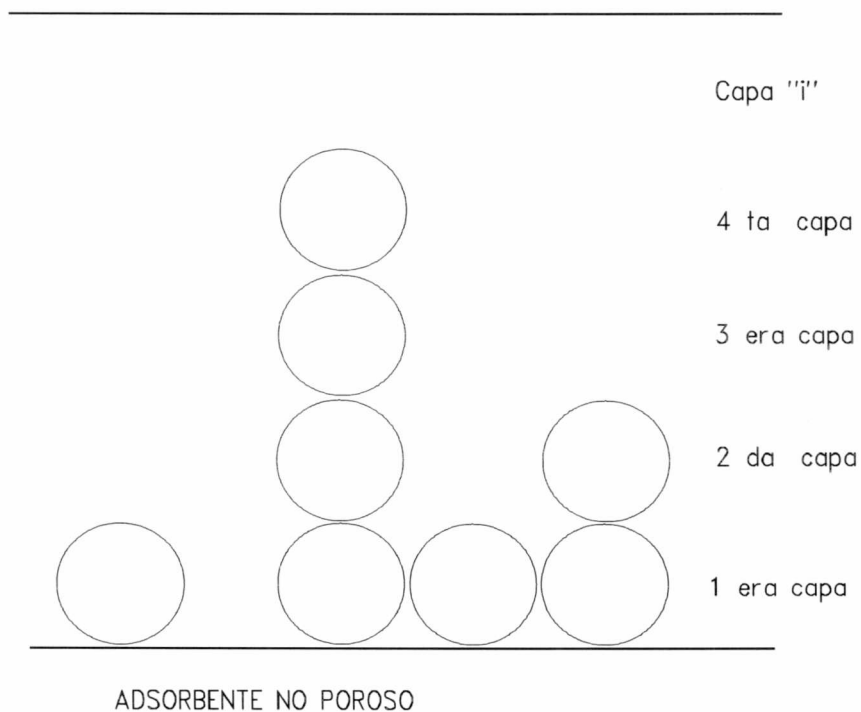


Figura 4.6. Esquema de diferentes situaciones de sorción: monocapa y multicapa. En granos, los componentes sólidos representan el sustrato adsorbente (proteínas, carbohidratos), siendo el agua el adsorbato.

Secadoras continuas de trigo

El modelo de BET puede escribirse como una suma de la contribución monocapa y multicapa (Chirife y colab., 1985):

$$W = \frac{W_m (C_B - 1) a_w}{1 + (C_B - 1) a_w} + \frac{W_m a_w}{1 - a_w} \quad (4.7)$$

donde puede observarse que el primer término corresponde a la ecuación de Langmuir, siendo el segundo la corrección por adsorción multicapa. Inspeccionando esta forma de la ecuación de BET se encuentra inmediatamente que el coeficiente de Langmuir $C_L = C_B - 1$, siendo C_B uno de los parámetros del modelo BET.

La ecuación BET puede ser reescrita en una forma equivalente, más conocida (Chirife y colab., 1985)

$$W = \frac{W_m C_B a_w}{(1 - a_w) (1 - a_w + C_B a_w)} \quad (4.8)$$

Según Gregg y Sing (1967), el parámetro C_B representa el equilibrio dinámico adsorción-desorción siendo, según se deduce en el tratamiento clásico, proporcional a $\text{Exp} [(H_m - L_w)/RT]$. El símbolo H_m es el calor de sorción de la monocapa y L_w el calor latente de vaporización-condensación de agua pura. La ecuación de BET asume que sólo la primera capa adsorbida tiene un calor de desorción diferente al de agua pura y que las restantes capas adsorbidas se comportan como agua pura condensada. Siendo $H_m > L_w$, el valor de C_B debería decrecer con la temperatura absoluta. El modelo BET asume, por otra parte, que la superficie del adsorbente es homogénea en un sentido energético y que las moléculas no presentan interacciones laterales sino sólo "verticales", normales a la superficie adsorbente,

causando el apilamiento mostrado en la Figura 4.6. Estos supuestos han sido, no obstante, cuestionados (Gregg y Sing, 1967). van den Berg (1984) y Chirife y colab. (1985) han mostrado que el modelo BET no representa correctamente la sorción de agua en granos para actividades acuosas superiores a 0,5, estimando humedades adsorbidas bastante mayores que las experimentales en ese rango, razón por la cual se prefiere utilizar la ecuación de G.A.B.

Modelo GAB

La ecuación de GAB fué propuesta en primer lugar por Anderson (1946) como una modificación de la de BET, y luego desarrollada cinéticamente por De Boer (1953) y por Guggenheim (1966), aplicando mecánica estadística (Shatadal y Jayas, 1990).

A los efectos prácticos, la diferencia entre las ecuaciones de BET y GAB radica en que la última no asigna propiedades del agua pura a la segunda y subsiguientes capas adsorbidas sino un comportamiento intermedio entre el de adsorción-desorción de la monocapa y el de condensación- evaporación de agua pura.

Las capas adsorbidas por encima de la primera están representadas en la ecuación de GAB por un calor de sorción H_n . La expresión matemática de GAB es:

$$W = \frac{W_m C_G k_G a_w}{(1 - k_G a_w) (1 - k_G a_w + C_G k_G a_w)} \quad (4.9)$$

donde la única diferencia con BET es la aparición de un tercer parámetro k_G , que multiplica el a_w y cuyo valor debería ser ≤ 1 en adsorción física multicapa.

Antecedentes del ajuste de la ecuación de GAB en trigo

Las constantes de GAB para trigo blando halladas a 25°C por van den Berg (1984)

Secadoras continuas de trigo

fueron $W_m = 0,0844-0,0968$; $C_G = 23,58 - 21,87$ y $k_G = 0,743-0,698$ para adsorción y resorción, respectivamente, mientras que Lomauro y colab. (1985) obtuvieron $W_m=0,0701-0,0757$, $C_G = 104,6 - 77,68$ y $k_G=0,825 - 0,81$ para adsorción y desorción, respectivamente.

Si, a efectos ilustrativos, se asume que W_m , humedad de monocapa, es la misma en BET y GAB que el parámetro C_B es similar al C_G , se pueden graficar ambos modelos tomando k_G distinto de 1 como la única diferencia entre los mismos. Para un ejemplo ilustrativo en trigo, se eligieron valores de $W_m = 0,075$, $C_B = C_G = 25$ y, para GAB, $k_G = 0,8$, valor típico informado por (Chirife y colab., 1992). Las curvas predichas, junto a la de Langmuir, se representan en la Figura 4.7.

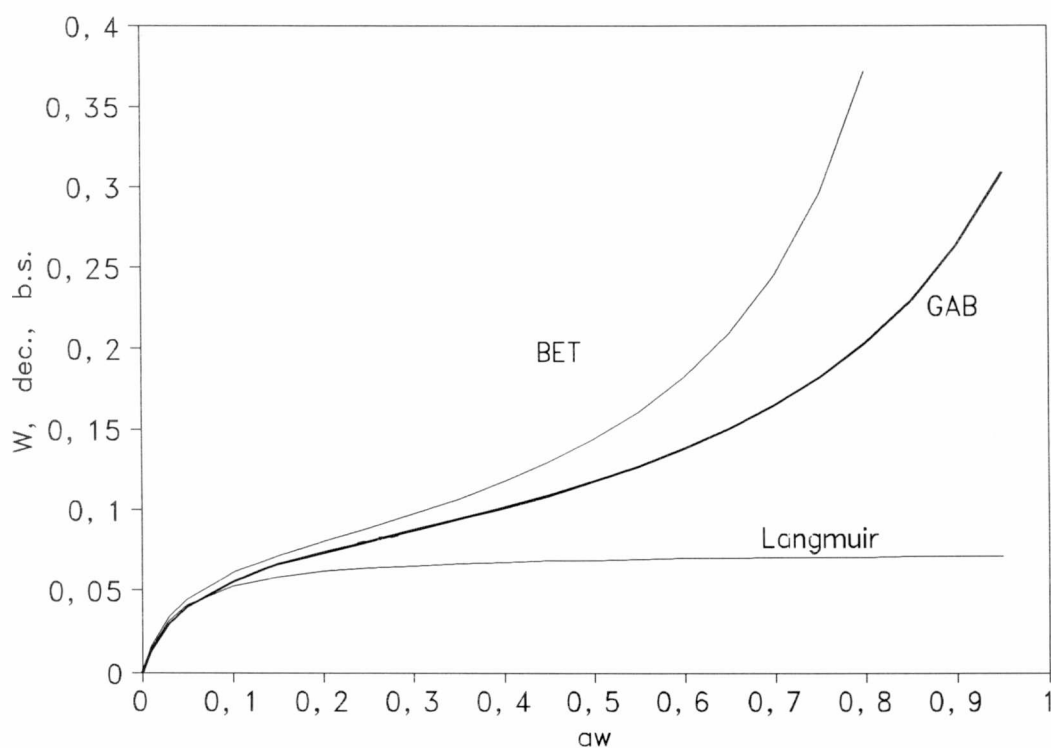


Figura 4.7. Isotermas predichas por los modelos de Langmuir, BET y GAB. Parámetros utilizados: $W_m = 0,075$ (en las tres curvas); $C_B = C_G = 25$ (en BET y GAB); $C_L = C_B - 1$ (En Langmuir); $k_G = 0,8$ (GAB).

La Figura 4.7. muestra que, efectivamente, hay diferencias notables por la introducción del parámetro k_G en la ecuación de GAB, respecto de la de BET. La predicción de GAB sería razonable en $a_w = 0,7$, dando valores de humedad de seguridad de alrededor de 0,17 (compárese con Figura 4.1), mientras que BET, como se había adelantado, sobreestima significativamente los valores de GAB para $a_w > 0,5$. La ecuación de Langmuir se aplicó con la misma humedad de monocapa y un coeficiente $C_L = C_B - 1$, mostrando su aproximación a la asíntota horizontal de la W_m . Puede verse que tanto BET como GAB predicen aproximadamente la humedad de monocapa en un punto de inflexión para a_w de aproximadamente 0,2.

Variación de los parámetros de la ecuación de GAB con la temperatura

van den Berg (1984) indica que las funcionalidades teóricas de C_G y k_G son las siguientes:

$$C_G = C_{G0} \exp[(H_m - H_n) / RT] \tag{4.10}$$

$$k_G = k_{G0} \exp[(L_w - H_n) / RT] \tag{4.11}$$

donde el calor de sorción de monocapa (H_m) debería ser mayor que el de la multicapa (H_n) (segunda y subsiguientes), lo que haría decrecer exponencialmente a C_G al aumentar la temperatura. Similarmente, se espera que $H_n > L_w$, determinando un crecimiento del parámetro k_G con la temperatura. van den Berg (1984) no propuso variaciones de la humedad de monocapa W_m con la temperatura, lo que estaría de acuerdo con la suposición original de

Secadoras continuas de trigo

BET, y acarreada por GAB, en cuanto a que no hay interacciones laterales entre moléculas. Sin embargo, dado que esa suposición ha provocado controversias (Gregg y Sing, 1967), se analizará la posible variación de W_m con T en trigo. En este sentido, Chen y Jayas (1998) han ajustado la ecuación de GAB a datos de granos como trigo, arroz, maíz, y otros alimentos, a distintas temperaturas. Los autores encontraron que W_m decrecía con el aumento de T, que las variaciones de C_G eran irregulares y que k_G variaba muy poco y sin tendencia definida.

En ajustes previos de la ecuación de GAB a datos sorcionales de trigo, donde aparentemente sólo Chen y Jayas (1998) la utilizaron a distintas temperaturas, se encuentra que tanto W_m como k_G tienen un rango de variación acotado: 0,07-0,10 el primero y 0,7-0,83 el segundo; no ocurre lo mismo con C_G , parámetro que se mantiene alrededor de 22-24 según van den Berg (1984), entre 26 y 14 según Chen y Jayas (1998), y entre 78 y 105, muy diferente a los casos anteriores, para Lomauro y colab. (1985).

Sopade y Ajisehiri (1994) hallaron que la humedad de monocapa decrecía más con la temperatura que los parámetros C_G y k_G en granos como maíz y sorgo, aunque no analizaron las causas del comportamiento de los dos últimos parámetros. Chen y Jayas (1998) indicaron que si bien la ecuación de GAB se ajusta bien a los datos de W vs a_w en cada temperatura, las correlaciones tipo-Arrhenius propuestas por van den Berg (1984) para C_G y k_G no resultan confiables, poniendo en duda el sentido físico de tal correlación. Sin embargo, indicaron que era necesario analizar la razón de la aparente inadecuabilidad de las ecuaciones (4.10) y (4.11).

A efectos de analizar el comportamiento de W_m , C_G y k_G con la temperatura, se realizaron ajustes de la ecuación de GAB (ec. (4.9)) a datos recopilados por Sun y Woods

(1993) a partir de un trabajo de Pixton y Henderson (1981). Los últimos autores midieron isotermas experimentales a 5, 15 y 25°C para 5 variedades de trigo canadiense (Canadian hard red winter: Glenlea (1), Sinton (2), Neepawa (3) y Napayo (4); Canadiam Durum: Wakooma (5)). El rango de a_w de los datos fué 0,3-0,9, con un número de datos experimentales W vs $a_w = 100$. Se usaron cuadrados mínimos resueltos por Quasi-Newton (Wilkinson, 1990). Se obtuvieron valores de $r^2 > 0,999$ en cada temperatura y variedad, lo cual confirma el buen comportamiento del modelo GAB para cada isoterma. Los parámetros GAB de las variedades (1), (3) y (5) se listan en la Tabla 4.3. Las tendencias de los datos de las otras dos variedades fueron similares

Tabla 4.3. Parámetros de la ecuación de G.A.B. de tres variedades de trigo, a distintas temperaturas. Rango de a_w en el ajuste: 0,30-0,90.

T °C	Variedad								
	1			3			5		
	W_m	C_G	k_G	W_m	C_G	k_G	W_m	C_G	k_G
5	0,089	38,2	0,73	0,094	20,9	0,73	0,088	18,5	0,73
15	0,086	27,0	0,74	0,081	4,8x 10 ⁵	0,77	0,083	17,9	0,75
25	0,086	15,8	0,75	0,078	131,7	0,77	0,070	193,2	0,79

Puede observarse que, en general, y a pesar de que el rango de temperaturas no es amplio, la humedad de monocapa tiende a decrecer con T, mientras que, excepto en la

Secadoras continuas de trigo

variedad 1, el valor de C_G presenta variaciones muy irregulares. A su vez, k_G permanece casi constante. Se verifica, en consecuencia, que las variaciones de C_G y k_G con la temperatura no justifican su interpretación con ecuaciones tipo-Arrhenius como las ec. (4.10) y (4.11).

Comportamiento del parámetro C_G de la ecuación de GAB

A efectos de buscar una explicación al comportamiento de los C_G ajustados, se graficaron curvas de W vs a_w con GAB, usando $W_m = 0,075$ y $k_G = 0,8$ (ambos constantes), variando C_G entre 2 y 100. Esto se muestra en la Figura 4.8

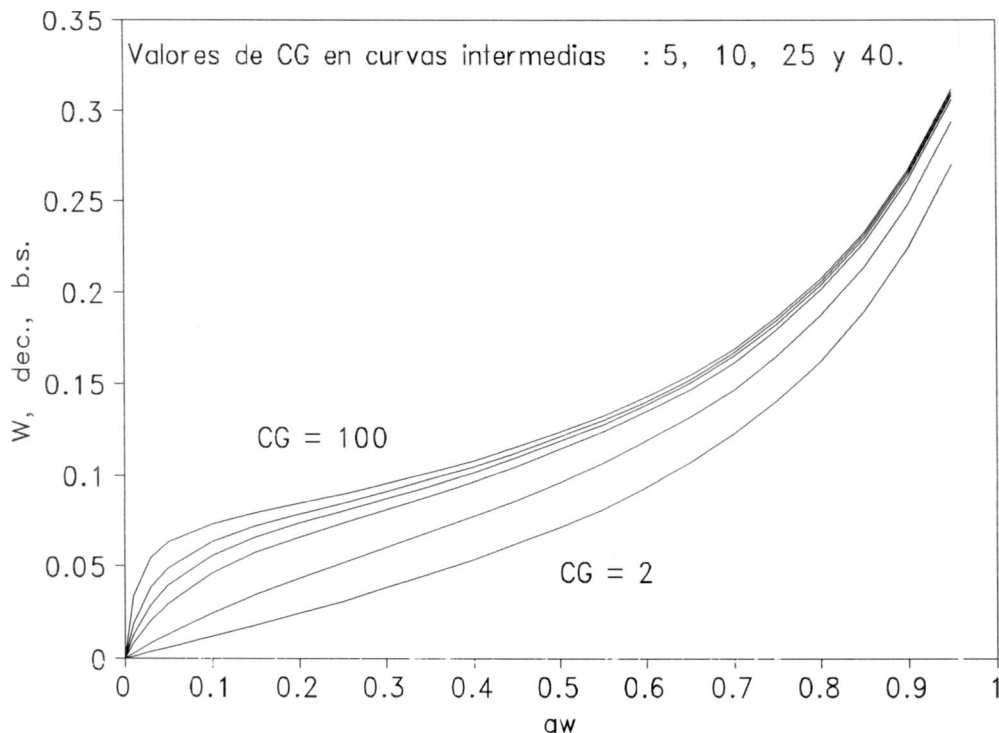


Figura 4.8. Efecto del parámetro C_G en la predicción de la ecuación de GAB para valores constantes de $W_m = 0,075$ y $k_G = 0,8$.

En primer lugar, se observa, como adelantaron Gregg y Sing (1967) que la típica curva sigmoidea se obtiene para $C_G > 2$. Pero también puede verse que, en $a_w > 0,3$, que la predicción se vuelve muy poco sensible a la variación de C_G , cuando sus valores están por encima de 10. Estas son precisamente las condiciones de los datos experimentales a los cuales se ha ajustado GAB: ausencia o escasez de datos a bajas a_w y valores ajustados de $C_G > 10$. Así, si la variación de C_G en ese rango no afecta la predicción, no tendría sentido ajustar sus valores con la temperatura. Los ajustes de C_G de la Tabla 4.3. tuvieron desviaciones estándar mayores que el valor del parámetro (datos no mostrados).

Por otro lado, la Figura 4.8 muestra que el efecto de C_G es notable a bajas a_w (0-0,30), donde se dispone de muy pocos datos experimentales. Obsérvese que la necesidad de ajustar C_G a bajas a_w es una consecuencia de la relación de C_G de GAB con el C_B de BET, y de la relación directa de éste último con el parámetro C_L , de la ecuación de sorción monocapa de Lagmuir. Esta recomendación es una conclusión de este trabajo de tesis. Otra conclusión es que sería posible utilizar la ecuación de GAB sin datos a bajas a_w considerando constante k_G y C_G e interpretando la disminución de la humedad de monocapa con la temperatura usando una expresión de dos parámetros, para obtener así un modelo GAB de 4 parámetros totales, como lo sugiere Young y Corwell (1962).

Botani (1996) ha indicado que las moléculas adsorbidas vibran más intensamente a mayor temperatura, ocupando un área efectiva mayor que reduciría los valores de W_m al incrementarse T.

Secadoras continuas de trigo

Comportamiento del Modelo GAB en actividades acuosas elevadas

Por otro lado, van den Berg (1984) ha indicado que GAB subestima las humedades adsorbidas para $a_w > 0,9$ de manera que no es especialmente recomendable para ese rango. Podrá observarse que, a diferencia de la ecuación de BET, la predicción de W en GAB no tiende a infinito cuando $a_w \rightarrow 1$ (Barreto, 1996), con lo cual no cumpliría con los requerimientos indicados por Parry (1985) (ec. (4.1)). Esta condición sí es cumplida por la expresión de Henderson-Thompson (ec. (4.2)).

Por otra parte, debe reconocerse que en a_w muy elevados (que en trigo sería para $W > 0,30$ dec., b.s., muy poco frecuentes), el mecanismo de retención de agua no obedece a leyes de adsorción sino de capilaridad y, eventualmente, ósmosis (Shatadal y Jayas, 1990). Esto había sido anticipado por Crapiste y colab. (1984), en un trabajo realizado para desarrollar un modelo de secado en estructuras celulares, han indicado que los alimentos vegetales de alto contenido de humedad (alrededor de 70-90% (b.h.)) como frutas y hortalizas, retienen agua no sólo por adsorción a macromoléculas sino por capilaridad en espacios intercelulares y por fuerzas osmóticas en vacuolas intracelulares.

De todas maneras, en semillas de trigo, son muy escasas las situaciones de granos húmedos cosechados con actividades acuosas superiores a 0,90-0,92, reteniendo agua mayormente por adsorción.

La falta de datos experimentales a bajas a_w y distintas temperaturas no permiten establecer, por el momento, una funcionalidad confiable de los parámetros del modelo GAB. Otra complicación es la naturaleza cuadrática del modelo GAB en a_w . Por consiguiente, se considera necesario recurrir a una ecuación fenomenológica, pero precisa y simple como la de Henderson-Thompson (ec. (4.1)), que se utilizará de aquí en más en este trabajo de tesis.

4.4. PRESION DE VAPOR DE AGUA ADSORBIDA

Es conocido que la curva de saturación líquido-vapor p_s (T) vs T representa un fenómeno que puede medirse confinando agua líquida pura en un recipiente al cual se le extrae el aire, y luego se lo termostatiza a distintas temperaturas.

Si en ese recipiente se colocaran granos húmedos en lugar de agua, la presión medida en cada temperatura luego de alcanzarse el equilibrio será p_v y no p_s . Si se reescribe la ecuación de Henderson-Thompson (ec. (4.2)) resuelta para a_w , se tiene:

$$a_w = \frac{p_v}{p_s} = 1 - \text{EXP}[-k_{HT} (T + C_{HT}) (100 W)^M] \quad (4.12)$$

La ecuación muestra que p_v puede calcularse en función de T y W. Pasando p_s al miembro derecho se encuentra que la ecuación de isoterma pasa a ser un multiplicador menor que 1 de la presión de saturación. La Figura 4.9 muestra la p_v de granos de trigo duro en función de la temperatura, para varias humedades de grano en equilibrio, junto a la curva de presión de saturación líquido-vapor de agua pura, p_s (curva superior)

A bajas humedades de grano, la presión p_v resulta considerablemente menor a p_s pero la diferencia disminuye al aumentar W a punto tal que para $W > 0,25-0,30$, el valor de p_v se vuelve prácticamente igual a p_s , pues de ese nivel de humedades el agua adsorbida en el grano se comporta prácticamente como agua pura.

Este comportamiento se ve reflejado en una propiedad característica del equilibrio líquido-vapor de agua adsorbida y de fundamental importancia en cálculos de secado: el calor de sorción L_g .

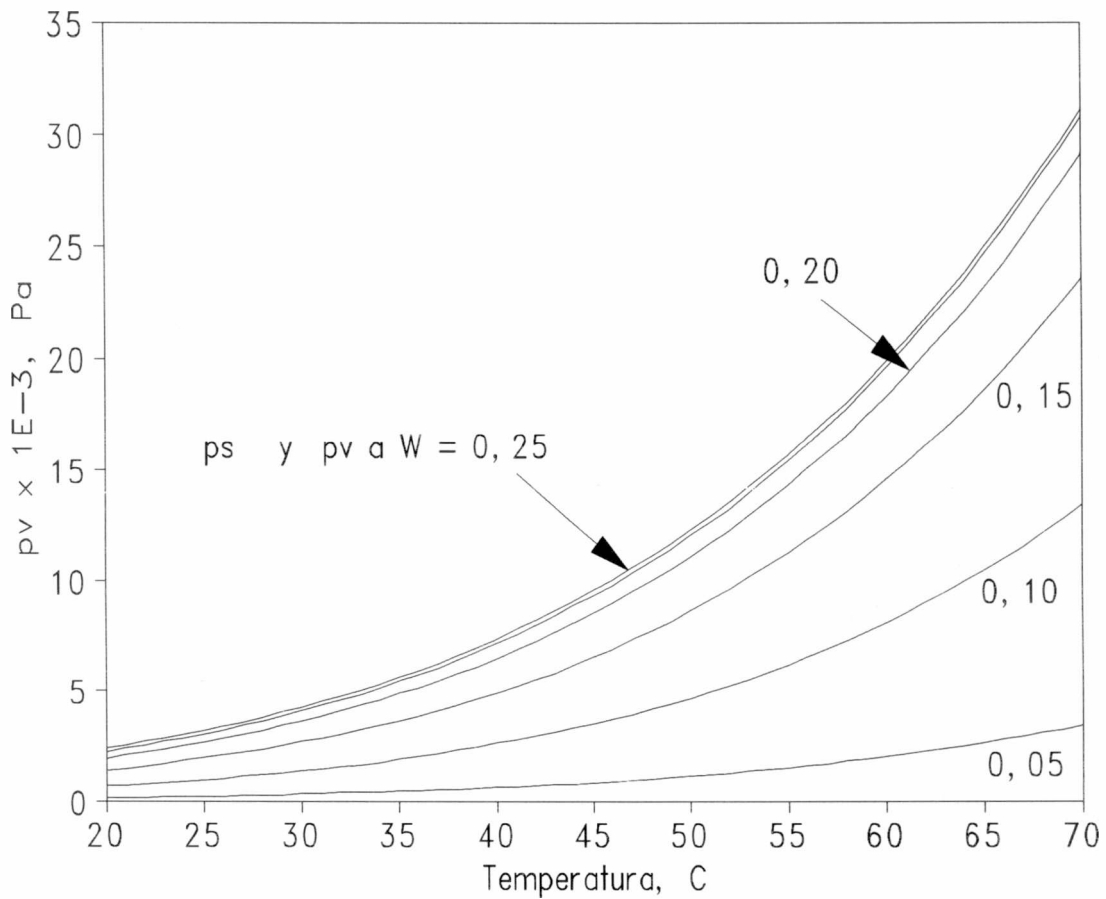


Figura 4.9. Presión de vapor de agua adsorbida en trigo duro en función de la temperatura, a distintas humedades de grano. La curva superior corresponde a la presión de saturación de agua pura. Nota: 1E-3 \equiv 1 x 10⁻³.

4.5. CALOR DE SORCION DE AGUA ADSORBIDA

4.5.1. Método de Clapeyron-isoterma de sorción

Se había visto en el capítulo 3, que el calor de vaporización podía calcularse en función de la temperatura por medio de la ecuación de Clapeyron :

$$L_w = \frac{R T_k^2}{M_v} \frac{d \text{Ln } p_s}{d T_k} \quad (4.13)$$

que resultaba en un decrecimiento suave del L_w con la temperatura. Ratti (1991) ha mostrado que la ec. de Clapeyron puede usarse también para agua adsorbida:

$$L_g = \frac{R T_k^2}{M_v} \left(\frac{d \text{Ln } p_v}{d T_k} \right)_w \quad (4.14)$$

Si ahora se reemplaza p_v en la ec. (4.14) por $a_w p_s$, la expresión resulta:

$$L_g = \frac{R T_k^2}{M_v} \left[\frac{d \text{Ln } p_s}{d T_k} + \left(\frac{d \text{Ln } a_w}{d T_k} \right)_w \right] \quad (4.15)$$

que puede reescribirse de manera más simple como:

$$L_g = L_w + \frac{R T_k^2}{M_v} \left(\frac{d \text{Ln } a_w}{d T_k} \right)_w \quad (4.16)$$

para encontrar que el calor de sorción del agua en granos está compuesto por el calor de vaporización de agua pura (L_w) más un término debido a la energía adicional de atracción entre las moléculas de agua y los componentes de la materia seca higroscópica del grano. Ese término resulta de la isoterma de sorción. Calculando la $d \text{Ln } a_w / d T$ en base a la forma ec. (4.12) de la isoterma de Henderson-Thompson, se obtiene:

$$\left(\frac{d \text{Ln } a_w}{d T} \right)_w = \frac{k_{HT} (100W)^N \text{Exp}[-k_{HT} (T + C_{HT}) (100W)^N]}{1 - \text{exp}[-k_{HT} (T + C_{HT}) (100W)^N]} \quad (4.17)$$

Podrá verse que la expresión del L_g (ecs (4.16) y (4.17)) presenta un primer término (L_w) que depende sólo de T y otro, resultante de la isoterma, que varía con W y T .

La gráfica del calor de sorción L_g en función del contenido de humedad del grano, para varias temperaturas, se observa en la Figura 4.10.

Secadoras continuas de trigo

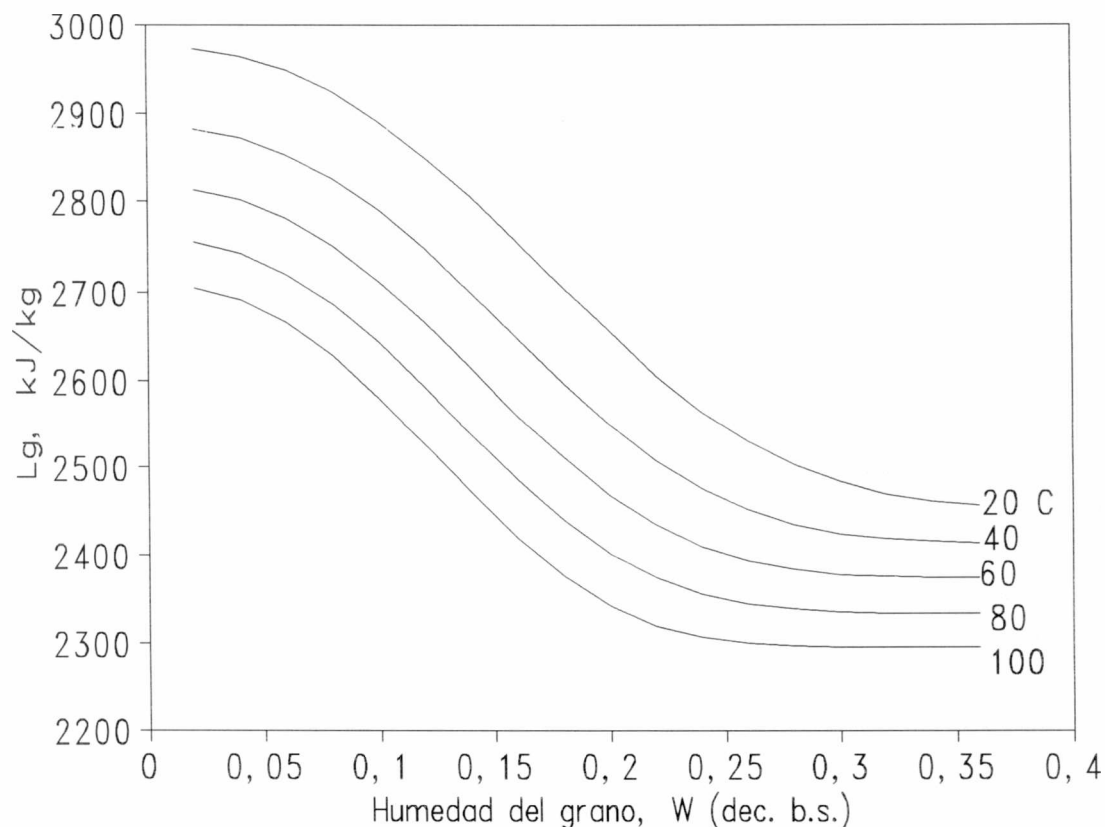


Figura 4.10. Calor de sorción en granos de trigo duro, en función del contenido de agua, a distintas temperaturas.

En cada curva predicha, puede verse que el calor de sorción decrece con la humedad del grano, tendiendo a un valor constante representado por el calor de vaporización del agua pura a la temperatura correspondiente; se observa en la Fig. 4.10 que L_g tiende a L_w en el mismo rango de humedad en el que p_v tendía a p_s (Figura 4.9), lo cual correspondería a las "multicapas lejanas al adsorbente" del modelo GAB. En la Figura 4.10, cuando W disminuye, L_g crece por encima de L_w , pero el incremento se atenúa, cambia la concavidad a humedades más bajas, y tiende a otra asíntota superior. Aquí se interpreta que ese valor

asintótico, a pesar de no haber sido predicho en base a la isoterma GAB, estaría asociado al calor de sorción monocapa. Se observa, asimismo, que el punto de inflexión de la curva L_g vs W se corre hacia humedades menores a medida que aumenta la temperatura, en congruencia con el descenso observado de W_m con T en la Tabla 4.2. A los efectos prácticos, el L_g máximo resulta ser 20% superior al calor de vaporización del agua pura. Otra observación que puede hacerse es que el L_g medio de una masa de granos no puede variar mucho durante el secado pues el grano reduce su humedad, lo que haría aumentar el L_g , pero aumenta su temperatura, lo cual tiende a reducirlo.

4.5.2. Comparación del Método Clapeyron-Isoterma de sorción con el de Othmer

Hasta el presente, los modelos de simulación de secadoras de granos no utilizan habitualmente los modelos de L_g tipo Clapeyron-Isoterma de sorción (C-IS) (ecs. (4.16) y 4.17)) sino una expresión empírica de ajuste propuesta por Gallaher (1951) para interpretar los datos de L_g obtenidos por el método de Othmer (1940).

Othmer (1940) ha mostrado que, a humedad de grano constante, la representación de $\ln p_v$ en función del $\ln p_s$ para un rango de temperaturas da lugar a un comportamiento lineal cuya pendiente es L_g/L_w . Los datos de p_v pueden ser experimentales, medidos por un método higrométrico, o bien generados a partir de ecuaciones de isothermas de sorción. La deducción del método de Othmer surge directamente de la aplicación de las ecuaciones de Clapeyron a agua adsorbida y pura:

Secadoras continuas de trigo

$$\frac{d \ln p_v}{d T_k} = \frac{L_g}{R T_k^2}$$

$$\frac{d \ln p_s}{d T_k} = \frac{L_w}{R T_k^2} \quad (4.18)$$

si las expresiones se dividen miembro a miembro y el resultado se integra en función de la temperatura asumiendo *que el cociente L_g/L_w no varía con T* , se encuentra:

$$\ln p_v = C + \frac{L_g}{L_w} \ln p_s \quad (4.19)$$

que representa la recta mencionada para W constante, llamada isóstera. Como se ha indicado, los calores de sorción L_g obtenidos por este método suelen ser vinculados a la humedad por medio de la ecuación de Gallaher (1951):

$$\frac{L_g}{L_w} = [1 + A_G \text{EXP} (- B_G W)] \quad (4.20)$$

Esta ecuación divide la funcionalidad $L_g = L_g (T, W)$ en una función de T , contenida en L_w y otra de W , de tipo empírico. Gallaher (1951) obtuvo $A_G = 23$ y $B_G = 40$ para trigo, valores que se han utilizado extensivamente en modelado del secado, como se ha indicado en la revisión de Nellist y Bruce (1995). Estos autores presentan una tabla de coeficientes de la ecuación de Gallaher para distintos granos, tomada de un trabajo de Cenkowski y colab (1990), quienes ajustaron nuevos coeficientes discriminando por tipos de trigo. Por ejemplo, para trigo duro, los valores informados son $A_G=1,7$ y $B_G=17,6$. Se ha indicado que la ec. (4.20) no debe usarse para valores de W menores que 0,10.

Siempre que A_G y B_G sean > 0 , el valor L_g tenderá al L_w a valores suficientemente altos de W y al valor $\{ L_w (1 + A_G) \}$ para $W \rightarrow 0$. Por ejemplo, con los coeficientes originales de Gallaher (1951) para trigo, el L_g de la ec. (4.20) tendería a ser 24 veces mayor

que el L_w en $W \rightarrow 0$, mientras que con los valores de Cenkowski y colab. (1990) "sólo" sería 2,7 veces mayor.

Esa incertidumbre a humedades bajas sería la razón de limitar su validez a humedades de grano menores que 0,10. La comparación de ambas expresiones de Gallaher con las del método Clapeyron-Isoterma de sorción propuesto en este trabajo (ecs. (4.16) y (4.17)) se muestra a 20°C en la Figura 4.11.

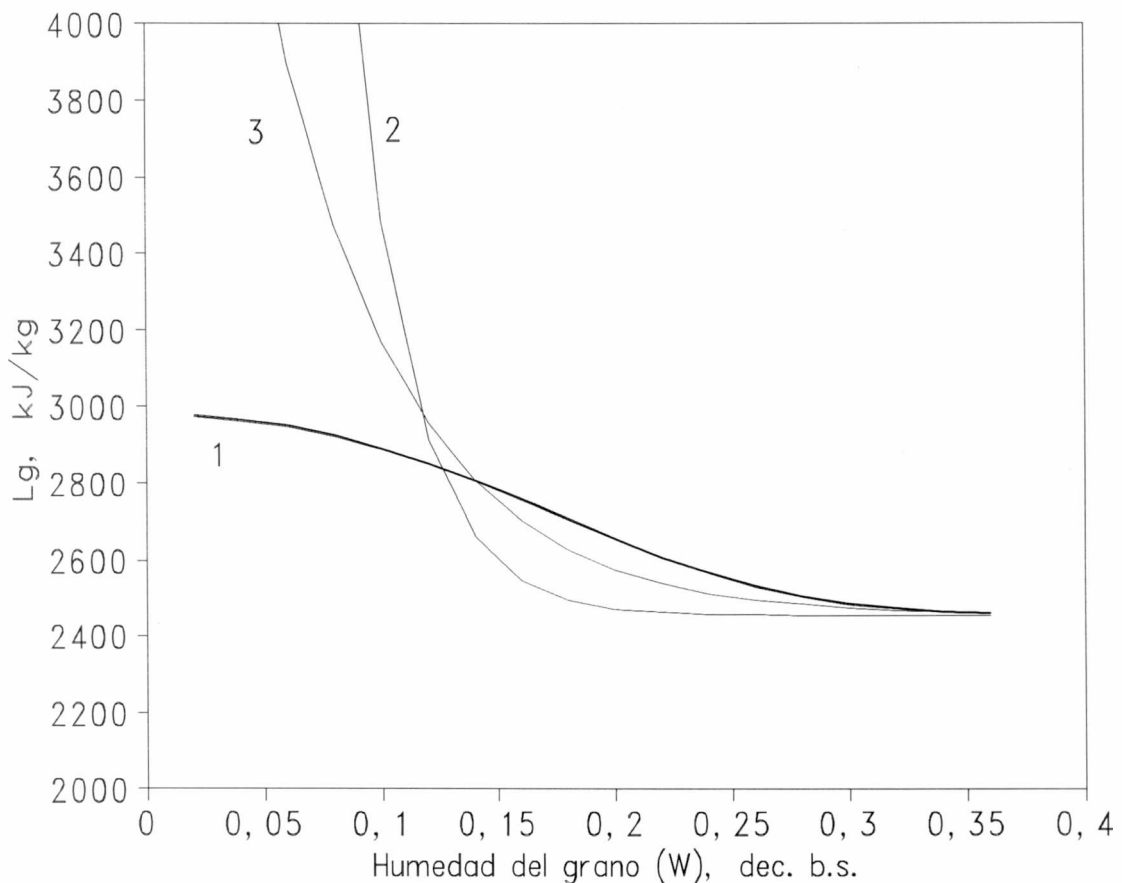


Figura 4.11. Calores de sorción predichos a 20° C con el método Clapeyron-Isoterma de sorción para trigo duro (curva 1), ecuación de Gallaher (1951) para trigo (curva 2) y ecuación de Gallaher para trigo duro (curva 3).

Secadoras continuas de trigo

Puede observarse que las tres predicciones tienden a un valor común, L_w , a humedades altas, mientras que en valores bajos, el método C-IS desarrollado aquí muestra un valor de L_g de no más de 1,2 veces L_w (curva 1), mientras que las dos versiones de Gallaher: original (curva 2), y reajustada (curva 3), tienden a valores desproporcionadamente elevados de L_g , mucho más evidente en la curva 2. Investigaciones preliminares en sorción de maíz, donde se empleó la ecuación de GAB, mostraron que el método C-IS daba valores asintóticos de $L_g \approx 1,3 L_w$ a bajas humedades, en el orden de los obtenidos aquí con las ecs. (4.16) y (4.17).

Es de destacar que si bien se da un límite inferior razonable para el uso de la ecuación de Gallaher, éste inevitablemente no se observa en la simulación del secado en lechos fijos con aire caliente. En tales sistemas, una humedad final de lecho de 0,14 es promedio de un perfil cuyos valores extremos pueden alcanzar, por ejemplo: 0,06 y 0.18 (Nellist, 1987). En consecuencia, el uso de la ec. de Gallaher puede aumentar las demandas de energía calculadas y los tiempos de secado predichos.

Debe indicarse, no obstante, que el aumento pronunciado de la predicción de la ec. de Gallaher (ec. 4.20) a bajas humedades se deben exclusivamente a esta ecuación y no al método de Othmer de obtención de los L_g .

Como conclusión, los métodos Clapeyron-isoterma de sorción (ecs. 4.16-4.17) resultan más confiables para el cálculo del calor de desorción de agua en granos, especialmente en la zona de humedades bajas, pues, siempre que la isoterma usada sea sigmoidea (GAB o no GAB), dan resultados congruentes con la teoría clásica de sorción.

De todas formas, es necesario confirmar estas observaciones con una mayor cantidad de datos experimentales de equilibrio sorcional medidos a bajas a_w y distintas temperaturas.

4.6. ISOTERMAS DE CEREALES Y OLEAGINOSAS

Si bien el presente capítulo se ha centrado mayormente en trigo, cereal que constituye el objeto de este trabajo de tesis, se considera útil presentar una comparación de la isoterma de trigo duro a 25°C, representativa de la de los cereales (Chirife y colab., 1985), con las isotermas de oleaginosas como soja (20% de aceite) y girasol (40-50% de aceite) (Giner y colab., 1994). La isoterma de soja se calculó con la ecuación de Henderson-Thompson (ec. (4.2)), con coeficientes listados por Brooker y colab. (1992), mientras que para girasol, se utilizó una versión de la ecuación de BET modificada por Rovedo y colab. (1993). Las curvas se presentan en la Figura 4.12, donde se observa que, a igual a_w , las humedades adsorbidas decrecen con el aumento del contenido de aceite.

Puede observarse que para actividades acuosas bajas a intermedias, los cereales adsorben mayor cantidad de agua que las oleaginosas. Chirife y colab. (1985) han indicado que el efecto es aparente, pues en la base seca de las oleaginosas está involucrado el aceite, que no es higroscópico, y que, si las curvas de oleaginosas se calcularan en base seca libre de aceite, el trazo tendería a coincidir con las de los cereales. De todas formas, tanto los métodos de estufa como los métodos rápidos de medición de humedad capacitiva dan valores sobre base total (seca o húmeda), de manera que debe recordarse que las humedades de seguridad son más bajas para oleaginosas.

Obsérvese que, para $a_w = 0,7$, las humedades de seguridad para girasol y soja son de aproximadamente 0,08 y 0,13 decimal, base seca, correspondiente a valores base húmeda de 7,4, y 11,5%, respectivamente, bastante menores a las de los cereales.

Secadoras continuas de trigo

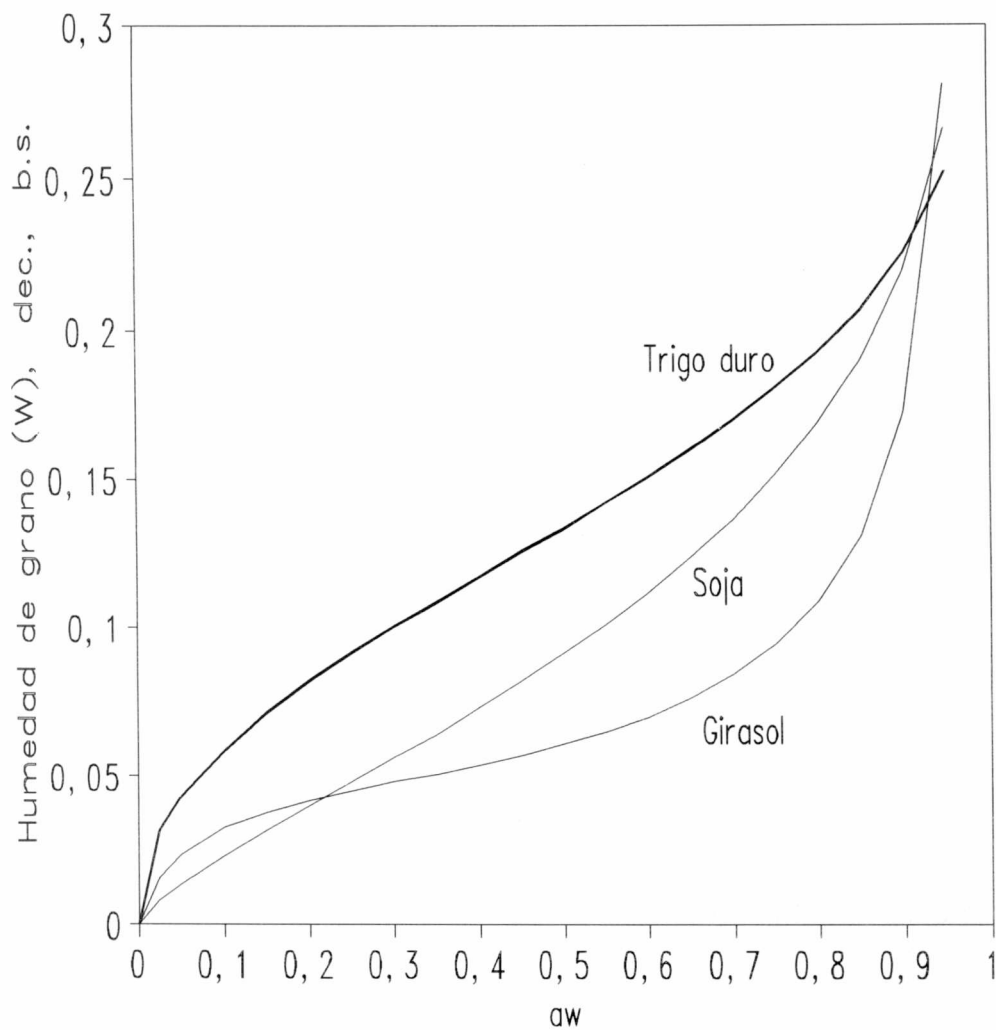


Figura 4.12. Isotermas de cereales (trigo duro) y oleaginosas: soja y girasol (las tres a 25°C). Las dos primeras fueron calculadas con la ecuación de Henderson-Thompson, con los correspondientes parámetros, mientras que para girasol se usó una versión de GAB modificada por Rovedo y colab. (1993).

APENDICE

Datos de a_w de soluciones salinas saturadas a distintas temperaturas (Hall, 1971).

Sal	Temperatura, °C	a_w , decimal
LiCl * No usar a T < 18°C.	20	0,112
	25	0,112
	30	0,112
	37,8	0,112
LiCl.H ₂ O	0	0,147
	20	0,124
	30	0,118
	40	0,116
	50	0,114
K CH ₃ COO	20	0,232
	25	0,227
	30	0,220
	37,8	0,204
MgCl ₂	22,8	0,329
	30	0,324
	37,8	0,319
MgCl ₂ .6H ₂ O	0	0,350
	20	0,336
	30	0,328
	40	0,321
	50	0,314
K ₂ CO ₃	20	0,439
	25	0,438
	30	0,436
	37,8	0,434
Na NO ₂	20	0,653
	25	0,643
	30	0,633
	37,8	0,618
NaCl	0	0,749
	20	0,755
	30	0,756
	40	0,754
	50	0,747
(NH ₄) ₂ SO ₄	0	0,837
	20	0,806
	30	0,800
	40	0,796
	50	0,791
NH ₄ H ₂ PO ₄	20	0,932
	25	0,926
	30	0,920
	37,8	0,911
K ₂ SO ₄	0	0,991
	10	0,979
	20	0,972
	30	0,966
	40	0,962
	50	0,958

CAPITULO 5. ANALISIS PRELIMINAR DEL SECADO DE ALIMENTOS

CAPITULO 5. ANALISIS PRELIMINAR DE SECADO DE ALIMENTOS

5.1. INTRODUCCION

La determinación de parámetros cinéticos de granos individuales de trigo en base a mediciones de curvas de "secado en capa delgada", es necesaria para la posterior utilización de los mismos en el modelado de lechos fijos y secadoras continuas. Esa determinación requiere analizar la teoría del secado, especialmente el mecanismo controlante, para seleccionar los modelos más apropiados de grano individual. Se preferirán soluciones analíticas simplificadas y con significado físico.

Es conocido que el secado de granos ocurre en el *Período de Velocidad Decreciente de Secado (PVDS)* (Parry, 1985); se considera útil, y es el objetivo de este capítulo, realizar un análisis preliminar que establezca una continuidad temática entre la evaporación de agua pura y el secado de sólidos muy húmedos analizado inicialmente en capítulo 3 para el *Período de Velocidad Constante de Secado (PVCS)* y el secado de granos (materiales de relativamente baja humedad). Se analizará, en particular, el concepto de "resistencia interna" en el secado, en base al número de Biot para la transferencia de materia, que, se considera, puede contribuir al entendimiento del fenómeno de secado, expuesto en la literatura previa (Desrosier, 1959; Van Arsdel, 1963; Nonhebel y Moss, 1979; Brennan y colab., 1981; Heldman y Singh, 1981, Mujumdar y Menon, 1995; Crapiste y Rotstein, 1997).

5.2. RESULTADOS Y DISCUSION

5.2.1. Velocidad de secado constante en un sólido

Hacia el final del capítulo 3, se había indicado que la ecuación de la velocidad de

Secadoras continuas de trigo

secado de sólidos durante el *Período de Velocidad Constante de secado* (PVCS) era análoga a la de evaporación desde un espejo de agua:

$$VS = -\frac{dW}{dt} = \frac{h_T(T_a - T_{bh})}{\rho_{s0} L_{wbh} d} = \frac{k_p(P_{vs} - P_{va})}{\rho_{s0} d} \quad (5.1)$$

donde se observa que la velocidad de secado (VS) es proporcional a la diferencia de las temperaturas de bulbo húmedo y seco o de presiones de vapor entre superficie del sólido y seno del aire (mayor diferencia implica menor humedad relativa) y al coeficiente de transferencia de calor o materia (h_T o k_p). Estos últimos dependen, fundamentalmente, de la geometría de la pieza a secar y la velocidad del aire (Crapiste y Rotstein, 1997). La VS resulta inversamente proporcional a la densidad de materia seca (referida al volumen inicial), al espesor o semiespesor de la pieza (d) y al calor de vaporización L_{wbh} que, en este PVCS, se asume que debe ser calculado a la temperatura de bulbo húmedo (T_{bh}) del aire, que prevalece en la superficie evaporativa.

La velocidad de secado (miembro izquierdo) permanecerá constante siempre que lo hagan las condiciones del aire, y requerirá que la actividad acuosa se mantenga constante en la superficie del sólido, lo que, como se verá a posteriori, sólo puede ocurrir cuando es muy próxima a 1, manteniendo así las características esenciales de la evaporación de agua pura. Asimismo, la VS será constante sólo si la pieza no se encoge (" d " constante).

En consecuencia, que el mecanismo controlante de la velocidad de secado es externo y los perfiles de humedad dentro del sólido se consideran planos, aunque no constantes en el tiempo.

5.2.2 Curvas experimentales de secado de un alimento de alta humedad

Curva Humedad - tiempo (W vs t)

En el capítulo 3, se había mostrado la Figura 3.12, donde se representaban datos experimentales de W vs t presentados hacia el final del capítulo 3 para rodajas de zanahoria de 4,5 mm de espesor aproximado, con una humedad inicial medida de $M_0 = 0,864$ (b.h.), equivalente a una $W_0 = 6,334$ kg agua/kg sólido seco. El secado se había desarrollado a 70°C , con una h_r de 0,06 ($T_{bh} \approx 29^\circ\text{C}$). Se había mostrado que una recta ajustada a los primeros tres puntos daba buena aproximación hasta unos 35-40 min de secado; esto representaría, aparentemente, la duración del período de velocidad constante. La humedad mínima del PVCS había resultado, según la Figura 3.12, de unos 3,5 kg agua/kg sólido seco.

Curvas de velocidad de secado y determinación de humedad crítica

Utilizando los datos experimentales W vs t de la Figura 3.12, se pueden estimar las velocidades de secado como cocientes de incrementos:

$$VS \equiv -(dW/dt)_{t+\Delta t/2} \approx -(W_{t+\Delta t} - W_t)/\Delta t.$$

que pueden graficarse, frente al tiempo central del intervalo: $t+\Delta t/2$ (Figura 5.1) o la humedad (Figura 5.2) (Nonhebel y Moss, 1979; Crapiste y Rotstein, 1997).

La Figura 5.1 muestra que la velocidad de secado caería a partir de los 15 minutos de operación, no a los 35-40 min que podían estimarse en la Figura 3.12. Debe indicarse que el PVCS, puede ser aparente, no real, como promedio de un ligero crecimiento inicial de la VS - debido al precalentamiento del material a una temperatura similar a la T_{bh} -, seguido por el decrecimiento causado por reducción de la presión de vapor superficial.

Secadoras continuas de trigo

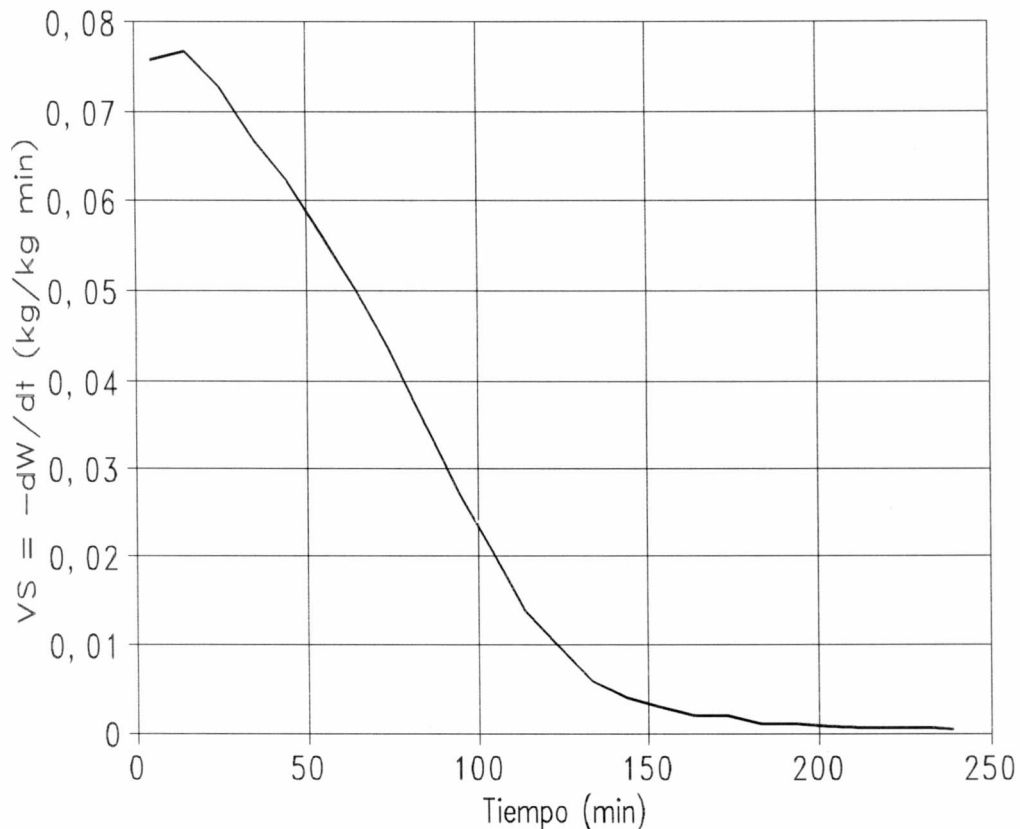


Figura 5.1. Velocidad de secado experimental en función del tiempo para los cortes de zanahoria. Temperatura de aire: 70°C, humedad relativa: 0,06 ($T_{bh} \approx 29^\circ\text{C}$)

La Figura 5.2 permite representar los datos de VS experimental frente a la humedad, obteniéndose la clásica curva utilizable para identificar mecanismos de secado.

Es conveniente leer esta figura de derecha a izquierda para "seguir" la evolución de la humedad. Así, se aprecia un período inicial de VS aparentemente constante. Obsérvese que la fracción de humedad removida en el PVCS respecto de la total (Figura 5.2) es mayor que la proporción de la duración del PVCS respecto al tiempo total de secado (Figura 5.1), puesto que en los minutos iniciales se evapora una cantidad de humedad considerable.

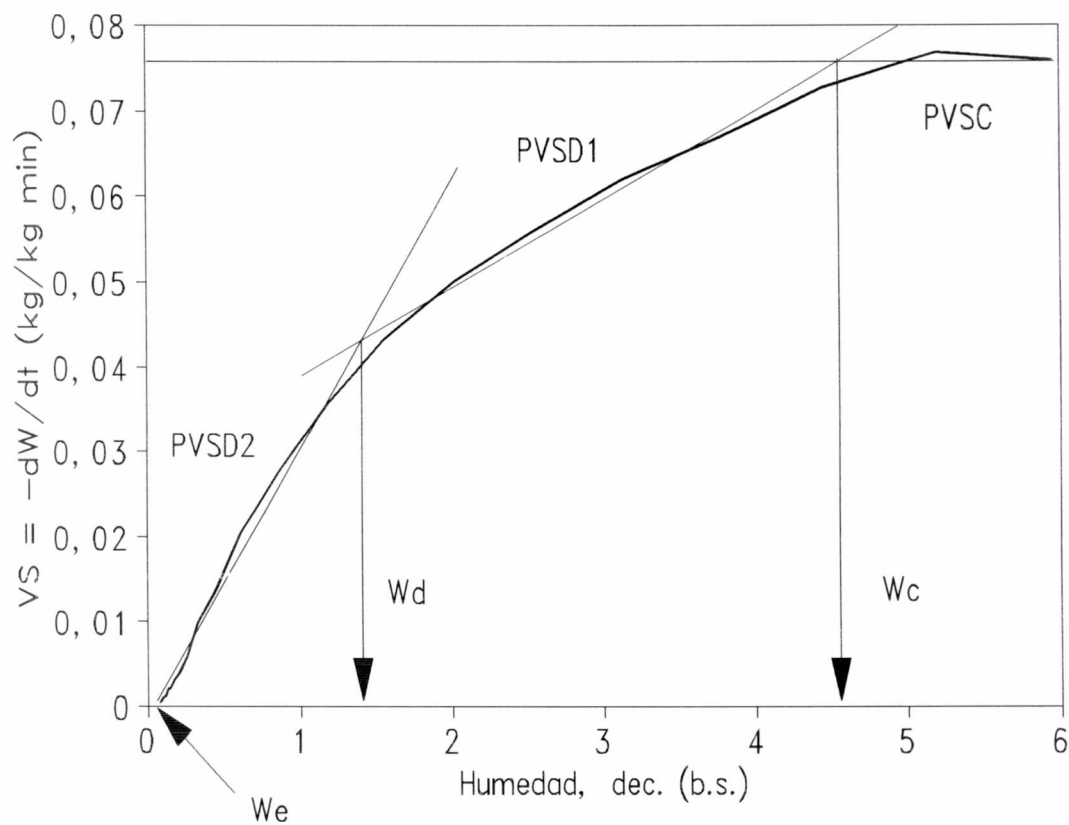


Figura 5.2. Velocidad de secado experimental en función del contenido de humedad medio del corte de alimento. Condiciones de la Figura 5.1.

La velocidad de secado comienza luego a disminuir en forma continua, existiendo, aparentemente, dos pendientes distintas en la fase decreciente de la curva $-dW/dt$ vs W : la primera barre el rango de humedades de aproximadamente 4,6 a 1,4 y la segunda, desde el último valor hasta el final del secado. Ambos subperíodos conforman el denominado *Período de Velocidad de Secado Decreciente (PVDS)* (Mujumdar y Menon, 1995). Esta figura muestra una forma aproximada de estimar la humedad mínima aparente del PVSC, denominada *Humedad Crítica (W_c)*, en este caso de unos 4,6 kg/kg , y la de cambio de subperíodo decreciente o "segunda humedad crítica" (W_d : 1,4 kg/kg).

Secadoras continuas de trigo

5.2.3. Estimación de la duración del Período de Velocidad Constante de Secado (PVCS)

Asumiendo que se presenta un PVCS, se puede integrar la velocidad de secado (ec. (5.1.)) entre la humedad inicial (W_0) y la crítica W_c :

$$-\int_{W_0}^{W_c} dW = \left[\frac{h_T(T_a - T_{bh})}{\rho_{s0} L_{wbh} d} \right] \int_0^{t_c} dt \quad (5.2)$$

para obtener t_c , tiempo de duración del PVCS:

$$t_c = \frac{(W_0 - W_c) \rho_{s0} L_{wbh} d}{h_T(T_a - T_{bh})} \quad (5.3)$$

que se asemeja a la del tiempo de evaporación de agua pura (capítulo 3).

La expresión equivalente del t_c usando la ecuación de transferencia de materia da:

$$t_c = \frac{(W_0 - W_c) \rho_{s0} d}{k_p(p_{sbh} - p_{va})} \quad (5.4)$$

Así, la duración del PVCS, aparente en el caso de zanahorias, *depende linealmente de la dimensión característica* de la pieza que se seca, y de la humedad removida durante tal período ($W_0 - W_c$).

Si el PVCS fuera importante respecto al tiempo total de secado, se podría mejorar la velocidad de secado aumentando la temperatura de bulbo seco del aire (T_a), aprovechando que la superficie se mantendría a T_{bh} , que si bien crece con el aumento de T_a , lo hace en mucho menor medida. Este concepto se aplica en secado spray de alimentos líquidos (Masters, 1991), donde la mayor parte del agua de las microgotas/micropartículas se evapora en un "pseudo" PVCS (no es un PVCS convencional pues la gota reduce su tamaño durante el secado). Sin embargo, no es posible lograr que el PVCS se mantenga por ningún período

considerable en alimentos sólidos naturales. La explicación podría basarse en la existencia de condiciones que impiden mantener una alta humedad superficial. Para estudiar las razones del cambio de mecanismo, se planteará un modelo difusivo y se analizará el número de Biot de transferencia de materia.

5.2.4. Mecanismos controlantes al pasar la velocidad de secado de constante a decreciente

5.2.4.1. Análisis del concepto de Humedad crítica en secado de alimentos

La literatura clásica de secado (Nonhebel y Moss, 1979; Mujumdar y Menon, 1995) suele representar el período de velocidad constante de secado como un lapso de tiempo durante el cual la "resistencia externa" a la transferencia de materia, que estaría representada por la inversa del coeficiente de transferencia de materia aire-partícula, controla la velocidad de evaporación del agua desde el material hacia la fase aire. De esta forma, la "resistencia interna", una noción algo vaga que aparece en libros clásicos (Nonhebel y Moss, 1979) permitiría un flujo tan rápido de agua hacia la superficie como lo demande la "lenta" resistencia externa.

Esta descripción ha sido utilizada para explicar la existencia de un PVCS más o menos prolongado en numerosos ensayos experimentales de secado de materiales inorgánicos o no-biológicos (Green y Maloney, 1984).

En los textos citados, se indica que una vez que la humedad cae por debajo de la "humedad crítica", la "resistencia interna" comienza a crecer haciéndose comparable con la externa, lo que explicaría el comportamiento del denominado primer período de velocidad decreciente de secado, para luego aumentar más todavía, haciéndose controlante y dando lugar al denominado segundo período de velocidad decreciente de secado (Figura 5.2).

Secadoras continuas de trigo

Crapiste y Rotstein (1997) indican que en muchos casos, los alimentos no presentan un PVCS y la humedad crítica no está bien definida (estrictamente, este concepto podría aplicarse a los datos de la Figura 5.2). Zogzas y Maroulis (1996) presentan un gráfico del secado de rodajas de papa, otro alimento de alta humedad, para $T_a = 60^\circ\text{C}$, $h_r = 0,32$ y alta velocidad de aire (2,1 m/s) en el que se observa un incremento inicial de la VS seguido de un decrecimiento, comportamiento similar al de la Figura 5.2. En granos de cacao (Daud y colab., 1996), un alimento con $W_0 = 1,2$, se observa un ascenso inicial muy lento de la velocidad de secado y un posterior descenso lento, que denotaría la inexistencia de un PVCS.

En este sentido, Crapiste y Rotstein (1997) agregan que es posible hablar de la existencia de un pseudo período de velocidad constante causado por factores que afectan de forma opuesta la VS como el precalentamiento inicial a una temperatura similar a la T_{bh} , el secado de la superficie y el encogimiento. Estos autores indican que la VS, aproximadamente constante, que puede alcanzarse, es inferior a la de evaporación desde un espejo de agua pura de geometría similar.

Nonhebel y Moss (1979) han presentado una colección de ensayos experimentales de secado de materiales no-biológicos donde muestran que la humedad crítica (W_c) disminuye, es decir, el período de velocidad de secado constante (PVCS) se "prolonga" (en intervalo de humedad removida respecto del total), cuando las condiciones de secado son moderadas y que W_c aumenta, es decir, el PVCS se "acorta", cuando las mismas son más drásticas.

Green y Maloney (1984) indican la existencia de varios factores que contribuyen a la drasticidad de un grupo de condiciones operativas de secado: alta velocidad y temperatura de aire, baja humedad relativa, y espesores considerables de sólido. Así, el mantenimiento del PVCS dependerá de que no se formen gradientes significativos en el material, para evitar el brusco secado superficial.

Se reitera lo indicado hacia el final del capítulo 3: el PVCS, real o aparente, existirá en tanto y en cuanto la presión de vapor del material en la superficie se mantenga constante lo que, en virtud de la forma de las isotermas de sorción (capítulo 4), sólo puede tener lugar

Análisis preliminar del secado de alimentos

cuando el contenido de humedad se reduce sin disminuir la actividad acuosa superficial a_{ws} . Esto sólo puede ocurrir cuando la $a_{ws} \approx 1$, esto es, mientras la presión de vapor del agua en la superficie del sólido p_{vs} , se mantenga muy próxima a la del agua pura, p_s .

Se ha visto en la Figura 5.2. que la W_c de las rodajas de zanahoria era de unos 4,6 kg agua/kg sólido seco, por debajo de la cual la velocidad de secado comenzaba a decrecer sostenidamente. En este sentido, sería interesante conocer el valor de a_w para esa humedad crítica. Con este fin, se graficó la zona de altas a_w de la isoterma de sorción de zanahorias, usando el modelo de Ratti (1991), con parámetros para zanahorias, a la temperatura de bulbo húmedo de la experiencia de la Figura 5.2. (29°C). Esto se muestra en la Figura 5.3.

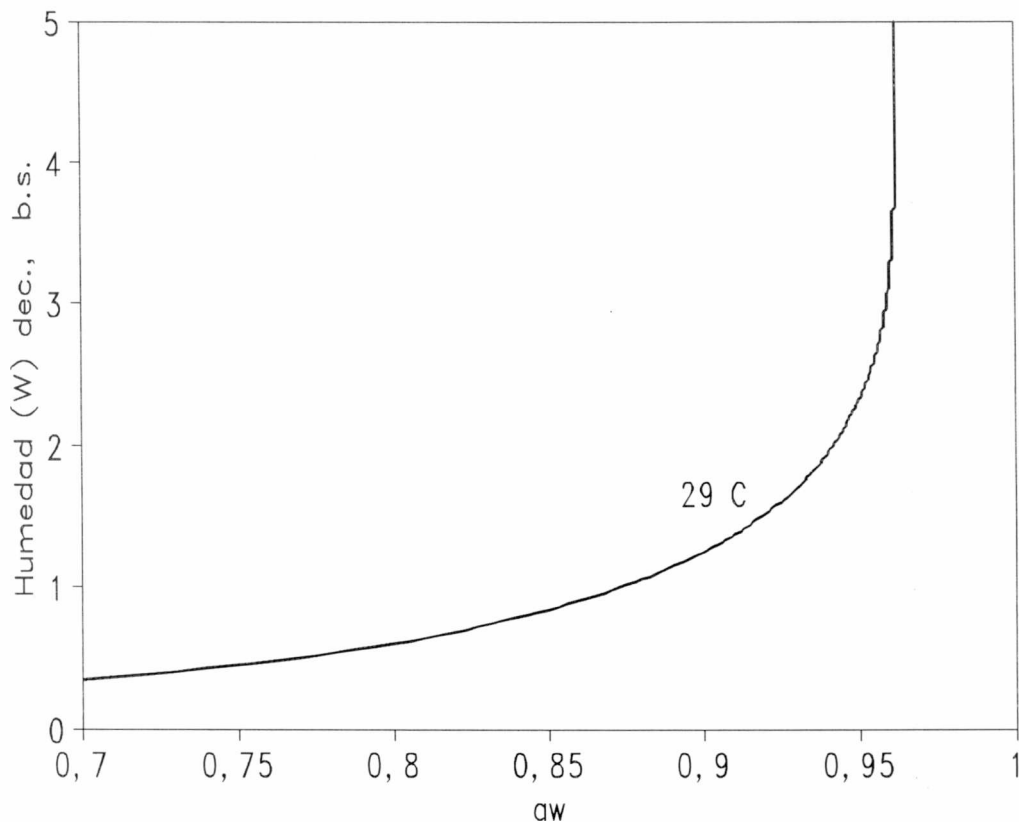


Figura 5.3. Rango de altas a_w para la isoterma de sorción de zanahorias a 29°C (modelo de Ratti (1991)).

Secadoras continuas de trigo

La Figura 5.3 muestra que la humedad decrece hasta aproximadamente 3 kg/kg manteniendo una a_{ws} constante de $\approx 0,96$, esto es, a una p_{vs} constante de $0,96 p_s$. Ese valor de 3 kg/kg sería, en consecuencia, la mínima W_c que podría lograrse en una pieza que se secara casi sin gradientes, donde la humedad superficial fuera similar a la promedio en el espesor. En el corte de 4,5 mm, es evidente entonces que el valor de W_c de 4,6 kg/kg (Figura 5.2) surge por la existencia de gradientes importantes, siendo un valor promedio de menores valores en la superficie (quizás menores de 3 kg/kg) y valores todavía iniciales de 6,3 kg/kg en el centro de la pieza.

5.2.4.2. Análisis del cambio de mecanismo de secado, de velocidad constante a decreciente, en términos de resistencias al flujo de agua.

A efectos ilustrativos, se puede considerar que el período de velocidad decreciente de secado de un alimento de alta humedad puede modelarse asumiendo secado isotérmico a la temperatura del aire. En tales condiciones puede plantearse una ecuación difusiva de geometría plana para una dimension característica promedio y un coeficiente de difusión efectivo "D" independiente de la humedad; la expresión es (Crank, 1975):

$$\frac{\partial W_l}{\partial t} = D \frac{\partial^2 W_l}{\partial x^2} \quad (5.5)$$

donde x es la coordenada en la dirección de flujo de agua y W_l la humedad local en el interior de la pieza. A los efectos de la integración, las siguientes condiciones iniciales y de contorno son habituales:

$$\begin{aligned}
 t = 0 \quad W_1 &= W_0 & 0 \leq x \leq d \\
 x = 0 \quad \frac{\partial W_1}{\partial x} &= 0 & t > 0 \\
 x = d \quad (a) \quad -\rho_{s0} D \frac{\partial W_s}{\partial x} &= k_p (p_{vs} - p_{va}) & t > 0 \\
 x = d \quad (b) \quad W_s &= W_e & t > 0
 \end{aligned} \tag{5.6}$$

donde $W_s \equiv W_1$ para $x = d$. En esta posición, superficie de la pieza, la condición (a) es general, y puede reducirse a la (b) cuando el control interno es dominante, como en el segundo subperíodo de velocidad decreciente. Al cambiar el PVCS al primer subperíodo del PVDS, importará entonces la condición (a).

5.2.4.2.1. Dedución del número de Biot para transferencia de materia

Dado que la humedad W , variable sobre la cual se ha planteado el balance microscópico de materia, no es un campo uniforme entre las fases sólido y aire como lo puede ser la temperatura o la presión de vapor, se debe establecer una vinculación de valores W_s - p_{vs} en la superficie, por medio del número de Biot para la transferencia de materia, cociente de las resistencias internas y externas al flujo de agua, lo cual requiere adimensionalización.

Dos formas de deducir el número de Biot en transferencia de materia

Primer método

A efectos de adimensionalizar la condición de contorno tipo (a) en $x = d$, se planteará la siguiente equivalencia:

$$\frac{\partial W_s}{\partial x} \equiv \frac{\partial W_s}{\partial p_{vs}} \frac{\partial p_{vs}}{\partial x} \tag{5.7}$$

Secadoras continuas de trigo

donde el primer factor del miembro derecho es la pendiente de la isoterma de sorción en la superficie y el segundo el gradiente del presión de vapor del agua líquida adsorbida en la interfase, del lado del sólido. Reemplazando la ec. (5.7) en la condición de contorno (a) de la ec. (5.6), se obtiene:

$$x = d \quad - \rho_{s0} D \frac{\partial p_{vs}}{\partial x} = \frac{k_p}{\left(\frac{\partial W_s}{\partial p_{vs}} \right)} (p_{vs} - p_{va}) \quad t > 0 \quad (5.8)$$

Si p_{vs} se adimensionaliza, según

$$p_{vs\ ad} = \frac{p_{vs} - p_{va}}{p_{vs0} - p_{va}} \quad (5.9)$$

donde p_{vs0} es la presión de vapor superficial a W_0 , se puede obtener:

$$-\frac{1}{p_{vs\ ad}} \frac{\partial p_{vs\ ad}}{\partial x_{ad}} = \frac{k_p}{\left(\frac{\partial W_s}{\partial p_{vs}} \right)} \frac{d}{\rho_{s0} D} \equiv Bi_m \quad (5.10)$$

donde $x_{ad} \equiv x/d$. Esta definición del Bi_m ha sido presentada previamente por Crapiste y Rotstein (1997).

Segundo método de deducción del Bi_m

Se puede llegar a una forma funcionalmente equivalente de Bi_m definiendo un coeficiente de transferencia "pelicular" en unidades de fuerza impulsora de humedades de grano:

$$k_p (p_{vs} - p_{va}) \equiv k_w (W_s - W_e) \quad (5.11)$$

a partir de la cual se calcula k_w :

$$k_w = \frac{k_p}{\left(\frac{W_s - W_e}{P_{vs} - P_{va}} \right)} \quad (5.12)$$

conversión que debe cambiar según la posición del punto W_s - p_{vs} en la isoterma de sorción.

Esto permite reescribir la condición de contorno (a) de la ec. (5.6) en unidades homogéneas:

$$x = d \quad - \quad \rho_{s0} D \frac{\partial W_s}{\partial X} = k_w (W_s - W_e) \quad t > 0 \quad (5.13)$$

que, adimensionalizada por $W_{ad} = (W - W_e)/(W_0 - W_e)$ y $x_{ad} = x/d$ permite obtener a:

$$- \frac{1}{W_{ad}} \frac{\partial W_{ad}}{\partial x_{ad}} = \frac{k_w d}{\rho_{s0} D} = Bi_m \quad (5.14)$$

Se podría obtener una forma similar a la ec. (5.10), al insertar la ec. (5.12) en la (5.14):

$$Bi_m = \frac{k_w d}{\rho_{s0} D} = \frac{k_p}{\left(\frac{W_s - W_e}{P_{vs} - P_{va}} \right)} \frac{d}{\rho_{s0} D} \quad (5.15)$$

Se obtiene así una forma discreta, equivalente a la definición de la ec. (5.10). Esta última forma debería preferirse, por su facilidad de tratamiento matemático, y porque permite independizarse de las condiciones del aire.

Por esta razón, se repite la ec. (5.10) en forma abreviada, para definir el número de Biot para la transferencia de materia:

$$Bi_m = \frac{k_p}{\left(\frac{\partial W_s}{\partial P_{vs}} \right)} \frac{d}{\rho_{s0} D} \quad (5.16)$$

Secadoras continuas de trigo

5.2.4.2.2. Análisis de resistencias internas y externas al flujo de agua

Este análisis ha sido motivado por conceptos vertidos por Wesselingh y Krishna (1997), quienes sugieren diferenciar las características termodinámicas de las de transporte al modelar la transferencia de materia. En este sentido, son muy pocas las oportunidades donde se define correctamente la resistencia interna al flujo de agua, y donde se discrimina si el cambio de mecanismo de velocidad constante a decreciente está motivado por cambios de propiedades de transporte o causas termodinámico-fisicoquímicas.

Si el Bi_m es la relación de la "resistencia interna", r_i a la externa, r_e , la ec. (5.16), puede reescribirse en forma equivalente:

$$Bi_m = \frac{r_i}{r_e} = \frac{\left[\frac{d}{\left(\frac{\partial W_{s0}}{\partial P_{vs}} \right) \rho_{s0} D} \right]}{\frac{1}{k_p}} \quad (5.17)$$

donde r_i es el numerador encerrado entre corchetes, mientras que $r_e = 1/k_p$. Dado que k_p podría tomarse constante durante el secado, se analizarán los factores que causan el aumento de la resistencia interna durante el secado. Así, la pregunta que puede surgir es la siguiente: ¿cambia la r_i por una modificación en la capacidad de transporte de agua por parte del sólido (D) o por otras causas? Justamente en esa pregunta se evidencia la necesidad de clarificar el concepto de resistencia interna.

El parámetro específico de transporte interno, asumiendo por el momento mecanismo difusivo, es el D, cuya inversa representa la verdadera resistencia interna al transporte. El valor de D dependería de la estructura del material y no de su tamaño ni forma.

Varios autores (Ratti, 1991; Zogzas y Maroulis, 1996) han indicado que el D se mantiene razonablemente constante a humedades elevadas, de manera que puede asumirse que éste no cambia al finalizar el PVCS para dar lugar al PVDS. Sin embargo r_i crece,

evidentemente, al comenzar el PVDS. Los otros factores que participan de r_i son la ρ_{s0} (masa de sólido seco referido al volumen húmedo, un valor de referencia), "d" y la dW_s/dp_{vs} que, en secado isotérmico, se puede tomar como la pendiente de la curva de sorción (Fig. 5.3).

Dado que la longitud característica "d" se reduce (encogimiento) o se mantiene constante, su variación no puede aumentar la r_i , de manera que ésta sólo puede aumentar si disminuye la pendiente de la isoterma de sorción dW_s/dp_{vs} . Obsérvese que en el secado desde humedades elevadas, la pendiente indicada tiende a infinito, haciendo tender r_i al mínimo, lo mismo que al número de Bi_m . Sin embargo, que esa r_i mínima sea suficiente para provocar un PVCS duradero dependerá del espesor de la pieza "d". Si $d \rightarrow 0$, como en secado spray (Masters, 1991; Rígoli y colab., 1994), la r_i será mucho menor que la r_e de un alimento húmedo y el Bi_m podrá tender a cero, asegurando control externo. Se concluye que, para ese caso, la razón del cambio de mecanismo de PVCS a PVDS es fisicoquímico/termodinámica y no, necesariamente, de transporte.

Aún en piezas donde d tienda a 0, (sin gradientes internos), llega un momento en el que la p_{vs} comienza a reducirse, simplemente porque toda la partícula presenta un contenido de humedad para el cual la dW_s/dp_{vs} comienza a descender. Esa sería una de las razones por las cuales el secado spray finaliza en el PVDS, con un calentamiento final por encima de la temperatura de saturación adiabática (T_{sa}) (capítulo 3).

Volviendo a piezas donde d es relativamente considerable, el valor de r_i , excepto en los primeros instantes, crecerá muy rápido pues los gradientes de W o p_v determinan que p_v se reduzca en la superficie no bien comienza el secado. Para d considerables, el lento mecanismo de difusión de agua en un sólido no puede reponer el agua superficial a tiempo. En consecuencia el PVCS será indetectable o muy corto, tanto en tiempo como en rango de humedad media removida.

Secadoras continuas de trigo

Para materiales húmedos, se concluye que, en buena medida, el crecimiento de la resistencia interna por sobre la externa *no es causado, necesariamente, por aumento en las dificultades específicas de transporte de agua en el material, esto es, no necesariamente por disminución de D .*

Entonces, para condiciones iniciales fijas del material y valores constantes de aire de secado, la humedad crítica, que es un valor medio en la pieza y no un valor local en la superficie, estará influenciada por la longitud característica " d ". Green y Maloney (1984) han indicado, en base a evidencia experimental, que, en efecto, la humedad crítica no puede considerarse una constante física del material.

Se observa entonces, que en el secado de materiales muy húmedos, el Bi_m cambia de tal forma *durante* la operación que puede pasar de valores tendiendo a cero al inicio (control externo \equiv PVCS) a valores muy grandes hacia el final (control interno \equiv segundo período de velocidad decreciente).

No obstante, existen casos donde la dificultades específicas de transporte interno del material aumentan, contribuyendo a reducir rápidamente el D y, por tanto, a acelerar el crecimiento de r_i y del Bi_m , causando un cambio más abrupto en el mecanismo de secado. Por ejemplo, se dan casos donde la estructura del material se modifica cerca de la superficie dificultando el secado, un efecto llamado normalmente "case hardening" o endurecimiento de la corteza (Van Arsdel, 1963); otro caso es el cambio de pendiente en la Fig. 5.2, al pasar del primer subperíodo de velocidad de secado decreciente al segundo.

5.2.5. Formas de transporte interno de agua

Con respecto al mecanismo predominante de transporte interno del material, las distintas posibilidades que se han presentado en la literatura (Mujumdar y Menon, 1995) han surgido mayormente del estudio de "medios porosos", generalmente materiales inorgánicos.

Los alimentos naturales (frutihortícolas enteros o cortados, carnes, granos como cereales u oleaginosas) son sólidos con una estructura celular, compleja y organizada, que se vuelve amorfa conforme se reduce el contenido de agua (Crapiste y colab., 1984).

Fortes y Okos (1980) y Crapiste y Rotstein (1997) han indicado que la humedad puede moverse en alimentos de acuerdo a uno o más de los mecanismos siguientes:

- Flujo capilar debido a gradientes de la presión de succión capilar.
- Difusión líquida debida a gradientes de concentración de agua.
- Difusión de vapor debida a gradientes de presión parcial de vapor.
- Flujo viscoso (hidrodinámico) debido a gradientes de presión total, causadas por condiciones particulares de presión externa y de temperaturas elevadas.

Fortes y Okos (1980) han señalado que los gradientes de contenido de agua en un alimento pueden dar lugar a transporte controlado tanto por mecanismos capilares como difusivos, e indican que el primer subperíodo de velocidad decreciente puede responder a leyes del transporte capilar.

Crapiste y colab. (1984) han realizado un trabajo donde se presenta el modelado detallado de los mecanismos de transporte de agua en secado de frutas y hortalizas dentro del rango de altas humedades considerando la estructura celular del alimento. Los autores indican que el agua es retenida en capilares con una energía 50 veces menor a la del agua adsorbida y que, en consecuencia, es esperable que el agua capilar se elimine mucho antes que el agua adsorbida a medida que procede la deshidratación. Los autores han estudiado los caminos posibles para el recorrido del agua hacia la superficie (de célula a célula o de pared celular a pared celular), derivando cinéticas difusivas a partir de ellos. En el mismo estudio han encontrado que la velocidad de secado es más sensible a la permeabilidad de la membrana celular vegetal que a la conductividad hidráulica de la pared celular. Su desarrollo matemático basado en la estructura celular del vegetal propone una manera detallada de

Secadoras continuas de trigo

"seguir" el paso del agua en el interior del alimento, pero requiere, como los autores han indicado, numerosos parámetros para la resolución numérica del modelo.

Por su parte, Spiazzi y Mascheroni (1997) han discutido los mecanismos de movimiento de agua y el ingreso de solutos en alimentos deshidratados osmóticamente y proponen un modelo matemático estructural que establece un compromiso entre complejidad y precisión para resolver un sistema de ecuaciones multicomponente de tipo difusivo.

Ratti (1991) ha aplicado la teoría difusiva en la deshidratación completa de frutas y hortalizas con aire. Midió y correlacionó la contracción volumétrica y representó la estructura con coeficientes de difusión efectivos (D), resolviendo el transporte interno a lo largo de una coordenada de encogimiento. Los valores de D resultaron dependientes de la temperatura por expresiones tipo Arrhenius. Con respecto al efecto de la concentración de agua en D utilizó un coeficiente "húmedo" en el rango de altas humedades y otro "seco", menor, en el rango de bajas humedades, que podría ser congruente con los dos subperíodos de velocidad decreciente observados para el corte de zanahoria en la Figura 5.2. Fortes y Okos (1980) indican que el mecanismo difusivo es "funcionalmente" aplicable a la deshidratación de alimentos.

Zogzas y Maroulis (1996) han recopilado datos de coeficientes de difusión efectivo (D) para el secado de alimentos de alta y baja humedad inicial. En todos los casos, la relación con la temperatura es tipo-Arrhenius u otro tipo de relación no lineal de pendiente positiva. Se observan casos de D dependiente o independiente de la concentración de agua en el alimento. Un trabajo representativo en este tema fué realizado por Mulet (1994), quien, modelando el secado de zanahoria y papa, ha analizando el efecto de incorporar encogimiento volumétrico y difusividad variable con la concentración, a la vez que compara resultados de secado isotérmico y no isotérmico.

5.2.6. Inadecuabilidad de modelados muy simplificados para el período de velocidad decreciente.

Es conocido que el uso de modelos muy simplificados para condiciones cambiantes del material puede inducir a interpretaciones erróneas, y se mostrará aquí uno de esos casos. Si se aplicara el modelo empírico de Lewis (1921) a la totalidad del período de velocidad decreciente (Figura 5.2) se tendría:

$$VS \equiv - \frac{dW}{dt} = k(W - W_e) \tag{5.18}$$

de donde

$$VS = kW + C$$

siendo k el parámetro cinético, que se tomará por un momento como el de transporte. El valor W es la humedad media del material y W_e el valor de equilibrio para condiciones constantes de aire. Si se aceptara que la Figura 5.2 da dos subperíodos (primer: 1, y segundo :2) "lineales" de velocidad decreciente VS vs W , entonces habría un k_1 y un k_2 . Sin embargo, el gráfico daría $k_2 > k_1$, esto es el "parámetro de transporte" crecería, en lugar de disminuir. Si se acepta que $k_1 \propto D_1/d_1^2$ y que $k_2 \propto D_2/d_2^2$, como indicaron Zogzas y Maroulis (1996), que D_1 es mayor que D_2 , - los coeficientes "húmedos" y "secos" de Ratti (1991) - y que $d_1 > d_2$ (de donde $d_1^2 > > d_2^2$) - el material se encoge según el volumen de agua perdida (Van Arsdel, 1963 ; Fortes y Okos, 1980)-, los resultados se reconcilian, pues el efecto de incremento de k es aparente dado que el mismo está lejos de ser un parámetro específico de transporte (D puede serlo eventualmente) en materiales con importante cambio volumétrico. Esto muestra que un modelado preciso de la deshidratación de productos de alta humedad como frutas y hortalizas debe tener en cuenta de alguna forma el encogimiento del material.

Secadoras continuas de trigo

5.2.7. Parte final de la curva de secado

Para acercarse a condiciones similares a las del secado de trigo, objeto de esta tesis, se muestra en la Figura 5.4 la parte final del segundo subperíodo de velocidad decreciente de la curva $VS = -dW/dt$ vs W , ampliando la escala de resultados ya mostrados en la Figura 5.2.

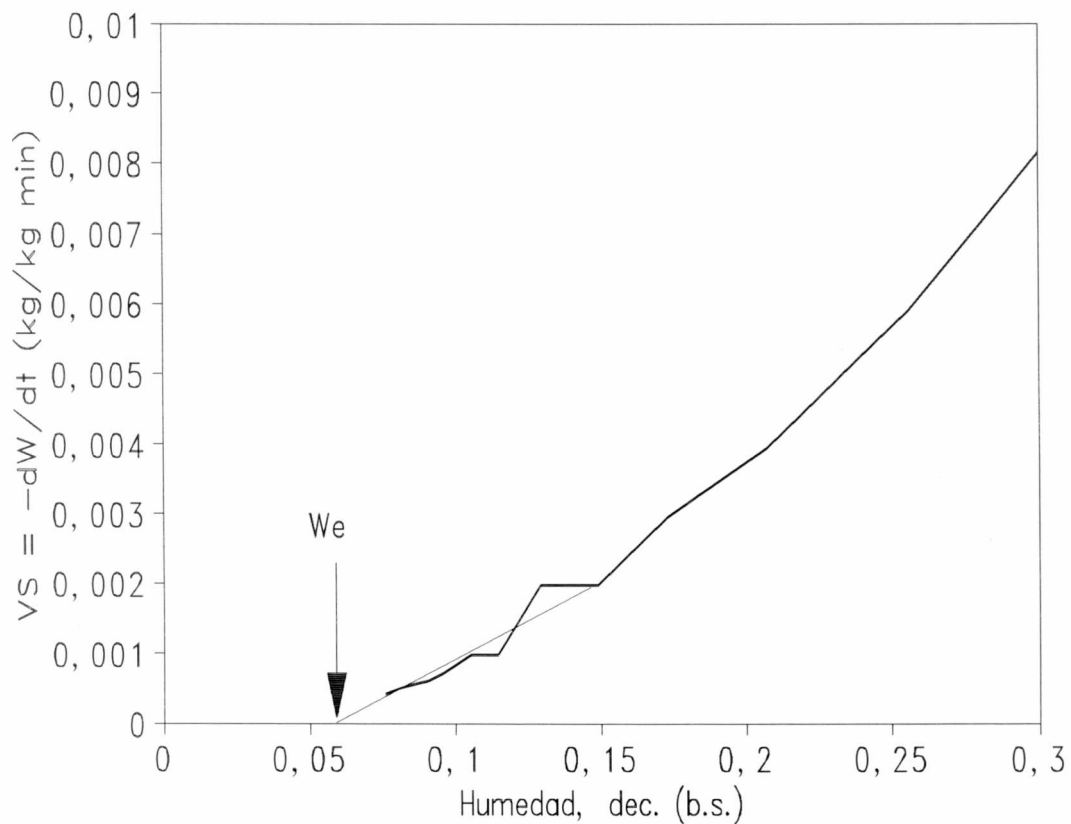


Figura 5.4. Velocidad vs W en cortes de zanahoria, a bajas humedades. Condiciones de la Figura 5.1. Errores porcentuales en W : entre 0,2 % ($W \approx W_0$) y 15% ($W \approx W_0$).

En esta parte de la curva de la Figura 5.4, el encogimiento ya no es importante (Chirife e Iglesias, 1984), de manera que habrá una proporcionalidad suficiente entre el k_2

del modelo de Lewis (ec. (5.18)) y el D "seco". Puede verse que la pendiente tiende a decrecer, y si se acepta que no hay encogimiento se puede asumir que k_2 presenta una cierta dependencia con la humedad media, proveniente de una posible reducción del D_2 ("seco") con el contenido de agua.

En consecuencia, se asume que al analizar productos secados sólo en el segundo subperíodo de velocidad decreciente, como el trigo, deberá investigarse experimentalmente la funcionalidad del D con W , lo cual se hará en el capítulo 6.

Las oscilaciones de los datos experimentales al final de la curva de la Figura 5.4. se deben a lecturas repetidas de la balanza (la velocidad de secado es muy baja). La humedad de equilibrio aparente en estas condiciones (70°C , $h_r = 0,06$) se extrapola en $W_e \approx 0,06$ kg/kg. Debe indicarse, no obstante que éste no es un método confiable para la determinación de la humedad de equilibrio y que los valores más representativos se obtienen por los métodos estáticos gravimétricos o higrométricos ya citados en el capítulo 4.

5.2.8. Solución analítica del modelo difusivo en geometría plana: Estimación del tiempo del período de velocidad decreciente

La solución analítica de la ecuación diferencial parcial de difusión (ec. (5.5)) viene dada por una serie infinita convergente del tipo $W_1 = W_1(x,t)$. Esta solución no es, sin embargo, realmente conveniente para comparar predicciones con datos experimentales, dado que los últimos expresan, generalmente, la humedad media (W) en función del tiempo. Considerando la condición de contorno (b) de la ec. (5.6) para altos Biot (en $x = d$; $W_1 = W_e$) se obtiene una forma particular de la serie que, al ser integrada en el volumen del sólido, permite obtener una función para la humedad media $W = W(t)$. En placa plana, la serie resultante es (Crapiste y Rotstein, 1997):

$$W_{ad} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{n=\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D}{4d^2} (t - t_c) \right] \quad (5.19)$$

donde $W_{ad} = (W - W_e)/(W_c - W_e)$, mientras t_c es el tiempo de secado calculado previamente para el período de velocidad constante de secado. Debe indicarse que esta solución requiere asumir D independiente de la concentración y ausencia de encogimiento, lo cual no está de acuerdo con los hechos que se venían analizando en función de los resultados de la Figura 5.2 y de las contribuciones de autores previos. Además, la serie infinita indicada requiere, para cada tiempo, y particularmente a tiempos "cortos", sumar un número considerable de términos para obtener convergencia. A tiempos "largos", sin embargo, la ecuación converge con un sólo término.

$$W_{ad} = \frac{W - W_e}{W_c - W_e} = \frac{8}{\pi^2} \exp \left[-\frac{\pi^2 D}{4d^2} (t - t_c) \right] \quad (5.20)$$

Para un alimento húmedo, que posea un t_c y un t_d , resultaría conveniente estimar el t_d con la solución a un término (ec. 5.19) de la serie infinita y no con la serie infinita completa (ec. (5.20)) por la siguiente razón: si existen, como todo parece indicarlo, al menos "dos valores" del coeficiente de difusión (uno para el primer y otro para el segundo subperíodo de velocidad decreciente de secado), y un escaso encogimiento en el segundo período, convendría, no a los efectos de predecir toda la curva sino al sólo efecto de estimar t_d , ajustar la forma "corta" ec. (5.19) a datos experimentales W vs t en ese rango, de manera que el D constante obtenido represente esa porción en la que la solución asintótica es razonablemente válida.

En consecuencia, considerando ahora $t_d = t - t_c$, y estableciendo una humedad final media (W_f) para la partícula, el tiempo aproximado del período de velocidad decreciente resulta:

$$t_d = \frac{4d^2}{\pi^2 D} \operatorname{Ln} \left[\frac{\frac{8}{\pi^2}}{\left(\frac{W_f - W_e}{W_c - W_e} \right)} \right] \quad (5.21)$$

donde se observa que, a diferencia del PVCS, el tiempo de secado resulta ahora *proporcional al cuadrado* de la dimensión característica promedio del material, guardando una relación inversa con el coeficiente de difusión efectivo del agua.

5.2.9. Modelo de la Curva Característica

En otra línea de investigación, Van Meel (1958) propuso que es posible obtener una curva normalizada de secado para cada material, conocida como curva característica de secado, aplicable al período de velocidad decreciente. La teoría, que propone una forma de simple de tratar mecanismos complejos en una sola curva fue difundida por Keey y Suzuki (1974) y por Keey (1978, 1992) y su expresión general es la siguiente:

$$\frac{dW/dt}{(dW/dt)_c} = F(W_{ad}) \quad (5.22)$$

donde W_{ad} es la humedad adimensional del material, definida previamente y $(dW/dt)_c$ la velocidad de secado del PVCS. Dado que muchos alimentos no presentan este período y que por tanto W_c es difícil de conocer o inexistente, el método presenta problemas en su aplicación, además de requerir el desarrollo de una formulación específica para $F(W_{ad})$. Daud y colab. (1996) indican una "ley de potencia" como la forma más simple de caracterizar un período único de velocidad decreciente:

$$F(W_{ad}) = W_{ad}^n \quad (5.23)$$

Secadoras continuas de trigo

donde n es el exponente de la ley de la potencia. Si, como en el caso medido aquí para las rodajas de zanahoria (Figura 5.2), la curva presentara dos subperíodos de velocidad decreciente, los autores proponen dos formas del modelo:

$$\begin{aligned} F(W_{ad}) &= W_{ad}^n & B < W_{ad} < 1 \\ F(W_{ad}) &= B^{n-m} W_{ad}^m & 0 < W_{ad} < B \end{aligned} \quad (5.24)$$

donde B sería el valor de W_{ad} correspondiente a la "segunda humedad crítica" (indicada como W_d en la Fig. 5.2). Los autores indican que estas ecuaciones no siempre son suficientes para describir con precisión las curvas de secado, por lo que aconsejan recurrir a formas más complejas del $F(W_{ad})$, a menudo series infinitas convergentes. Esto haría reconciliar el método de las curvas características con las soluciones analíticas de la ecuación de difusión (ec. (5.18)-(5.19)). Ratti y Crapiste (1992) han incorporado la consideración del encogimiento en el desarrollo de una nueva función de curva característica, dando al método una mayor generalidad.

5.2.10. Ejemplo de cálculo de tiempo de secado total y prediseño de secadora para secado de una capa de alimento

Se verá un ejemplo preliminar de utilización del tiempo de secado estimado, para el dimensionamiento básico de una secadora en un caso idealizado donde las condiciones del aire se mantuvieran aproximadamente constantes al pasar por un equipo que seca una monocapa de piezas de producto. El tiempo total de esta operación, en un producto de alta humedad inicial, vendrá dado por $t_T = t_c + t_d$. Conociendo la producción requerida en kg/s (P_{rs}), se puede estimar el área de equipo "A" necesaria para cargar una capa de producto de espesor "d" en bandeja o cinta:

$$P_{rs} = \frac{m_s}{t_T} = \frac{\rho_{s0} A d}{t_T} \quad \rightarrow \quad A = \frac{P_{rs} t_T}{\rho_{s0} d} \quad (5.25)$$

Esta área será igual a la del equipo en caso de un sólido continuo (se está modelando placa plana) mientras que en sólidos no continuos, como vegetales cortados, el área de equipo será A/ϵ , siendo ϵ una relación entre área de alimento y área de bandeja.

Esta formula de diseño muestra lo importante que resulta el cálculo del tiempo de residencia de un proceso. El objetivo de esta tesis es calcular ese tiempo en secadoras continuas de trigo basadas en lechos fijos, en condiciones que minimicen el daño a la calidad y el consumo energético. Los lechos fijos involucran un cambio de las condiciones del aire al pasar por la secadora, de manera que deberá incorporar, aparte del "modelo del producto" (ec. (5.18), por ejemplo), un algoritmo para resolver los cambios de la temperatura y humedad de la fase aire, y el cambio de temperatura del lecho. El desarrollo del "modelo de producto" para granos individuales de trigo se trata en el capítulo siguiente.

**CAPITULO 6. SECADO DE GRANOS INDIVIDUALES DE
TRIGO POR LA TECNICA DE CAPA DELGADA.
DETERMINACION DE PARAMETROS CINETICOS**

CAPITULO 6. SECADO DE GRANOS INDIVIDUALES DE TRIGO POR LA TECNICA DE CAPA DELGADA. DETERMINACION DE PARAMETROS CINETICOS.

6.1.INTRODUCCION

Los métodos modernos de diseño de secadoras de granos se basan en la descripción matemática del secado en lechos fijos (Nellist y Bruce, 1995) para estimar el tiempo de secado con la mayor precisión posible (Bruce, 1984; Nellist, 1987; Brooker y colab. , 1992).

Según Himmelblau y Bischoff (1976), un proceso complejo (como el secado en secadoras) debe ser analizado por descomposición del mismo en sistemas más simples. En el caso que se trata aquí, una secadora puede dividirse en lechos fijos altos, y éstos, a su vez, en *capas delgadas*, a menudo de un grano de espesor. En consecuencia, el análisis del secado en capas delgadas resulta muy importante en el diseño de secadoras.

El método de capa delgada consiste en mantener condiciones constantes de aire para confinar todas las variaciones al producto secado, y poder medir sus parámetros, en relación a tales condiciones del aire. Sin embargo, es deseable que las conclusiones obtenibles de capa delgada puedan aplicarse en las condiciones utilizadas luego en equipos de lecho fijo.

Se han aplicado diversos modelos en capa delgada para secado de trigo. Los más ortodoxos parten de la ecuación diferencial de difusión no estacionaria. Se han obtenido soluciones numéricas que dan la variación de la humedad del grano con su posición radial y el tiempo $W_1 = W_1(r,t)$ (Bruce, 1985), soluciones analíticas en serie infinita que presentan esa misma predicción (Ingram, 1976), soluciones analíticas en serie infinita integradas en el volumen de la partícula (Sun y Woods, 1994), ecuaciones semiempíricas (Bruce, 1984; Nellist, 1987) y empíricas (Thompson y colab., 1968; Page, 1949). En la mayoría de los estudios, se ha supuesto secado isotérmico para modelar la variación de la humedad experimental adimensionalizada de los granos (W_{ad}) en función del tiempo para distintas temperaturas, y se han relacionado los parámetros cinéticos sólo con T_a .

Secadoras continuas de trigo

En este trabajo de tesis, se ha medido el secado de trigo en capa delgada para varias condiciones de temperatura y humedad inicial del grano (W_0). A efectos de evitar los altos tiempos de cálculo en que incurren las soluciones analíticas tipo serie infinita de los modelos difusivos, los datos fueron interpretados con un modelo analítico difusivo simplificado que parte de un desarrollo de Becker (1959). A ésta ecuación, que no resigna precisión ni significado físico, se pudo incorporar no sólo el efecto de T_a sino también el de W_0 en el parámetro cinético, el coeficiente de difusión efectivo de agua en el sólido (D).

6.2. ANALISIS DE LITERATURA PREVIA

La ecuación de capa delgada es análoga al tipo de modelos vistos en el capítulo 5 para cortes de zanahoria, pero se la llama de esta forma en el secado de granos. Es el "modelo del producto", la ecuación constitutiva de transferencia de materia para granos individuales. La ecuación de capa delgada es útil en dos aspectos:

(1): Permite disponer de un medio para estudiar la adaptabilidad de una determinada teoría - representada por la ecuación - al fenómeno de secado de un producto dado.

(2): Una vez que se ha verificado la idoneidad de la teoría, la ecuación de capa delgada se aplica a datos experimentales de curvas de secado para determinar parámetros cinéticos, en un rango de, por ejemplo, temperaturas de aire y humedades iniciales de grano. Ese modelo de producto se utilizará luego como componente del modelo de lecho fijo, donde variarán tanto las condiciones del grano como las del aire, en tiempo y posición en el espesor del lecho.

La nomenclatura de "ecuación de capa delgada" proviene del uso muy difundido de las Ecuaciones de Parámetros Globalizados (EPG) o "Lumped Equations" (Himmelblau y Bischoff, 1976), que dan directamente la humedad media del grano (W) en función del tiempo (t), asumiendo secado isotérmico a la temperatura del aire. Estos modelos integrales

pueden ser de naturaleza empírica, semiempírica, o bien el resultado de integrar modelos difusivos locales en el volumen de la partícula, como el visto en el capítulo 5 para geometría plana, asumiendo ciertas suposiciones. Estas ecuaciones integrales presentan parámetros o coeficientes cinéticos, normalmente expresados como dependientes sólo de la temperatura del aire (T_a). Las condiciones del aire de secado (temperatura y humedad) y la humedad inicial del grano (W_0) se tienen en cuenta por adimensionalización de la humedad media de la partícula:

$$W_{ad} = \frac{W - W_e}{W_0 - W_e} \quad (6.1)$$

donde $W_e = f(T_a, h_{ra})$, es la humedad de equilibrio dada por las isotermas de sorción.

A menor escala, que actualmente crece, también se han utilizado Modelos de Parámetros Distribuidos (MPD), tanto mediante soluciones analíticas integrales $W_1 = W_1(r, t)$ (de tipo serie infinita), como resoluciones numéricas (Ingram, 1976; Maier y Bakker-Arkema, 1992). Estas últimas, por su naturaleza, proveen información sobre la distribución de humedad intragranular. Se analizarán más en detalle los EPG y MPD por separado.

6.2.1. Ecuaciones de Parámetros Globalizados (EPG)

Con respecto a las EPG, puede establecerse una distinción entre aquellas de tipo empírico, semiempírico y difusivo, que son los tres tipos más frecuentes. Las empíricas y semiempíricas podrían encuadrarse en la clasificación de Villermaux (1993) como "Ecuaciones Sistémicas". Estas son funcionalmente apropiadas, pero no presentan una base física clara, y se plantean directamente para describir la curva de humedad media del grano vs tiempo; por consiguiente, las mismas constituyen EPG verdaderas. Las EPG difusivas, por el contrario, poseen base física y se convierten en tales al integrar modelos MPD difusivos en el volumen del grano.

Secadoras continuas de trigo

EPG Empíricas

Las EPG empíricas más conocidas en secado de granos son las de Page (1949):

$$W_{ad} = \frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = \text{EXP}(-k_p t^N) \quad (6.2)$$

y Thompson y colab. (1968):

$$t = A \text{Ln } W_{ad} + B \text{Ln } W_{ad}^2 \quad (6.3)$$

propuestas ambas originalmente para secado de maíz. En el modelo de Thompson, los parámetros A y B se correlacionan con T_a . En la ecuación de Page, la funcionalidad con T_a se interpreta a través de k_p y, en ocasiones, también de N (Bruce, 1985). Siempre que sean ajustadas a datos confiables de secado en capa delgada, estas ecuaciones pueden interpretar bien los datos y usarse con cierto éxito en posteriores modelados de lecho fijo. La carencia de base física, sin embargo, les impide constituirse en una herramienta válida para investigar el mecanismo de secado de un grano.

EPG Semiempíricas

Entre las EPG semiempíricas, se puede citar el modelo de Lewis (1921), descrito en el capítulo 5, que presupone una dependencia lineal entre la velocidad de secado y la fuerza impulsora:

$$\frac{dW}{dt} = -k(W - W_e)$$

de donde

$$W_{ad} = \frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = \text{EXP}(-k_L t) \quad (6.4)$$

Este modelo asume que el perfil interno de los granos es plano en el valor de la humedad media W a ese tiempo, y que cae bruscamente al valor W_e en una capa periférica infinitesimalmente delgada *del grano* (Nellist y Bruce, 1995). El modelo de Lewis ha probado ser útil hasta ahora habida cuenta de la necesidad de limitar el tiempo de cálculo. Este modelo tiene la ventaja, además, de que el tiempo (t) no aparece en forma explícita en la expresión de velocidad de secado, lo que confiere una gran flexibilidad de programación dentro de esquemas numéricos como los empleados en lecho fijo (Bruce, 1984). La expresión de Lewis puede ser útil, todavía, en representaciones multilecho, como las secadoras de flujo mixto (Bruce, 1984; Giner y colab., 1998; Giner y Bruce, 1998)), donde el compromiso con el tiempo de cálculo resulte desfavorable a modelos más rigurosos.

De todas formas, se ha demostrado (Bruce, 1985; Giner, 1989) que los supuestos en los que se basa la ecuación de Lewis le impiden describir correctamente las curvas de secado en capa delgada, por lo que sería inconveniente seguir insistiendo con ella en modelos actuales monohecho como los de lecho fijo o secadoras de flujo cruzado.

EPG Difusivas

Las soluciones analíticas difusivas empleadas en secado de granos se obtienen a partir de un MPD difusivo diferencial suponiendo, como se ha visto en el capítulo 5, que el coeficiente de difusión no varía con la humedad del grano *durante el secado* y, generalmente, asumiendo una condición prescrita en la superficie ($W = W_e$) (Control interno estricto, o segundo subperíodo de velocidad decreciente).

Las soluciones pueden ser analíticas tipo MPD en serie infinita de la forma $W_i = W_i(r, t)$, donde W_i es la humedad a nivel intragranular en la posición r de una coordenada radial (Ingram, 1976). Sin embargo, el uso de tales modelos supone un tiempo de cálculo muy elevado para trazar cada perfil $W_i = W_i(r)$ en cada tiempo.

Chirife e Iglesias (1984) y Sun y Woods (1994) han mostrado, para trigo, la conveniencia de utilizar soluciones analíticas en serie infinita integradas en el volumen de la partícula. Este modelo, del tipo $W = W(t)$, puede ser considerado como EPG. Sin embargo, tal ecuación supone, todavía, un alto costo computacional al requerir numerosos términos de la serie en cada tiempo, particularmente en tiempos cortos. Gupta y Woods (1992) han indicado que el número de términos necesario para hacer converger la serie pueden ser mayor que 100. Si este problema se multiplica por el número de capas delgadas de un lecho alto, se concluirá que su uso es en realidad inconveniente.

6.2.2. Modelos de parámetros distribuidos (MPD) para granos individuales como parte de un modelo de secado en lechos altos

Las revisiones de Parry (1985), Sokhansanj y Cenkowski (1988); Jayas y colab. (1991) y Brooker y colab. (1992) han mostrado que las investigaciones ingenieriles del secado han preferido ecuaciones simples de capa delgada para el grano, a fines de concentrarse en el modelado del lecho y en la predicción del comportamiento de secadoras.

Más recientemente, algunos investigadores (Maier y Bakker-Arkema, 1992) han comenzado a utilizar modelos MPD de grano, la mayoría de tipo difusivo, como componente de los modelos de lecho fijo. Estos modelos de grano todavía involucran largos tiempos de cálculo puesto que introducen, al menos, una o más coordenadas intragranulares independientes, adicionales al tiempo y el espesor de lecho.

Como se ha indicado, Ingram (1976) utilizó la solución analítica serie infinita difusiva de parámetros distribuidos asumiendo D independiente de la concentración, pero la mayoría de los trabajos con MPD se han inclinado por resoluciones numéricas de la ecuación de difusión que también demandan largos tiempos de cálculo (Maier y Bakker-Arkema, 1992; Zahed y Epstein, 1992; Martínez Vera y colab., 1995).

Los modelos de secado de un grano por elementos finitos, (Haghighi y colab., 1990) podrían ser una alternativa válida para un modelado MPD más detallado y para su eventual

uso como componente de un modelo de lecho fijo. Queda por definirse, sin embargo, si el grado de detalle requerido en elementos finitos obra a favor y no en contra de la aplicación general del modelo. Todavía, cualquier modelo MPD, analítico o numérico, por diferencias o elementos finitos, demanda un tiempo de cálculo considerable dentro de modelos de lecho fijo y aún más dentro de modelos de secadoras continuas multilecho.

6.2.3. Tipo de Modelo usado para capa delgada en este trabajo

Se ha observado aquí que una solución analítica difusiva en serie infinita puede reemplazarse por una ecuación simplificada que, sin perder el significado físico difusivo, calcule con similar rigurosidad. Esto es precisamente lo que se logra utilizando la ecuación difusiva de tres términos para "tiempos cortos" propuesta por Becker (1959), justamente para secado de trigo.

Sorprendentemente, este modelo difusivo no fue incluido en diversas revisiones del tema de secado en capa delgada (Parry, 1985; Sokhansanj y Cenkowski, 1988; Jayas y colab., 1991 y Brooker y colab., 1992) ni en una recopilación de los métodos posibles para determinar coeficientes de difusión de agua en alimentos (Zozgas y colab., 1996). Si bien la ecuación de Becker ha sido utilizada en algunos trabajos de secado de trigo (Spencer, 1969 y 1972; Becker e Isaacson, 1970; Giner y Calvelo, 1987; Giner y De Michelis, 1988) en ninguno de ellos se la ha empleado con coeficientes de difusión que, además del efecto con la temperatura, contemplen la influencia del contenido de agua.

Se recorrerán los pasos de planteo y suposiciones para llegar a la ecuación tipo Becker de capa delgada.

6.3. TEORIA: PLANTEO DE LAS ECUACIONES Y SUPOSICIONES

6.3.1. Balance microscópico de materia con transporte difusivo

Tomando el volumen del grano constante como sistema y asumiendo transporte

Secadoras continuas de trigo

interno por difusión líquida, el balance microscópico de materia se puede expresar en la forma siguiente (Crank, 1975):

$$\frac{\partial W_l}{\partial t} = \nabla(D \nabla W_l) \quad (6.5)$$

donde D es el parámetro específico de transporte interno, denominado coeficiente de difusión efectivo. La ecuación (6.5) implica el uso de un D para el flujo de agua relativo a la materia seca que, al no incorporar el encogimiento, mantiene una posición estática respecto al eje de coordenadas fijas (Bird y colab., 1960). Para flujo de materia unidimensional radial en geometría esférica, la ecuación anterior puede desarrollarse para dar:

$$\frac{\partial W_l}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 W_l}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial W_l}{\partial r} \right) + \left(\frac{\partial W_l}{\partial r} \right)^2 \frac{\partial D}{\partial W_l} \quad (6.6)$$

La ecuación planteada vale en cada punto interior del sólido, y expresa al contenido de agua local o humedad en base seca (W_l) del componente que difunde como función del tiempo (t) y la coordenada r, cuyos ejes son siempre perpendiculares a la superficie, y cuyo origen de coordenadas está en el centro de simetría (Becker, 1959; Bruce, 1985).

Funcionalidad simplificada del parametro de transporte

Para D independiente del valor de humedad local *durante el secado*, se obtiene:

$$\frac{\partial W_l}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 W_l}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial W_l}{\partial r} \right) \quad (6.7)$$

Debe indicarse que este modelo suele resolverse numéricamente usando correlaciones

$D = D(W_1, T)$ para el coeficiente de difusión (Maier y Bakker-Arkema, 1992; Zahed y Epstein, 1992). Esto es incorrecto estrictamente, pues la forma de la ec. (6.7) presupone que D no varía con el contenido de humedad *durante el secado*.

Martínez Vera y colab. (1995) corrigen esa deficiencia utilizando la versión completa de la ecuación de difusión (ec. (6.6)) que prevé el término de la variación del D con la humedad y emplean correlaciones del D que son consistentes con esa característica. Los autores lo aplican para el secado de maíz en lecho fluidizado con mezclado perfecto.

Condiciones iniciales y de contorno en transferencia de materia

Las condiciones iniciales y de contorno que pueden plantearse para resolver la ecuación diferencial a derivadas parciales (ec. (6.7)) son las siguientes:

$$\begin{aligned}
 t = 0 \quad W_1 &= W_0 & 0 \leq r \leq R \\
 r = 0 \quad \frac{\partial W_1}{\partial r} &= 0 & t > 0 \\
 r = R \quad (a) \quad -\rho_s D \frac{\partial W_s}{\partial r} &= k_p(p_{vs} - p_{va}) \equiv k_w(W_s - W_e) & t > 0 \\
 r = R \quad (b) \quad W_s &= W_e & t > 0
 \end{aligned}
 \tag{6.8}$$

donde se ha utilizado la nomenclatura $W_s \equiv W_1$ en $r = R$. Obsérvese que en ese punto, la superficie del cuerpo, hay dos condiciones de contorno posibles: La (a), como se ha visto en el capítulo 5, es general y supone una aproximación gradual de la presión de vapor del agua en la superficie del grano p_{vs} hacia la presión parcial del vapor en el seno del aire p_{va} . En otras palabras, la condición (a) plantea un acercamiento paulatino de la humedad de superficie del grano al valor asintótico W_e .

La condición prescrita (b) es un caso particular de la (a) para altos números de Biot de materia (Bi_m). Se ha visto en el capítulo 5 que el Bi_m viene dado por:

$$Bi_m = \frac{k_p R}{\left(\frac{\partial W_s}{\partial P_{vs}} \right) \rho_{s0} D} \equiv \frac{k_w R}{\rho_{s0} D} \quad (6.9)$$

Para $r = R$, la selección entre la condición de contorno general o la prescrita debe hacerse luego de evaluar el Bi_m . Esto se realizará a posteriori de la presentación del balance microscópico de energía.

6.3.2. Balance microscópico de energía con conducción no estacionaria en el grano

El balance microscópico de energía para esferas, considerando flujo de calor por conducción, puede escribirse de la manera siguiente (Sokhansanj y Bruce, 1987) :

$$\rho_{s0} C_p \frac{\partial T_l}{\partial t} = k_T \left(\frac{\partial^2 T_l}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial T_l}{\partial r} \right) \quad (6.10)$$

donde C_p es el calor específico y k_T la conductividad térmica "efectiva" del grano húmedo, ambas dependientes del contenido de agua medio en el grano (W). El valor k_T debería incorporar posibles efectos convectivos causados por la difusión de agua líquida durante el secado. El factor ρ_{s0} es la masa seca de grano referida al volumen inicial.

Condiciones iniciales y de contorno en transferencia de calor con evaporación superficial

Para la ecuación (6.10), las condiciones iniciales y de contorno que pueden plantearse, despreciando efectos de radiación, son las siguientes:

$$\begin{aligned} t = 0 \quad T_l &= T_0 & 0 \leq r \leq R \\ r = 0 \quad \frac{\partial T_l}{\partial r} &= 0 & t > 0 \\ r = R \quad k_T \frac{\partial T_l}{\partial r} &= h_T (T_a - T_l) - L_g k_w (W_l - W_e) & t > 0 \end{aligned} \quad (6.11)$$

la condición de contorno para $r = R$ es de tipo conductivo-convectivo-evaporativa, indicando

que el flujo de calor que ingrese al grano por conducción -utilizado para aumentar la temperatura del mismo- será la diferencia entre el calor cedido desde el aire por convección forzada y el utilizado por el grano para evaporar la humedad en la superficie. Puede indicarse, incidentalmente, que si el secado ocurriera en el período de velocidad constante, tal diferencia sería nula, esto es, todo el calor transferido del aire al grano se utilizaría en la evaporación del agua, manteniendo constante la temperatura de la superficie.

El valor L_g es el calor de desorción, dependiente de la humedad y la temperatura del grano según la expresión Clapeyron-Isoterma de sorción desarrollada en el capítulo 4.

6.3.3. Mecanismos controlantes en la velocidades de transferencia de calor y materia. Cálculo de números de Biot.

Se ha informado que el secado de cereales, y el de trigo en particular, transcurre en el período de velocidad decreciente de secado (Becker, 1959; Parti, 1993; Sun y Woods, 1994). Sin embargo, se requieren cálculos precisos del número de Biot de materia (Bi_m) para decidir, en $r = R$, entre las condiciones de contorno (a) o (b) de la ec. (6.8). Asimismo, se considera necesario evaluar el número de Biot de transferencia de calor (Bi_c) en las distintas condiciones, a efectos de decidir la utilización del balance microscópico ec. (6.10), balances macroscópicos, o aún para mantener la suposición de secado isotérmico.

Sokhansanj y Bruce (1987) calculan un $Bi_c = 0,13$ usando $R/3$ como longitud característica para geometría esférica. A su vez, Parti (1993) presentó un estudio teórico del secado de granos asignando distintos valores de Bi_c y Bi_m ; sin embargo, su definición del Bi_m no considera la conversión de humedad de grano en presión de vapor indicada en la ec. (6.9).

Secadoras continuas de trigo

El Biot de calor será definido aquí de la manera siguiente:

$$Bi_c = \frac{h_T R}{k_T} \quad (6.12)$$

y podrá observarse que la evaluación de los números adimensionales Bi_m (ec. (6.9)) y Bi_c (ec. 6.12) requerirán el conocimiento de propiedades físicas y fisicoquímicas.

6.3.3.1. Cálculo de Propiedades

- Coeficientes de transferencia aire-grano

Sokhansanj y Bruce (1987) realizaron un estudio específico de transferencia de calor en cebada, un grano de geometría y características similares al trigo. Los autores compararon varios coeficientes de transferencia y, en base a dos formas de la correlación de Gamson y colab. (1943) para lecho fijo, desarrollaron una versión que se denominará "Gamson-modificada", válida para números de Reynolds de partícula (Re_p) entre 20 y 1000 ($Re_p = G_a D_p / \mu$):

$$J_H = 3.27 Re_p^{-0.65} \quad (6.13)$$

Ígualando esta expresión particular del factor de Colburn a la definición general del J_H del capítulo 3 y utilizando las propiedades del aire presentadas en ese capítulo, se evaluó el coeficiente de transferencia de calor gas-partícula, h_T . Resulta de esto que $N_u \propto Re_p^{0.35}$ ó bien $h_T \propto G_a^{0.35}$. La misma expresión Gamson modificada se usó para calcular k_p o k_w del Biot de materia, por medio de la analogía de Chilton-Colburn: $J_M = J_H$ (Green y

Maloney, 1984) y la definición del J_M del capítulo 3. A efectos de calcular h_T , se utilizó un D_p típico de los obtenidos en el capítulo 2: $3,6 \times 10^{-3}$ m. En la Figura 6.1 Se representa h_T vs G_a .

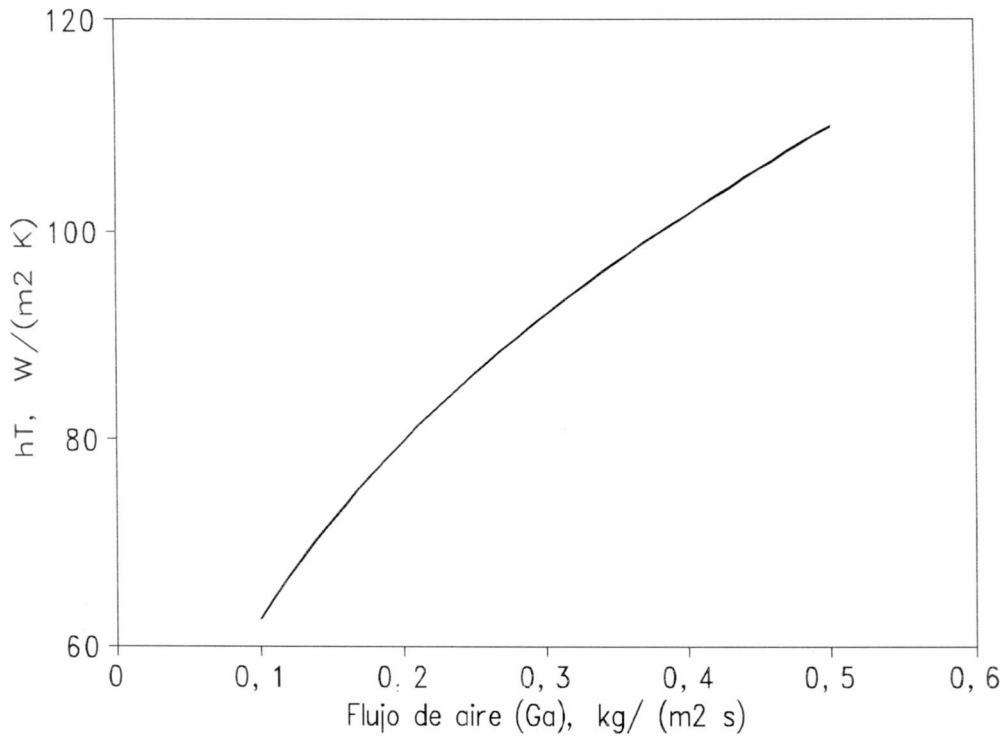


Figura 6.1. Coeficiente de transferencia de calor aire-granos de trigo en función del flujo másico de aire (G_a), evaluado a 60°C . Correlación de Gamson y colab. (1943) modificada por Sokhansanj y Bruce (1987).

Conductividad térmica del grano húmedo (k_T)

Para el cálculo de esta propiedad en unidades SI ($\text{W}/(\text{m K})$), se utilizó la expresión siguiente (Keey, 1972; Sokhansanj y Bruce, 1987) :

$$k_T = 0.14 + 0.68 W \tag{6.14}$$

Secadoras continuas de trigo

Para las humedades típicas de la poscosecha de trigo, los valores de k_T oscilan alrededor de 0,25 W/(mK), inscribiendo al trigo en una categoría similar a la de aislantes térmicos como asbestos, según se desprende de la información provista por Wakao y Kaguei (1982).

El Bi_m , como se ha visto en la ec.(6.9), requiere la evaluación de la derivada dW/dp_v en la superficie del grano, a partir de una isoterma de sorción. Usando la expresión de Henderson-Thompson seleccionada en el capítulo 4 (ec. 4.2), considerando en ella que $a_w = p_v/p_s$, y derivando W respecto de p_v , se obtiene:

$$\left(\frac{\partial W}{\partial p_v} \right)_T = \frac{0.01}{[k_{HT}(T_a + C_{HT})]^{1/N}} \frac{1}{N} \left[-\text{Ln} \left(1 - \frac{p_v}{p_s} \right) \right]^{\frac{1-N}{N}} \frac{p_s}{(p_s - p_v)}$$

Ecuación (6.15)

Obsérvese que se utilizó T_a como temperatura del aire, para indicar que se está suponiendo un equilibrio térmico entre aire y grano a efectos de calcular la derivada.

Coeficiente de difusión efectivo de agua en granos

Otra de las propiedades necesarias, es el D , para trigo. Como valor preliminar, se utilizó una correlación tipo Arrhenius independiente del contenido de agua, obtenida por Sun y Woods (1994):

$$D = 7,507 \times 10^{-8} \text{ EXP} \left(\frac{-2806,5}{T_a + 273,16} \right) \quad (6.16)$$

6.3.3.2. Biot de transferencia de calor

Los resultados del Bi_c se calcularon para a_w de 0,7 a 0,95 que es el que se presenta en poscosecha de trigo. La Figura 6.2 muestra los resultados para tres niveles de flujo

de aire, correspondientes a números de Re_p de 20, 60 y 100, todos incluidos en el rango de validez de la correlación de Gamson modificada.

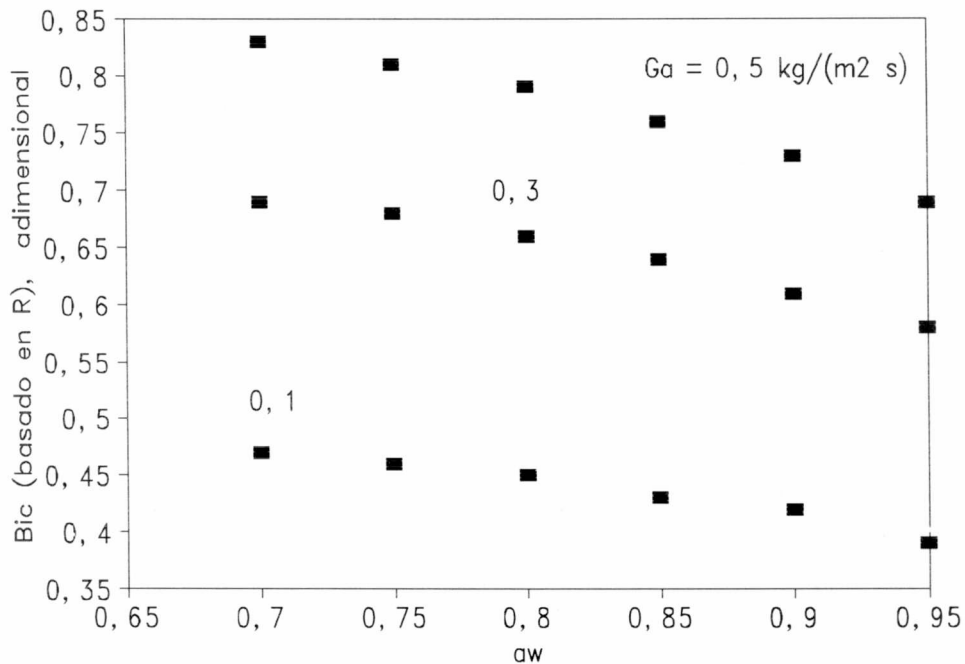


Figura 6.2. Número de Biot (evaluado a 60°C) para la transferencia de calor en función de la actividad acuosa de trigo, a distintos valores del flujo de aire.

Los valores del Bi_c son bastante bajos, cercanos a la zona de control externo por ser la resistencia interna (r_i) menor que la externa (r_e). De acuerdo a la definición del Bi_c (ec. 6.12), el mismo es expresable como $Bi_c = r_i/r_e$, donde $r_i = R/k_T$ y $r_e = 1/h_T$. Se analizarán las dos resistencias por separado. Dado que h_T es bastante elevado (60-110 W/(m² K)), la resistencia externa a la transferencia de calor no puede ser muy alta, a pesar de lo cual es comparativamente mayor que la interna. Analizando la causa de la baja resistencia interna relativa a la externa, se encontrará que siendo el trigo un material que no conduce bien el calor, $1/k_T$ tendería a ser alto, lo que tiende a aumentar r_i . En consecuencia, se concluye que r_i es menor que r_e sólo por el reducido tamaño del grano de trigo ($R \approx 1,8 \times 10^{-3}$ m).

Secadoras continuas de trigo

Como se indicó anteriormente, Sokhansanj y Bruce (1987) calcularon un Bi_c de 0,13 para cebada (flujo de aire $\approx 0,5 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$), pero usando una longitud característica $R/3$, y no R , como aquí. Así, sus valores serían compatibles con valores de 0,3 en la Figura 6.2. Basándose en $R/3$, Welty (1974) propone que la zona de control externo es $Bi_c \leq 0,1$, ó $Bi_c \leq 0,3$ para la Figura 6.2. Este gráfico muestra que el Bi_c varía entre 0,4 y 0,8, aumentando al incrementarse el flujo másico de aire (G_a). Mayores G_a producen un aumento de h_T y una reducción de su inversa, la resistencia externa, haciendo que la interna se vuelva progresivamente más importante.

Parti (1993) utiliza "R" como longitud característica y presenta un criterio más amplio, indicando que siempre y cuando el $Bi_c \leq 1,5$ se pueden admitir representaciones de control externo, esto es, un perfil plano de temperaturas dentro del grano. Esta condición es cumplida largamente por los valores de la Figura 6.2. En vista de que se desea modelar un lecho fijo de granos, que implica agregar una dificultad considerable al análisis de grano individual realizado aquí, se tratará de mantener el modelo de grano tan simple como sea posible y justificable. Por tal razón, se considerará perfil plano de temperaturas, evitándose así la resolución del balance microscópico de energía (ec. (6.10)).

6.3.3.3. Biot de transferencia de materia

Tomando un valor medio de densidad de partícula húmeda de $1300 \text{ kg}/\text{m}^3$ (capítulo 2), la densidad de materia seca referida al volumen húmedo se calculó como: $\rho_{s0} = 1300/(1+W)$ y se la empleó en el cálculo del número de Bi_m (ec. (6.9)). La Figura 6.3 presenta los resultados del Biot de materia:

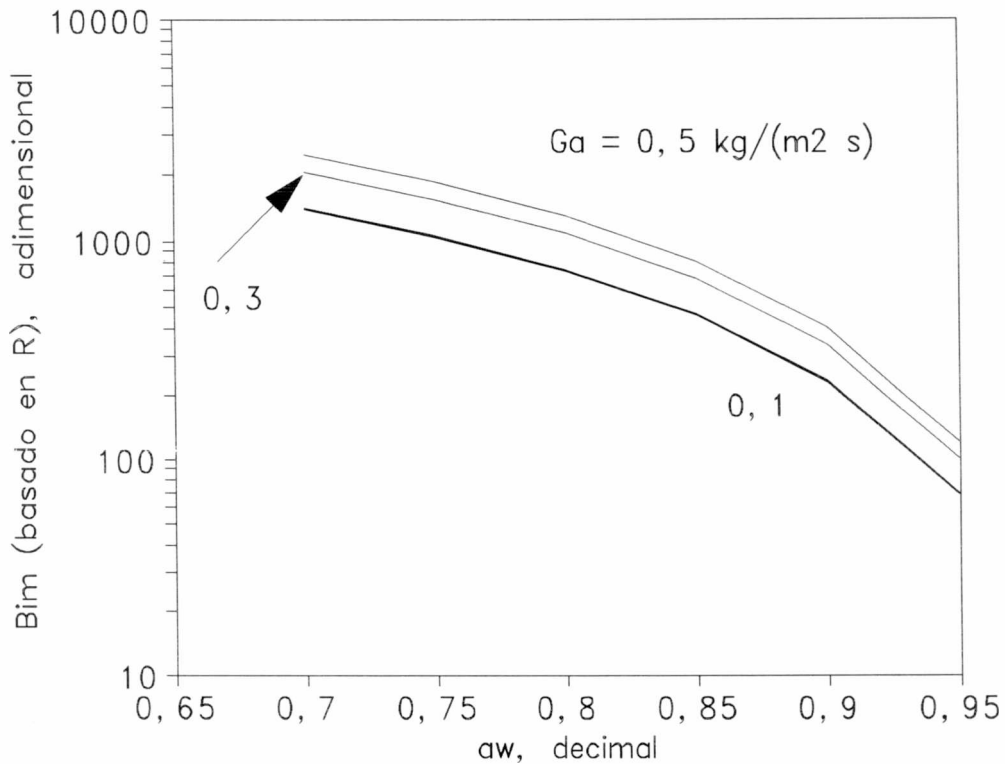


Figura 6.3. Número de Biot para la transferencia de materia (evaluado a 60°C) en función de la actividad acuosa de trigo, a distintos valores del flujo de aire.

Obsérvese que el efecto de variar el flujo de aire en un factor de 5 no afecta la zona de control interno estricto ($Bi_m > 50$) ni aún al comienzo del secado de trigo ($a_w = 0,95$). A diferencia del Biot de calor, el Bi_m aumenta más de un orden de magnitud *durante el transcurso* de una operación de secado típica (a_w de 0,95 a 0,7). En consecuencia, se puede considerar condición de contorno prescrita (condición de contorno (b) en $r = R$, ec. (6.8)), lo que simplifica el problema. Obsérvese que el aumento de la velocidad del aire tiende a incrementar el Biot, al aumentar el k_p y reducir, de esa forma, la resistencia pelicular a la transferencia. Se observa, asimismo, que el secado presenta fuerte control interno desde el comienzo a las velocidades de aire típicas en secadoras ($G_a = 0,3$ kg/(m² s)).

Secadoras continuas de trigo

Primera forma resultante del modelo

En virtud de los resultados hallados, el modelo para los granos resulta, en principio, de la forma siguiente:

Materia: El balance microscópico ec. (6.7) con la condición de contorno (b) en $r = R$ ($W_s = W_e$) de la ec. (6.8).

Energía: Quedaría un balance macroscópico con perfil plano de temperaturas (temperatura media del grano aproximadamente igual a la de superficie):

$$\rho_{s0} C_p \frac{dT}{dt} = h_T a_v (T_a - T) - \rho_{s0} \left(-\frac{dW}{dt} \right) L_g \quad (6.17)$$

donde $(-dW/dt)$ es la velocidad de secado basada en la humedad media del grano al tiempo t . Se obtiene entonces una ecuación diferencial ordinaria de coeficientes variables cuya condición inicial es $t = 0, T = T_0$. Las derivadas temporales son totales en razón de que para T el perfil es plano mientras que para W , siendo un valor medio de las W_1 en la esfera, sólo existe variación temporal. El valor medio W se calcula como sigue:

$$W = \frac{3}{R^3} \int_0^R W_1 r^2 dr \quad (6.18)$$

6.3.4. Análisis de la suposición de secado isotérmico en capa delgada

La resolución del balance macroscópico de energía, por consideración aproximada de ausencia de gradientes intragranulares, implica que existe un perfil plano cuyo valor de temperatura aumenta con el tiempo, aproximándose a la temperatura del aire. Sin embargo, las investigaciones de Pabis y Henderson (1962) en secado de maíz en capa delgada,

concluyen que para propósitos prácticos, las constantes cinéticas de secado pueden relacionarse con la temperatura (constante) del aire, en lugar de la del grano.

Esto significa la no resolución del balance macroscópico de energía, ec. (6.17) y la consideración práctica de secado isotérmico a la temperatura del aire. Si bien esa suposición puede ser cuestionable para un grano grande como maíz, podría ser aceptable para trigo. Sokhansanj y Bruce (1987) encontraron que el grano toma unos 4-5 min en alcanzar asintóticamente valores prácticamente iguales a la temperatura del aire. Fortes y colab. (1981) calculan el mismo lapso para alcanzar isoterminia en trigo. Por consiguiente, ese intervalo de tiempo parece pequeño comparado con los tiempos totales de secado, del orden de los 100-200 min, que ocurren en la práctica (Nellist, 1987). Chirife e Iglesias (1984) utilizaron la suposición de secado isotérmico para trigo.

Para verificar si la suposición de "isoterminia" es correcta, autores como Parry (1985) proponen evaluar la relación de difusividad térmicas (α) a másicas (D) en el grano. El valor de α se define como:

$$\alpha = \frac{k_T}{\rho_{s0} C_p} \quad (6.19)$$

usándose la correlación de conductividad térmica ya indicada y un valor de C_p evaluado en función de la humedad en base seca (Nellist, 1987):

$$C_p = C_{ps} + C_{pw}W \quad (6.20)$$

con $C_{ps} = 1300$ y $C_{pw} = 4187$, ambas en $J/(kg^\circ C)$. El valor de D, es el provisto por Sun y Woods (1994). La relación obtenida a $60^\circ C$, en función del a_w se observa en la Figura 6.4:

Secadoras continuas de trigo

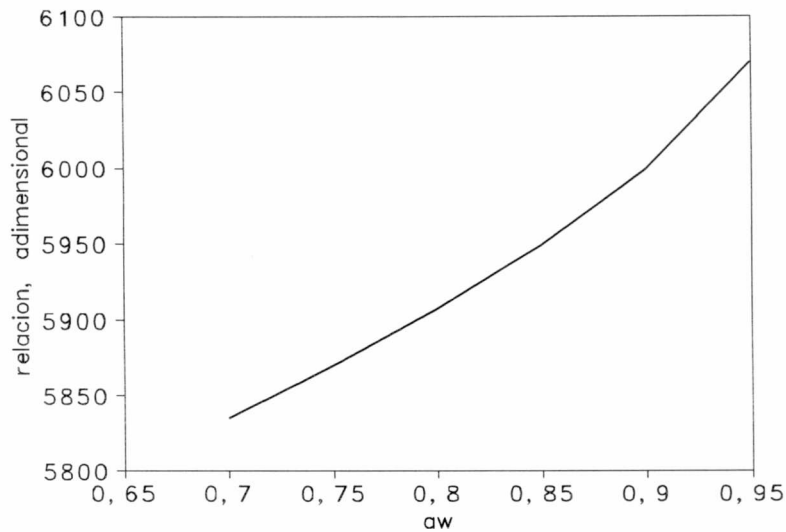


Figura 6.4. Relación α/D (evaluada a 60°C) para el grano, en función de la actividad acuosa.

La Figura 6.4. indica que la velocidad de relajación del potencial de transferencia de calor es unas 6000 veces más rápida que la de materia, razón por la cual, de acuerdo a Parry (1985) se la podría asumir "instantánea" frente a la lenta transferencia interna de materia. El orden de magnitud de α es 10^{-7} m²/s mientras que el de D , de 10^{-11} en las mismas unidades. Si bien los resultados indican que podría asumirse secado isotérmico, se realizó una verificación adicional. Se tomaron predicciones de la resolución completa de los balances microscópicos acoplados de materia y calor (ec. (6.7)) con condiciones de contorno ec. (6.8) (considerando condición (a) en $r = R$, es decir no prescrita) y ec. (6.10) y (6.11), respectivamente. Se utilizaron los coeficientes de difusión y propiedades indicados aquí para una esfera de $R = 2$ mm. Se resolvió el sistema de ecuaciones por diferencias finitas explícitas para una temperatura de aire de 70°C, $h_r = 0,06$. La humedad y temperatura de grano iniciales fueron 0,2 dec., b.s. y 20°C, respectivamente. Se representan los perfiles de humedad (Figura 6.5) y temperatura (Figura 6.6) para los primeros 6 minutos de secado.

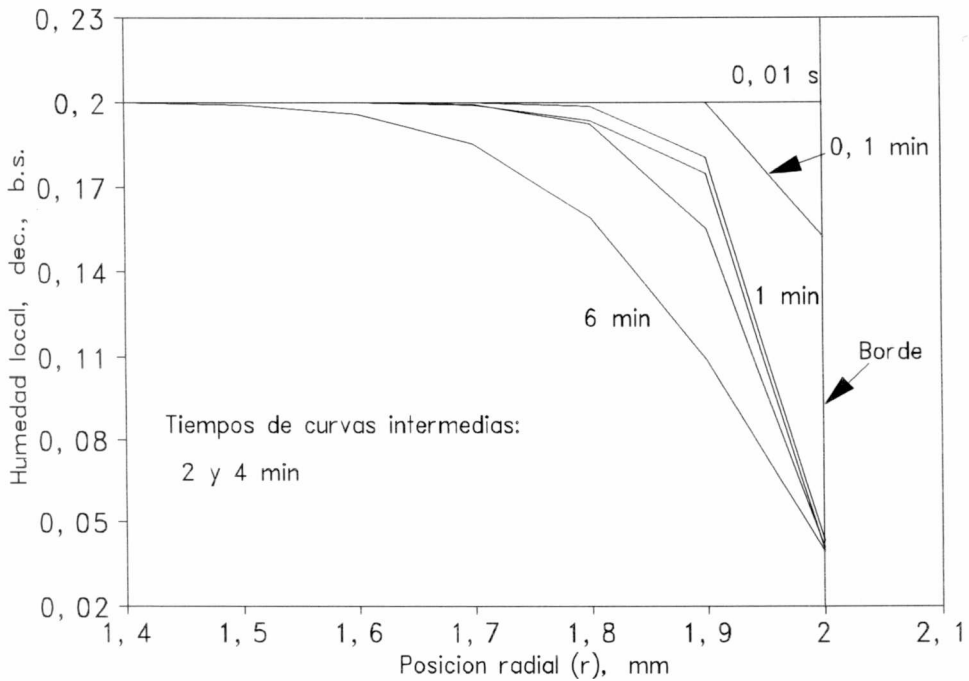


Figura 6.5. Perfiles de humedad en un grano de trigo. Secado a 70°C. $W_0 = 0.2$

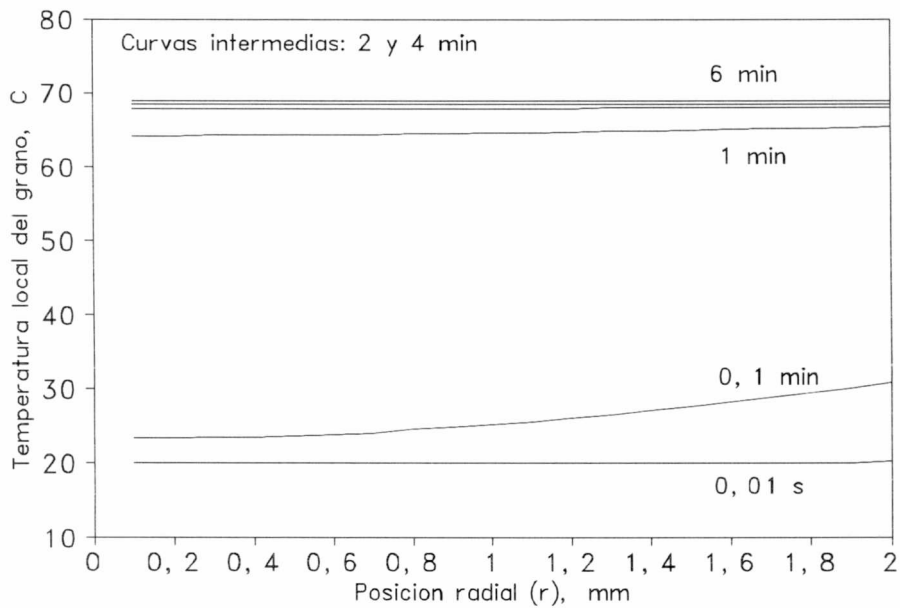


Figura 6.6. Perfiles de temperatura en un grano de trigo. Secado a 70°C. $T_0 = 20^\circ\text{C}$.

Secadoras continuas de trigo

Dado que aún no usando la condición de contorno prescrita en la Figura 6.5 se obtuvo una rápida convergencia hacia un valor superficial constante, se observa que la suposición de condición prescrita (control interno estricto) podría aplicarse.

A su vez, la Figura 6.6 muestra que los gradientes de temperatura en cada tiempo son muy suaves, y que la temperatura media alcanza valores próximos a la temperatura del aire luego de 1-2 minutos de secado. Se considera así que la simplificación de la condición de isoterminia en el ajuste de parámetros cinéticos del secado en capa delgada es justificable.

6.3.5. Solución Analítica de la Ecuación de Difusión

Los valores de los números de Biot: Bi_c y Bi_m , la relación α/D y las distribuciones de humedad y temperatura intergranular predichas en la sección anterior, permiten suponer que es posible recurrir a la solución analítica de la ecuación de difusión no estacionaria en esferas (ec. (6.7)), con condición prescrita en superficie y D independiente de la humedad del grano *durante el secado*.

La hipótesis que se formula para el secado de trigo en capa delgada, es que una solución analítica obtenible en estas condiciones permitirá una buena predicción de los datos, aún en la eventual presencia de una dependencia del D con la humedad, que será investigada experimentalmente.

La solución analítica, obtenida luego de integrar las humedades locales en el volumen de la esfera, es la siguiente (Crank, 1975; Suárez y colab., 1981; Chirife e Iglesias, 1984; Parry, 1985; Tolaba y Suárez, 1988):

$$W_{ad} = \frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1}{n^2} \text{Exp} \left[-n^2 \pi^2 \left(\frac{Dt}{R^2} \right) \right] \quad (6.21)$$

donde W es la humedad media del grano. El grupo $(D t/R^2)$ es el tiempo adimensional o número de Fourier (Fo) para transferencia de materia.

Por conveniencia, se puede definir un grupo adimensional X tal que $Fo = X^2 / 9$ (Becker, 1959). Reescribiendo la serie infinita en términos de X , se tiene:

$$W_{ad} = \frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{n=\infty} \frac{1}{n^2} \text{Exp} \left[-\frac{n^2 \pi^2}{9} X^2 \right] \quad (6.22)$$

donde $X^2 = a_v^2 D t$, siendo $a_v = 3/R$ para una esfera.

Para cada tiempo, y especialmente a tiempos cortos, la serie infinita $W = W(t)$ (ec. (6.21) ó (6.22)) requiere sumar un número considerable de términos para obtener convergencia.

A tiempos largos, $X > 0,8$ ($W_{ad} < 0,3$), la serie converge con un sólo término.

$$W_{ad} = \frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = \frac{6}{\pi^2} \text{Exp} \left[-\frac{\pi^2}{9} X^2 \right] \quad (6.23)$$

que permite obtener una recta en un diagrama semilogarítmico.

6.3.5.1. Solución analítica en serie infinita y ajuste del coeficiente de difusión a datos de secado en capa delgada

A efectos de ajustar el coeficiente de difusión a datos experimentales W vs t , las humedades de grano deben adimensionalizarse. Los valores de W_{ad} parten de 1 a $t = 0$ y rara vez se extienden a valores menores de 0,3 en secado de granos con aire caliente (Bruce, 1985). Así, sería necesario utilizar la serie infinita completa (ec. (6.22)) en el ajuste (Sun y Woods, 1994), pues la forma de tiempos largos (ec. 6.23) no sería válida en ese rango práctico. Este tema se ampliará a continuación.

Secadoras continuas de trigo

Inconvenientes de la serie infinita (ec. (6.22))

La serie infinita presenta varios inconvenientes:

- (1) Los programas comerciales de ajuste no lineal de parámetros no siempre incluyen la posibilidad de utilizar una función compuesta por numerosos términos.
- (2) A menudo no se conoce el número de términos a utilizar.
- (3) Estrictamente, es necesario realizar un programa de computadora para minimizar los residuos entre valores predichos y experimentales incluyendo una cota de error para lograr convergencia en cada tiempo.
- (4) Una vez ajustados los parámetros, su utilización para predecir curvas de secado en capa delgada requiere programación.
- (5) La utilización de la serie infinita como parte de un modelo de lecho fijo de granos aumenta considerablemente el tiempo de cálculo, dado que un lecho puede estar dividido en, al menos, 50 a 100 "capas delgadas" (Nellist, 1987).

Inconvenientes de la solución a tiempos largos (ec. 6.23))

La facilidad de utilizar una recta en un diagrama semilogarítmico para el ajuste de coeficientes de difusión es atractiva y ha sido utilizada por numerosos autores, como se observa en la recopilación de Zogzas y colab. (1994). Sin embargo, en el caso de granos, el uso de la ec. (6.23) requiere medir la curva W vs t para $W_{ad} < 0,3$, fuera del interés práctico, en zonas donde la humedad varía poco y está expuesta a errores de medición. Además, de existir una funcionalidad del D con la humedad, se obtendría un valor de D

promedio de la zona de humedades bajas, no representativos de la zona de tiempos cortos donde las humedades son mayores. El problema surge pues el D obtenido a tiempos largos deberá, necesariamente, utilizarse a posteriori en la serie infinita completa (ec. (6.22)) para predecir en la zona de tiempos cortos.

6.3.5.2. Ecuación difusiva de secado en capa delgada utilizada en este trabajo

Becker (1959) presentó un estudio muy original para el secado de granos y propuso una solución de la ecuación de difusión no estacionaria a tiempos cortos que con sólo 3 términos, predice la curva de secado entre $0,2 < W_{ad} < 1$ o $X < 1$ con exactitud prácticamente coincidente con la de la serie infinita.

El autor propuso en principio que, a tiempos "cortos", los cambios se limitan a la vecindad de la superficie, por lo cual el cuerpo se comportaría como un medio semi-infinito plano. Así, resolvió la forma plana de la ec. (6.7) (el término $2/r$ desaparece), usando condición prescripta, por medio de la integral de error de Gauss. La deducción de Becker se detalla en el apéndice de este capítulo, y permite obtener una primera solución válida para geometría plana:

$$W_{ad} = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} X \quad (6.24)$$

Para extender la validez de la ec. (6.24) a otras geometrías, como la esférica, se debe expandir la ecuación obtenida en serie de Maclaurin (Taylor alrededor de $X = 0$). Dado que $W_{ad} = f(X)$, se puede escribir:

$$f(X) = f(0) + f'(0) X + \frac{f''(0)}{2} X^2 + \dots + \frac{f^n(0)}{n!} X^n \quad (6.25)$$

donde $f(0) = 1$ y $f'(0) = -2/\sqrt{\pi}$, siendo las derivadas de mayor orden claramente dependientes de la forma del cuerpo sólido. Sin embargo, como la serie debía converger rápidamente alrededor de $X = 0$, se consideró que los términos de orden superior a $f''(0)$

Secadoras continuas de trigo

podían despreciarse, llegando a:

$$W_{ad} = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} X + \frac{f''(0)}{2} X^2 \quad (6.26)$$

El rango de validez de esta expresión puede determinarse comparándola con algunas soluciones en serie infinita de la ecuación diferencial de difusión (ec. (6.22)). Para evaluar $f''(0)/2$, Becker (1959) reescribió la ec. (6.26) en la forma $Y \equiv (1 - W_{ad} / X)$, para la cual queda la ecuación de una recta:

$$\frac{1 - W_{ad}}{X} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} - \frac{f''(0)}{2} X \quad (6.27)$$

cuya pendiente es $f''(0)/2$ y la comparó con las predicciones correspondientes de la serie infinita, reordenada como Y vs X , para distintas geometrías. En el caso de esferas, la gráfica de la ec. (6.22) se representa en la Figura 6.7 :

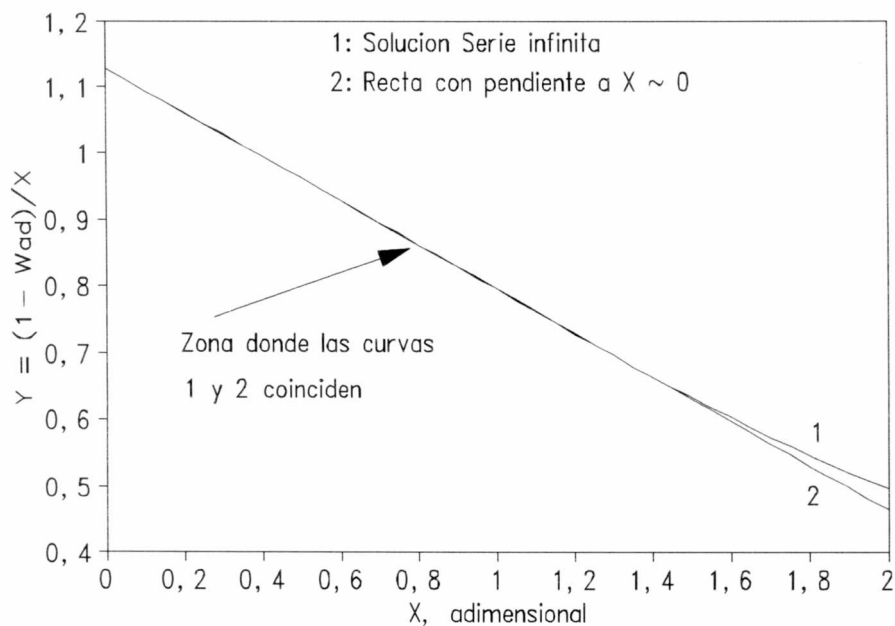


Figura 6.7. Solución en serie infinita para esferas (ec. (6.22)) (predicción "1") y ecuación de Becker (recta "2"), expresadas como Y vs X.

Por consiguiente, dado que la solución analítica Y vs X presenta tendencia perfectamente lineal con pendiente = -0,331 para $X \leq 1$, el valor de la pendiente atribuible a la expresión de Becker (1959) (ec. (6.27) es:

$$\frac{f''(0)}{2} = 0.331 \quad (6.28)$$

Así, reescribiendo la ecuación de Becker (ec. (6.26)) con la pendiente para esferas y reemplazando X por su definición, se obtiene:

$$W_{ad} = \frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} a_v \sqrt{Dt} + 0.331 a_v^2 Dt \quad (6.29)$$

válida, como se mencionó entre $0,2 < W_{ad} < 1$ ó $X < 1$. Esta ecuación será utilizada en el presente trabajo de tesis como la ecuación constitutiva de transferencia de materia grano-aire. La misma se aplicará en este capítulo al ajuste de datos de secado en capa delgada, a efectos de estimar los coeficientes de difusión.

La solución en serie infinita de la ecuación de difusión (ec.(6.22)), la ecuación de tiempos cortos de Becker (1959) (ec. (6.29)) y la convergencia de la serie en un término para tiempos largos (ec. (6.23)), se representan conjuntamente en la Figura 6.8.

Se observa que, efectivamente, la ecuación de tiempos cortos de Becker (1959) coincide con la serie infinita hasta valores de X incluso mayores que 1, mientras que, por encima de 1, la ecuación de tiempos largos pasa a ser válida por coincidir con la serie. Fuera de su rango de validez, la ecuación de Becker comienza a aumentar la humedad predicha, por el peso de su término positivo en X^2 . Según la gráfica, se puede evitar el uso de la serie infinita usando la ecuación de tiempos cortos hasta $W_{ad}=0,2$ para luego reemplazarla por la de tiempos largos.

Secadoras continuas de trigo

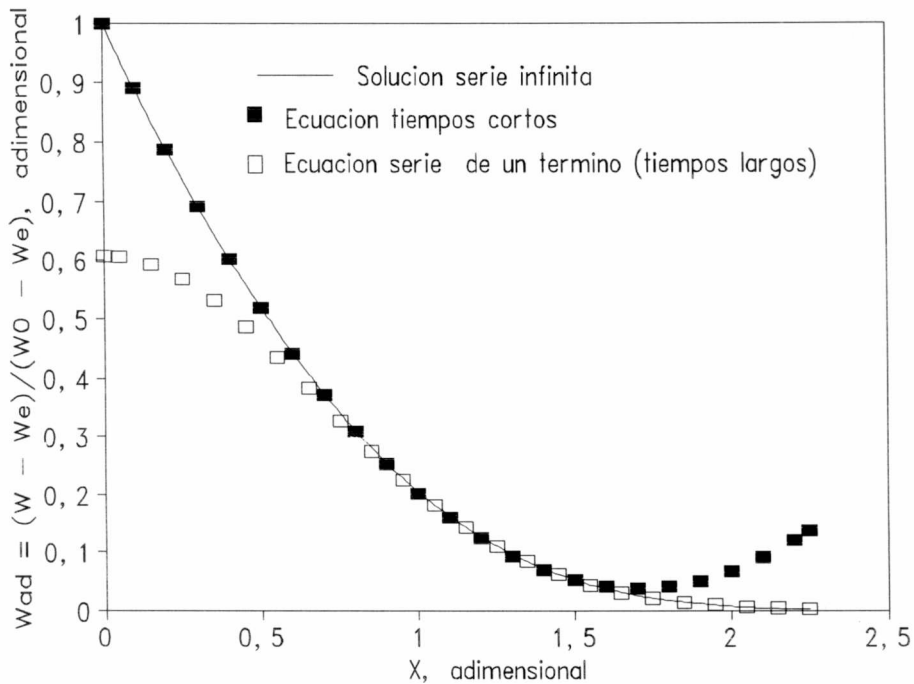


Figura 6.8. Serie infinita analítica para esferas, solución de Becker a tiempos cortos, y convergencia de la serie infinita a tiempos largos.

Trabajo previo con la ecuación de Becker

Becker (1959) utilizó su ecuación para el secado de trigo en estufa de vacío a distintas temperaturas, pero adimensionalizó las humedades usando un valor prescripto superficial constante con la temperatura $W_s = 0,102$. Ese valor constante fué criticado por Spencer (1972) indicando que el valor más correcto es el que depende de las condiciones del aire a través de la isoterma de sorción $W_s \equiv W_e = f(T_a, h_r)$. La observación de Spencer no puede sino ser correcta puesto que el vacío es utilizado para las determinaciones de humedad (Suárez y colab., 1981), con lo cual el valor asintótico debería ser necesariamente $W_s \approx 0$. Al utilizar esa humedad prescripta tan elevada, Becker obtuvo valores muy altos del coeficiente de difusión y, particularmente, de la energía de activación comparados con los de Sun y Woods (1994).

Por consiguiente, como se anticipó en el capítulo 4, se empleará una isoterma de sorción, en nuestro caso la de Henderson-Thompson trigo duro, para calcular el valor prescrito $W_e = W_e(T_a, h_r)$.

6.4. MATERIALES Y METODOS

6.4.1. Material

Se utilizó Semilla Fiscalizada de trigo (*Triticum aestivum*) cv PROINTA- Isla Verde (trigo pan tipo "duro"), cosecha 96/97. El material, secado naturalmente a campo y libre de granos rotos y materia extraña, fué provisto por PRODUSEM Pergamino. La humedad del material, determinada al recibo, fué $M_{pB} = 12,53\%$ b.h. ó $W_B = 0,1433$ dec., b.s.. Todas las humedades de grano fueron medidas con el método de estufa descripto en el capítulo 2. De aquí en adelante, las humedades de los granos se darán en valores decimales, b.s., excepto aclaración en contrario.

6.4.2. Preparación del material para las experiencias de secado en capa delgada

El material se dividió en 4 muestras de aproximadamente 300 g cada una, que fueron rehumectadas a distintos valores de humedad inicial para el secado (W_0), cubriendo un rango aún mas amplio que el usual en la recepción de trigo en plantas de acopio (ver capítulo 1).

El cálculo del agua adicionada de rehumectación (m_{wa}) se realizó a través de la fórmula siguiente:

$$m_{wa} = m_B \frac{W'_0 - W_B}{1 + W_B} \quad (6.30)$$

basada en la igualdad de masas secas de la muestra original y la rehumectada. En la ec.(6.30), m_B es la masa de granos a la humedad original W_B . Los valores de W'_0 son

Secadoras continuas de trigo

humedades deseadas al final de la hidratación, pero los valores que se utilizan son los de W_0 , determinados posteriormente por estufa. La humectación de los granos se realizó de acuerdo a la técnica de tambor rotatorio descrita en el capítulo 2.

Las muestras hidratadas se alojaron en recipientes herméticos de plástico, mantenidos al menos por 72 h en cámara frigorífica de 0°C a efectos de evitar crecimiento microbiano y permitir la uniformización de la humedad dentro de las semillas. Las determinaciones de W_0 se realizaron inmediatamente después de esta etapa.

Los valores efectivos de W_0 obtenidos fueron los siguientes: 0,1891 (15,83), 0,2133 (17,58), 0,2396 (19,34) y 0,2694 (21,22). Los valores entre paréntesis indican % b.h. Los recipientes se transfirieron de la cámara de 0°C a la planta piloto un día antes de las experiencias de secado, a efectos de que se equilibraran con la temperatura ambiente.

6.4.3. Equipo de Secado en Capa Delgada

El equipo utilizado consiste de un Ventilador Centrífugo de 1,5 kW, 2800 rev/min con caudal máximo de 0,1 m³/s (A) que aspira aire ambiente de la planta piloto, y lo envía a una conducción (B), hacia dos módulos de resistencias eléctricas (C1 y C2) con reguladores para obtener la temperatura deseada (D). El aire calentado, cuya presión manométrica se determinó con un "tubo en U" vertical de rama abierta (E), se condujo por la tubería (F) (diámetro interior: 0,043 m) hacia una brida de orificio (G), conectada a otro manómetro vertical (H). El flujo se dirige luego hacia la cámara de secado (I) donde pasa de arriba hacia abajo a través de la bandeja de malla metálica (J) que sostiene la capa delgada de granos. El diámetro interno de la bandeja es de 0,175 m (Cases, 1997). Este aire se evacúa al ambiente por una conducción (K), suficientemente lejos de la boca de aspiración del ventilador (Figura 6.9). El sistema dispone de una derivación de aire (L) para pesadas de la capa delgada "in situ", pero éste no fué utilizado en estas experiencias. La temperatura del aire de secado se midió con un termómetro de mercurio de precisión $\pm 0,5^\circ\text{C}$, ubicado a la entrada a la cámara de secado.

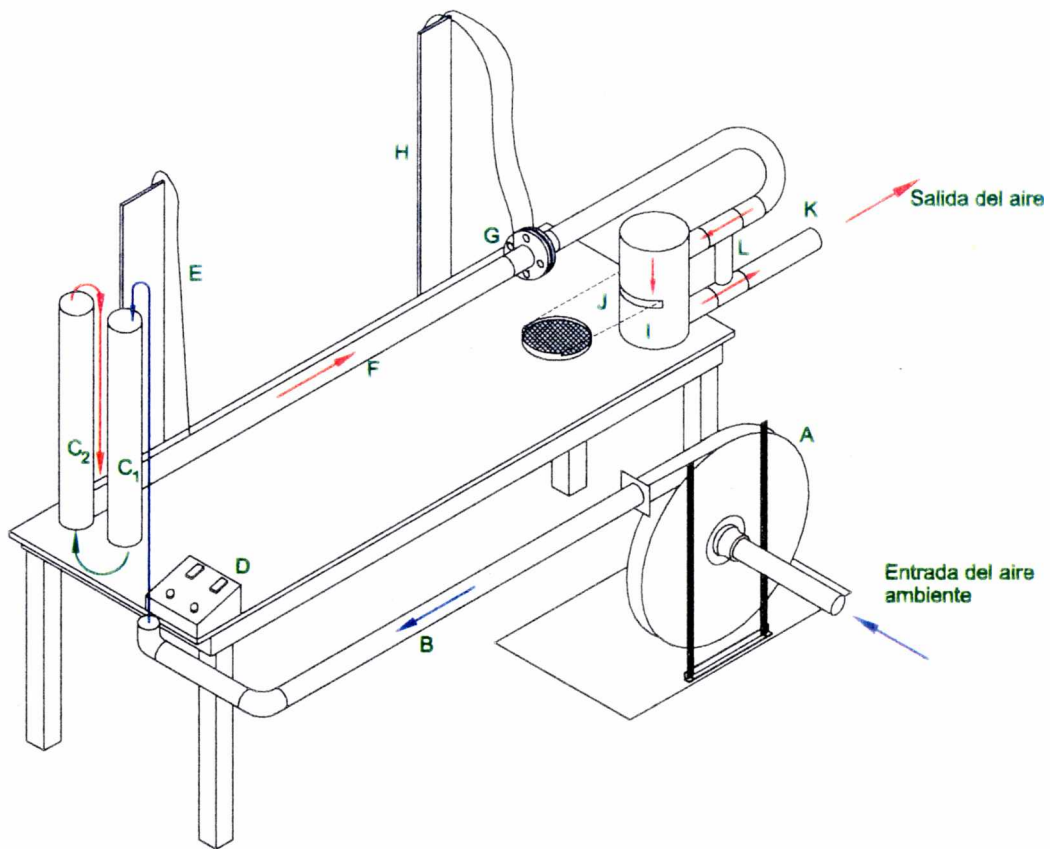


Figura 6.9. Equipo de secado en capa delgada

6.4.4. Técnica experimental de obtención de datos

Obtención de los pesos y humedades de la muestra, a distintos tiempos.

Como se indicó en 6.4.3., la cámara de secado contiene una bandeja con base de malla metálica para sostener los granos. Esta se coloca o remueve en forma lateral (Figura 6.9). Se tuvo especial cuidado en lograr que la cámara no tuviera fugas con la bandeja insertada, lo cual se logró con el uso de burletes, y en permitir una rápida extracción y reposición para pesadas periódicas, sin pérdida de material sólido.

Secadoras continuas de trigo

Pesando la muestra inicial (m_0) y conociendo la humedad inicial de la muestra (determinada por el método de estufa), la masa seca de la muestra, supuesta constante durante la experiencia, se calculó según:

$$m_s = \frac{m_0}{1 + W_0} \quad (6.31)$$

Los valores restantes de la curva de secado se obtuvieron por pesada de la bandeja. Cada pesada: extracción de bandeja, lectura del peso de la muestra (m_t), y re inserción de bandeja en el equipo, tomaba unos 15-20 s. Las humedades a los distintos tiempos se calcularon con la expresión siguiente:

$$W = \frac{m_t}{m_s} - 1 \quad (6.32)$$

Cada corrida experimental involucró 10 pesadas, no realizándose más por considerárselo innecesario para ajustar apropiadamente parámetros cinéticos y para no perturbar significativamente la operación de secado.

Las pesadas se realizaron en una balanza digital de precisión (resolución: 0,001 g), y las masas iniciales de las muestras de trigo en la bandeja oscilaron alrededor de 85 g. Dado que las pérdidas de peso total variaron, en las 16 experiencias realizadas, entre 6 y 10 g, el error de determinación del agua total removida fué despreciable.

A efectos de verificar la constancia de la materia seca en la bandeja (por eventuales pérdidas de material durante las sucesivas extracciones para pesada), se determinó la humedad del material de la bandeja al finalizar cada corrida de secado, mediante el método de estufa. La diferencia de las humedades finales entre los valores obtenidos con la ecuación (6.32) y el método de estufa fue, en promedio, de 0,0023 dec., b.s.. Estas diferencias son mínimas, estando dentro del error aceptado para método de estufa (0.2% b.h.).

Preestimación aproximada del tiempo de corrida y espaciado de las pesadas

Bruce (1985) ha indicado que, a efectos de determinar parámetros cinéticos, las distintas experiencias de capa delgada deberían finalizarse en el mismo valor de humedad adimensional final (W_{adf}). Teniendo ésto en consideración, se preestimaron los tiempos de corrida (t_f) a las temperaturas experimentales utilizando una ecuación empírica de Page (ecuación (6.2)) ajustada a datos obtenidos para trigo comercial en el mismo equipo, durante un estudio preliminar realizado para $W_0 = 0,2646$ y temperaturas de aire de 40, 50 y 60°C. Los valores de t_f surgen de:

$$t_f = - \left(\frac{\text{Ln } W_{adf}}{k_{Page}} \right)^{1/N} \quad (6.33)$$

donde k_{Page} surge de una expresión tipo-Arrhenius:

$$k_{Page} = k_0 \text{Exp} \left[- k_1 / (T_a + 273.2) \right] \quad (6.34)$$

siendo $k_0 = 34,55 \text{ s}^{-1}$ y $k_1 = 2820 \text{ K}^{-1}$, donde T_a es la temperatura del aire en °C. El valor de N resultó de 0,604, independiente de la temperatura.

Así, eligiendo un valor W_{adf} de 0,3, los valores de t_f obtenidos fueron redondeados a 60, 80, 125 y 240 min para las temperaturas de aire de secado elegidas de 70, 60, 50 y 35°C, respectivamente. Las temperaturas seleccionadas pertenecen a un rango típico de secado de trigo con aire caliente.

Secadoras continuas de trigo

La ec.(6.33) se utilizó, asimismo, para preestimar la distribución de pesadas en el tiempo t_f , tratando de obtener similares pérdidas de peso (similar precisión) entre pesadas consecutivas. La no linealidad de la curva de secado hace necesario realizar pesadas más frecuentes al inicio que al final de la misma.

Regulación de la temperaturas de secado

En cada experiencia, las temperaturas del aire a la entrada a la cámara (Figura 6.9) se mantuvo constante mediante la regulación manual del módulo de dos resistencias eléctricas (0,5 kW cada una). El equipo contaba con una buena inercia térmica, lo que permitió mantener el valor de T_a en todas las corridas en $\pm 0,5^\circ\text{C}$ del valor deseado. Esto implicó un permanente monitoreo del valor del termómetro y la realización de pequeños ajustes de la potencia de calefacción cuando era necesario.

Determinación del caudal de aire

El caudal de aire dirigido a la cámara de secado se determinó en base a la pérdida de carga del aire a través de una placa de orificio para gases, de tipo concéntrico de 40 mm, modelo S150RF (caudal máximo: 110 kg/h) fabricada por Weisz Instrumentos, S.A. El cálculo requirió, asimismo, la determinación de la presión manométrica de la corriente de aire aguas arriba de la brida (Figura 6.9).

Determinación de las condiciones ambientales

Durante cada experiencia, se realizaron varias lecturas de las temperaturas de bulbo seco y húmedo de la planta piloto, por medio de un psicrómetro ventilado. Los valores, promedio de mínimas variaciones, se utilizaron como datos en el programa desarrollado VPAIR (capítulo 3) para determinar la humedad absoluta del aire (h_a).

Valores del flujo de aire elegido para las experiencias

Como se ha visto en las Figuras 6.2 y 6.3 para el Bi_c y Bi_m , respectivamente, valores en torno a $G_a = 0,3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ posibilitan un control predominantemente externo para transferencia de calor e interno estricto para transferencia de materia. Ese flujo de aire es, además, un valor práctico para el secado en secadoras (Nellist, 1987). Al mismo tiempo, según Woods y Favier (1994), asegura condiciones constantes de aire en secado de una capa delgada de un grano de espesor (aproximadamente 4 mm).

Esquema del trabajo experimental

Las cuatro muestras de distinta humedad inicial se subdividieron, cada una, en otras cuatro para el secado a 35, 50, 60 y 70°C. El esquema del trabajo experimental se puede resumir como indica la Figura 6.10.

Secadoras continuas de trigo

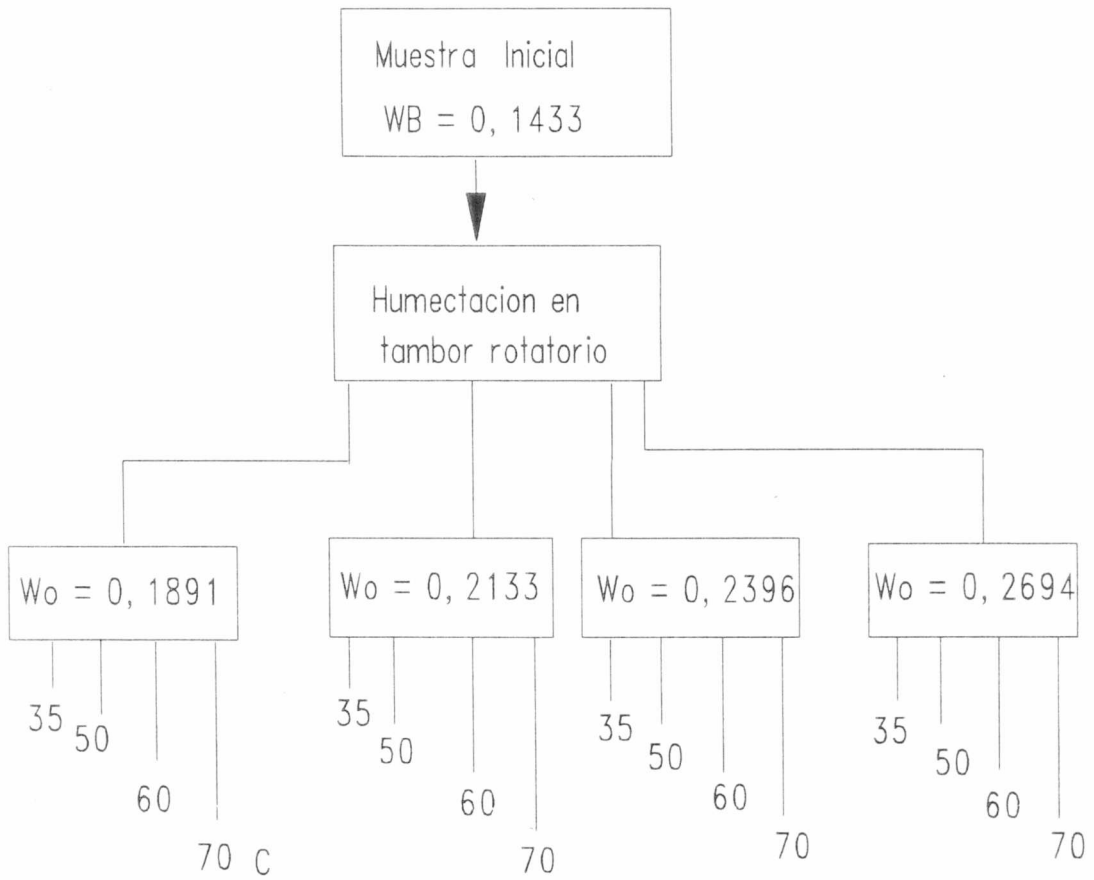


Figura 6.10. Esquema de la preparación de muestras y temperaturas de secado en capa delgada

6.5. RESULTADOS Y DISCUSION

6.5.1. Condiciones operativas

Las condiciones operativas de las 16 corridas realizadas se listan en la Tabla 6.1. La misma indica, de izquierda a derecha, la humedad inicial de los granos, temperatura (de bulbo seco) del aire a la entrada a la cámara de secado (T_a), temperaturas de bulbo seco (T_{bs}) y húmedo ambiente (T_{bh}), humedad absoluta (h_a), humedad relativa a la temperatura de secado (h_{ra}), humedad de equilibrio de los granos (W_e), calculada en función de T_a y h_{ra} con la ecuación de isoterma de Henderson-Thompson para trigo duro (capítulo 4, ec. (4.2)) y flujo másico de aire (G_a) referido a la sección transversal de la bandeja.

Tabla 6.1. Condiciones experimentales para el secado de trigo PROINTA-Isla Verde

W_0 dec., b.s.	T_a °C	T_{bs} °C	T_{bh} °C	h_a kg/kg	h_{ra} decimal	W_e dec., b.s.	G_a kg/(m ² s)
0,2694	35	24,5	19,6	0,0123	0,35	0,1028	0,30
	50	20,0	18,6	0,0128	0,17	0,0660	0,33
	60	19,0	18,1	0,0126	0,10	0,0503	0,35
	70	19,1	18,0	0,0124	0,06	0,0393	0,37
0,2396	35	19,0	17,9	0,0124	0,35	0,1032	0,31
	50	20,3	18,7	0,0128	0,17	0,0660	0,32
	60	20,8	18,7	0,0126	0,10	0,0503	0,35
	70	25,7	20,0	0,0123	0,06	0,0391	0,35
0,2133	35	19,4	16,3	0,0103	0,29	0,0937	0,30
	50	21,8	17,8	0,0111	0,14	0,0616	0,33
	60	22,0	18,0	0,0112	0,09	0,0477	0,35
	70	26,7	20,5	0,0126	0,07	0,0395	0,35
0,1891	35	22,0	18,7	0,0121	0,34	0,1022	0,31
	50	23,5	20,2	0,0135	0,17	0,0676	0,32
	60	24,5	21,0	0,0142	0,11	0,0538	0,34
	70	24,8	19,8	0,0124	0,06	0,0392	0,35

Secadoras continuas de trigo

6.5.2. Efecto de la temperatura del aire

Los resultados experimentales de humedad de grano (W) de las curvas de secado se adimensionalizaron como W_{ad} por medio de la ec. (6.1), usando las condiciones de la Tabla 6.1. Agrupando los datos por nivel de W_0 , se puede observar la influencia de la temperatura del aire. Los mismos se muestran en las Figuras 6.11 a 6.14.

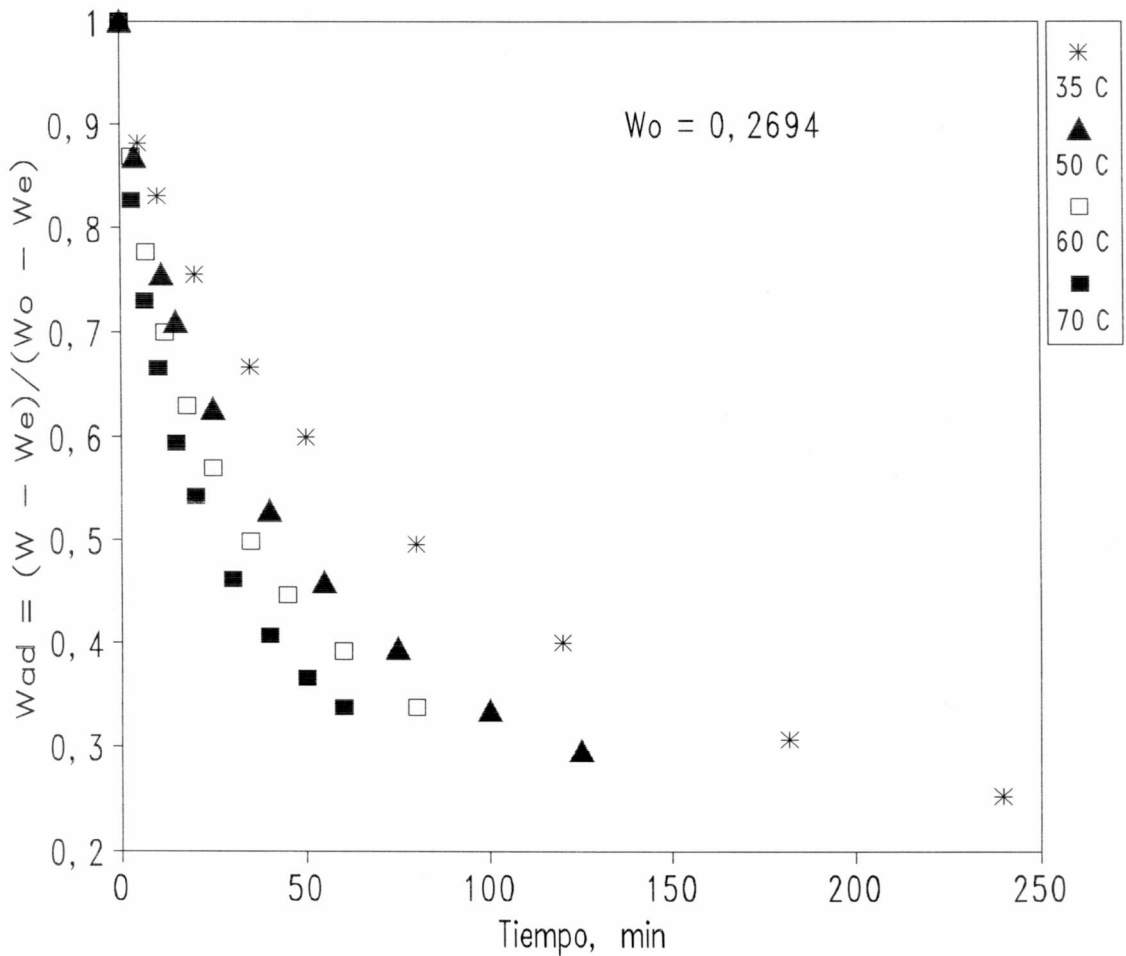


Figura 6.11. Humedad adimensional de los granos en función del tiempo para secado de trigo a 35, 50, 60 y 70°C. Humedad Inicial (W_0) = 0,2694 dec., b.s.

En cada curva de la Figura 6.11, se observa que el secado presenta velocidad decreciente bien definida, dado que la pendiente disminuye sostenidamente en función del tiempo. Por otro lado, el efecto de la temperatura es fuerte. Para tener una medida de éste, se fijó una W_{ad} experimental de 0,35 en la Figura 6.11 obteniéndose tiempos de secado de 180, 105, 80 y 50 minutos para temperaturas de aire de 35, 50, 60 y 70°C, respectivamente. Los tiempos obtenidos fueron comparables a los preestimados con la ecuación de Page (ec. (6.33)). En los otros niveles de humedad inicial: 0,2396, 0,2133, 0,1891 (Figuras 6.12 a 6.14, respectivamente), los resultados mantienen un comportamiento similar con la temperatura.

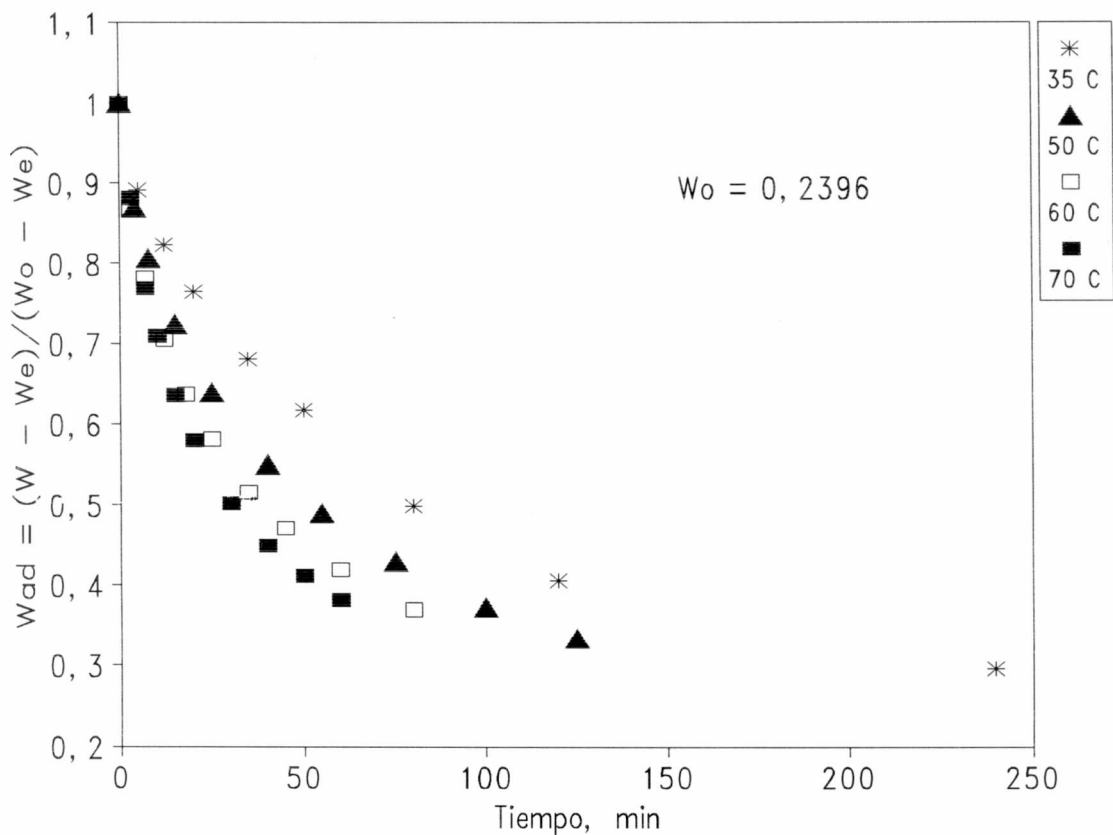


Figura 6.12. Humedad adimensional de los granos en función del tiempo para secado de trigo a 35, 50, 60 y 70°C. Humedad Inicial (W_0) = 0,2396 dec., b.s.

Secadoras continuas de trigo

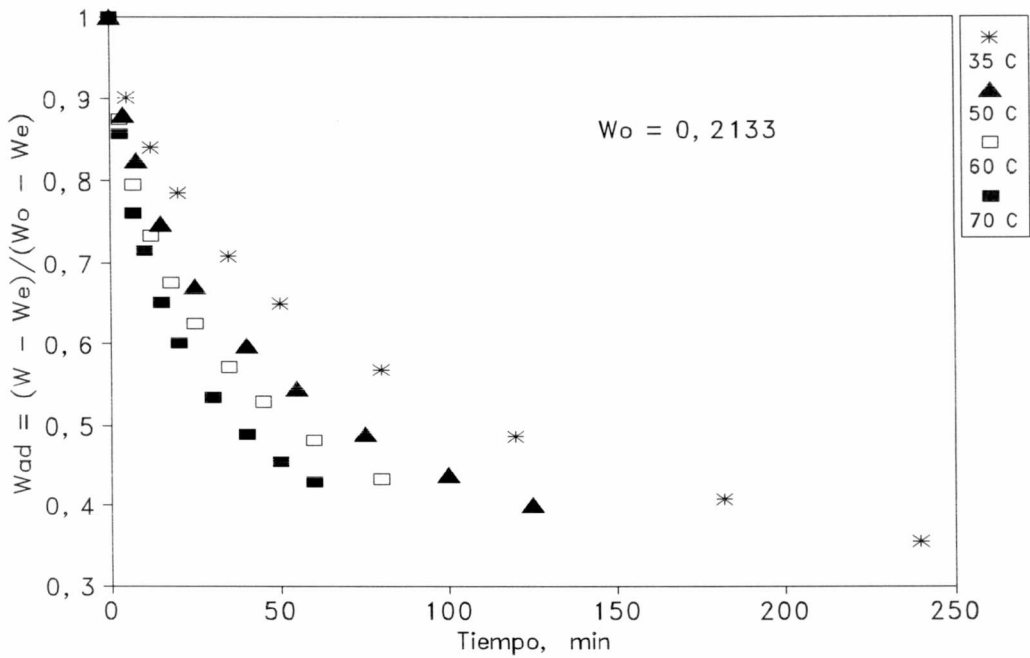


Figura 6.13. Humedad adimensional de los granos en función del tiempo para secado de trigo a 35, 50, 60 y 70°C. Humedad Inicial (W_o) = 0,2133 dec., b.s.

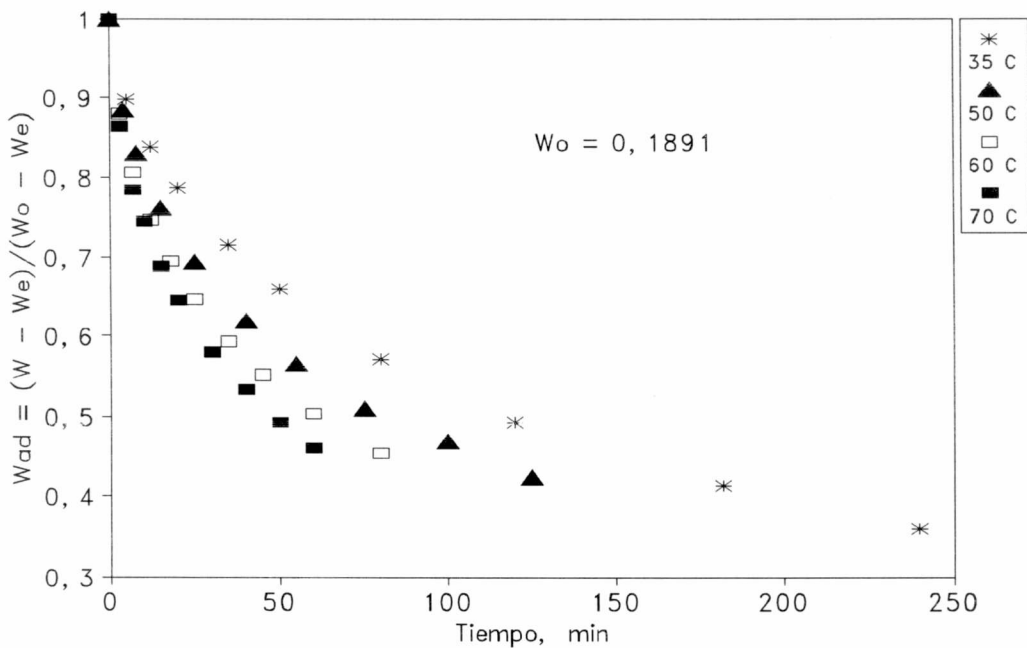


Figura 6.14. Humedad adimensional de los granos en función del tiempo para secado de trigo a 35, 50, 60 y 70°C. Humedad inicial (W_o) = 0,1891 dec., b.s.

La mayor diferencia que se observa entre las Figuras 6.11 a 6.14 es que, a iguales tiempo de secado, las humedades adimensionales finales ($W_{ad f}$) tienden a ser menores en los gráficos de mayor humedad inicial. Los valores de $W_{ad f}$ valen entre 0,25 y 0,35 en la Figura 6.11, mientras que en la Figura 6.14 oscilan en torno a 0,35-0,45, indicando que la velocidad media de secado es mayor, aún en términos adimensionales, al partir de mayores W_0 . Para verificar el posible efecto de W_0 , los datos se reagruparán por nivel de temperatura constante.

6.5.3. Efecto de la humedad inicial del grano (W_0).

Si bien existe una coincidencia generalizada sobre el efecto de la temperatura en la curva de secado, no ocurre lo mismo con el efecto de la humedad, sobre el cual hay muy pocos datos medidos. Se analizará la influencia de W_0 en la curvas de secado a 35°C .

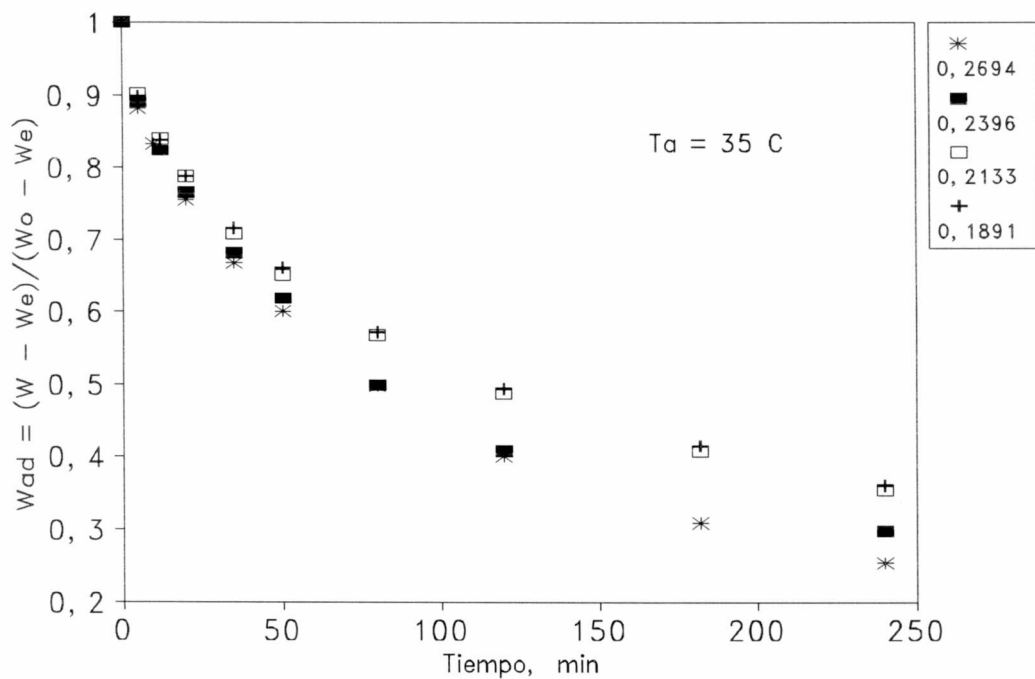


Figura 6.15. W_{ad} observado vs t a distintas W_0 para $T_a = 35^\circ\text{C}$

Secadoras continuas de trigo

Debe indicarse que si bien es esperable un efecto acelerador de W_0 en la velocidad de secado dimensional ($-dW/dt$) por aumentar la fuerza impulsora global ($W_0 - W_e$), tal efecto debería neutralizarse por adimensionalización (ver eje de ordenadas Figura 6.15 o Ec. (6.1)).

La Figura 6.15 muestra que la compensación no es completa, pues las curvas de W_{ad} vs t se apartan entre sí, a medida que progresa el secado y se vuelven adimensionalmente "más rápidas" a mayores W_0 . Así, se asume que el parámetro de transporte debería aumentar con W_0 . Los datos a 50, 60 y 70°C (Figuras 6.16 a 6.18) permitirán verificar estas observaciones.

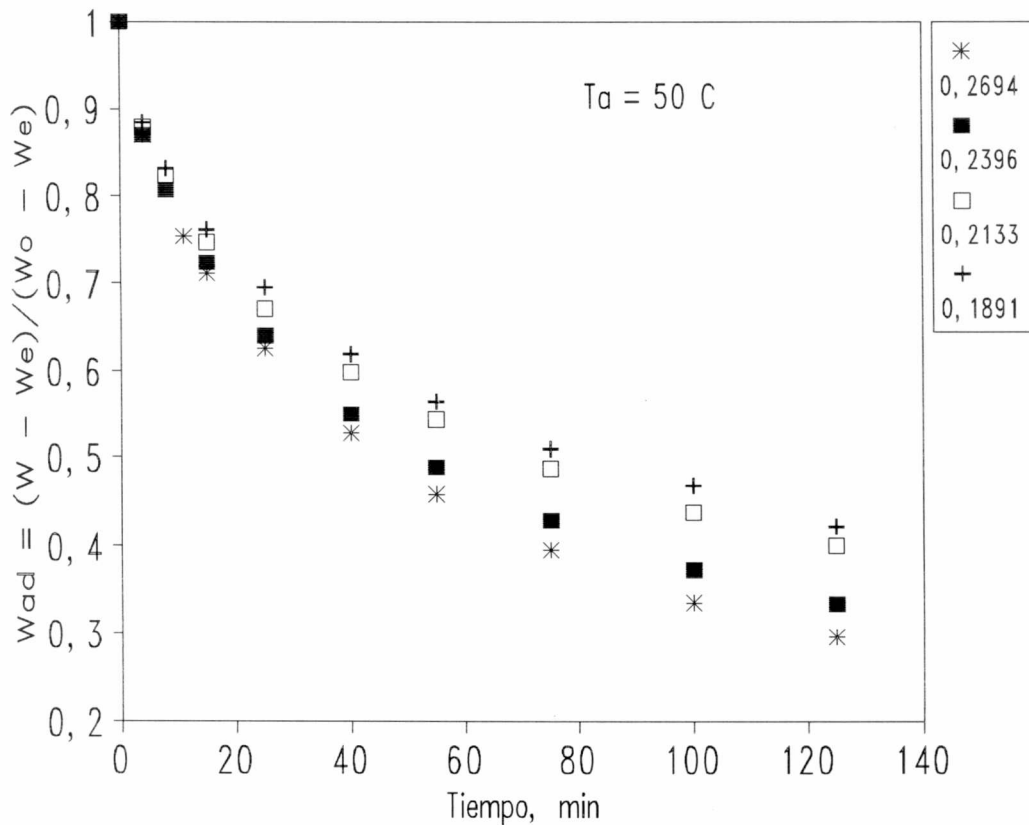


Figura 6.16. W_{ad} observado vs t a distintas W_0 para $T_a = 50^\circ\text{C}$

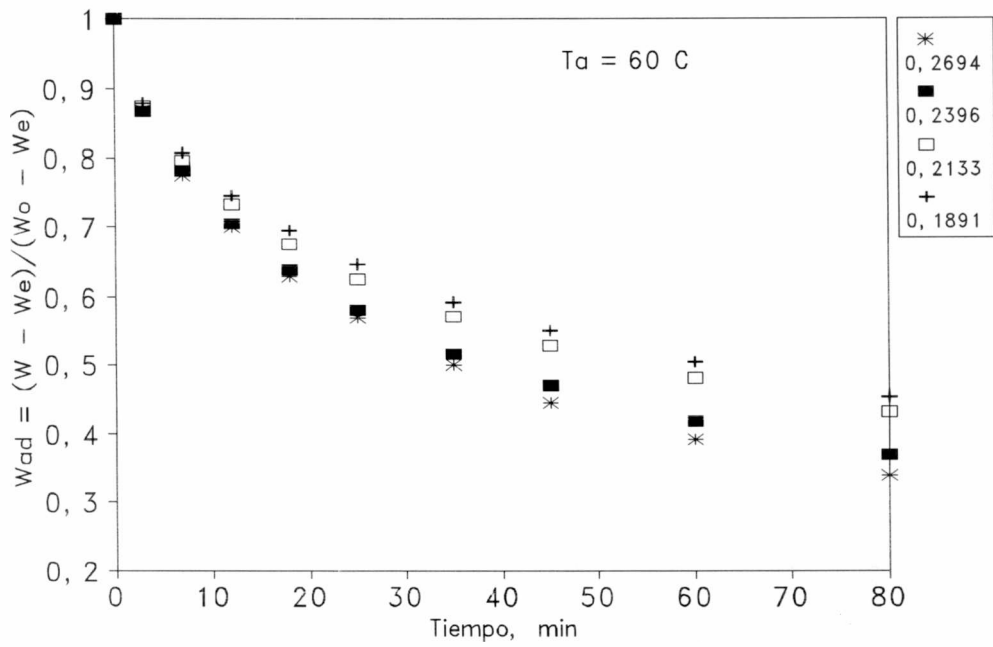


Figura 6.17. W_{ad} observado vs t a distintas W_0 para $T_a = 60^\circ\text{C}$

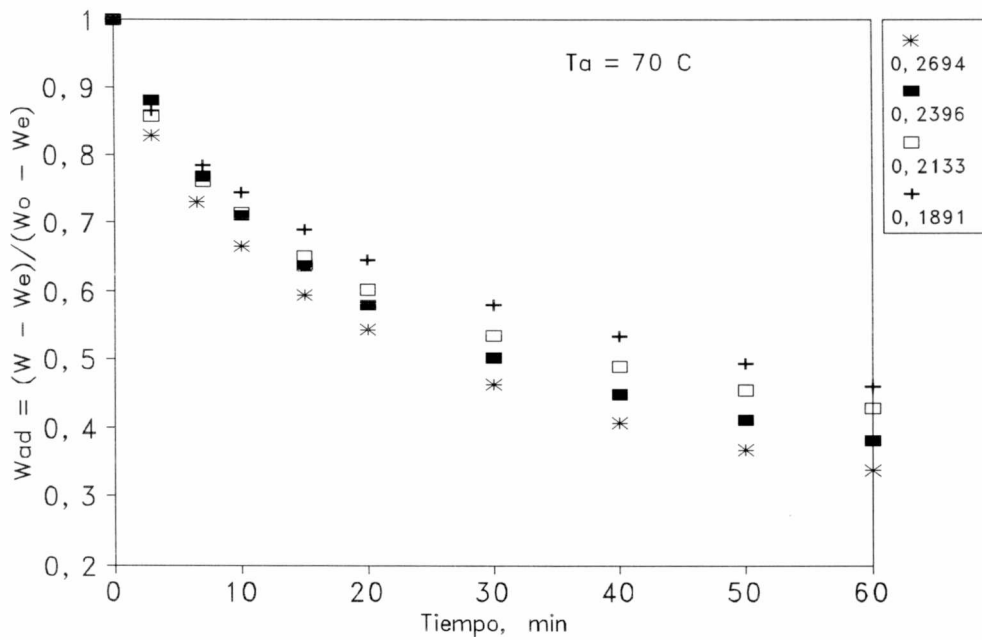


Figura 6.18. W_{ad} observado vs t a distintas W_0 para $T_a = 70^\circ\text{C}$

Secadoras continuas de trigo

De acuerdo a la solución analítica de la ecuación de difusión con D independiente de la humedad *durante el secado* en cualquiera de sus versiones, serie infinita (ec. (6.22), ecuación de Becker a tiempos cortos (ec.6.29), forma de un término en tiempos largos (ec. (6.23)), la función W_{ad} vs t , a temperatura constante, debería dar una única curva a distintas W_0 . Esto es debido a que, como se ha indicado, la mayor fuerza impulsora inicial $W_0 - W_e$ debería neutralizarse por la adimensionalización de la humedad.

Sin embargo, los gráficos a 35°C (Figura 6.15) y, especialmente, los correspondientes a 50, 60 y 70°C, muestran la existencia de un secado más rápido, en términos de humedad adimensional, cuando se parte de mayores humedades iniciales. Este efecto debe atribuirse a una dependencia del coeficiente de difusión con el contenido de agua.

6.5.4. Ajuste de la ecuación de Becker a los datos de secado de trigo en capa delgada

Validez de la ecuación difusiva de Becker para los datos medidos

A los fines de aplicar la ec. (6.29) a los datos W_{ad} vs t de las 16 experiencias de capa delgada realizadas, los datos obtenidos se agruparon por nivel de humedad inicial y se realizaron los ajustes correspondientes en cada temperatura. Obsérvese que ningún dato experimental de W_{ad} fué menor que 0,2, por lo cual todos puede ser interpretados con la ecuación (6.29).

Las áreas específicas a_v de la ecuación (6.29) se tomarán como las áreas equivalentes esféricas por tratarse de un caso con control interno estricto (Arroyo y Mascheroni, 1990). A este efecto, se realizó la correlación lineal de los datos de a_{ve} del capítulo 2 con la humedad:

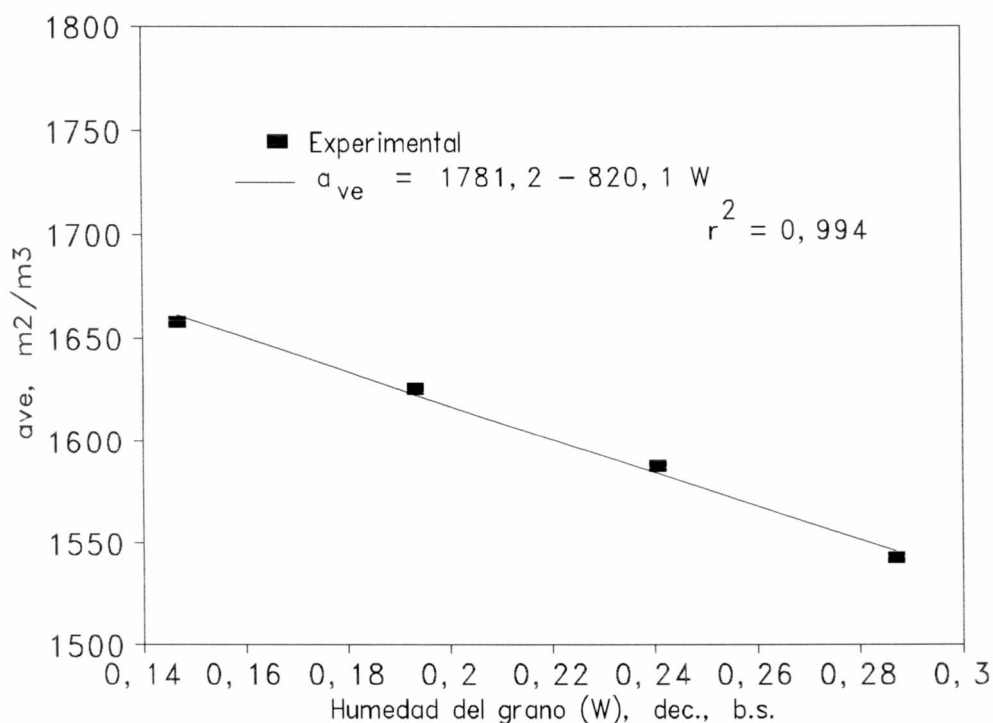


Figura 6.19. Valores medidos de Área específica equivalente del grano en función de la humedad y correlación lineal

La gráfica muestra una variación de a_{ve} de aproximadamente un 6% en el intervalo de humedades del secado de trigo cubierto en las experiencias de capa delgada. A efectos de considerar de alguna forma esta variación y de mantener la condición de volumen constante de la solución analítica (ec. (6.29)), los datos de a_{ve} se calcularon a las humedades iniciales (W_0) con la correlación de la Figura 6.19 y se las denominó a_{ve0} .

Ajuste indirecto preliminar de W_{ad} experimentales vs tiempo

Efecto de la Temperatura

En cada nivel de W_0 , el método indirecto de regresión involucra ajustar los D en cada temperatura con la ec. (6.29) (primer paso) para luego ajustar D en función de la temperatura. Los resultados del ajuste se muestran en la Tabla 6.2.

Secadoras continuas de trigo

Tabla 6.2. Coeficientes de difusión efectivos (D) de agua en granos de trigo, ajustados con la ecuación de Becker (ec. (6.29)), e indicadores estadísticos de bondad de ajuste

W_0 dec., b.s.	a_{ve0} m^2/m^3	T_a $^{\circ}C$	W_f dec., b.s.	$D \times 10^{11}$ m^2/s	$s(D) \times 10^{11}$ m^2/s	r^2	s_y (unidades de W_{ad})
0,2694	1560	35	0,1450	2,278	0,083	0,996	0,017
		50	0,1261	3,861	0,111	0,996	0,015
		60	0,1246	5,083	0,139	0,996	0,014
		70	0,1170	7,111	0,139	0,997	0,012
0,2396	1585	35	0,1436	1,986	0,096	0,990	0,023
		50	0,1238	3,250	0,083	0,997	0,013
		60	0,1202	4,444	0,111	0,997	0,013
		70	0,1155	5,458	0,212	0,990	0,048
0,2133	1606	35	0,1360	1,472	0,028	0,997	0,011
		50	0,1222	2,417	0,055	0,997	0,011
		60	0,1193	3,333	0,083	0,997	0,011
		70	0,1114	4,611	0,014	0,994	0,014
0,1891	1626	35	0,1334	1,389	0,028	0,998	0,010
		50	0,1189	2,111	0,055	0,997	0,010
		60	0,1152	2,889	0,055	0,998	0,008
		70	0,1080	3,667	0,055	0,999	0,006

Para cada nivel de W_0 , puede observarse que la ecuación de capa delgada seleccionada para este trabajo ajusta muy bien los datos experimentales, en virtud de los altos r^2 y bajos errores típicos de la estima (s_y). A su vez, los valores de D presentan bajos errores estándar ($s(D)$). El ajuste muestra, asimismo, que la suposición de un mecanismo de transporte interno por difusión líquida interpreta muy bien los resultados de secado de granos de trigo.

Correlación preliminar de los coeficientes de difusión obtenidos en función de la temperatura

Para realizar el segundo paso del ajuste indirecto, se correlacionaron, en cada W_0 , los valores de D con la temperatura, con una ecuación tipo Arrhenius

$$D = D_{\infty} \text{EXP} \left(- \frac{E_a}{R T_{a \text{ abs}}} \right) \tag{6.35}$$

$$\text{Ln } D = \text{Ln } D_{\infty} - \frac{E_a}{R T_{a \text{ abs}}}$$

donde $T_{a \text{ abs}}$ es la temperatura del aire en K.

Los ajustes se hicieron usando tanto la forma exponencial como la logarítmica de la ec. (6.35). Se encontró, en todos los casos que el error fué algo menor con la versión exponencial, aunque los parámetros E_a y D_{∞} fueron muy similares. De esta forma se pudo verificar que, en primera instancia, los parámetros ajustados son confiables como para poder correlacionarse posteriormente con la humedad inicial. La Figura 6.20 incluye los valores de D de la Tabla 6.2 junto a los ajustes preliminares de la ec. (6.35), expresados como $\text{Ln } D$ vs $1/T_a$, para los cuatro niveles de W_0 . Se observa que la funcionalidad tipo Arrhenius ajusta muy bien los valores de D de la Tabla 6.2.

Secadoras continuas de trigo

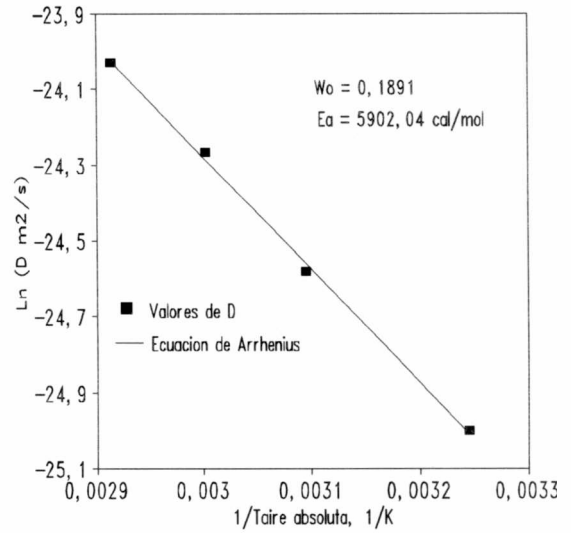
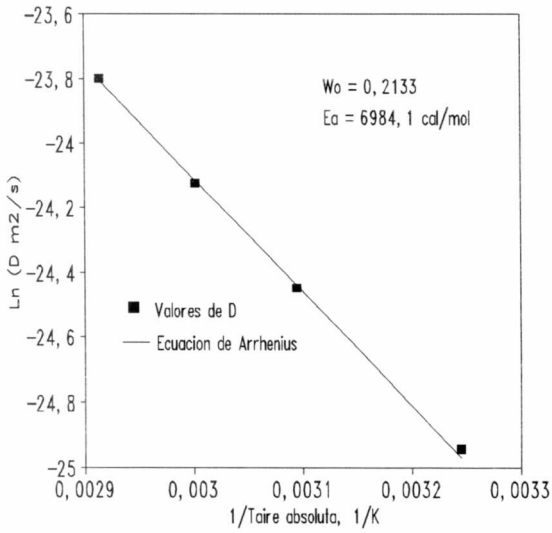
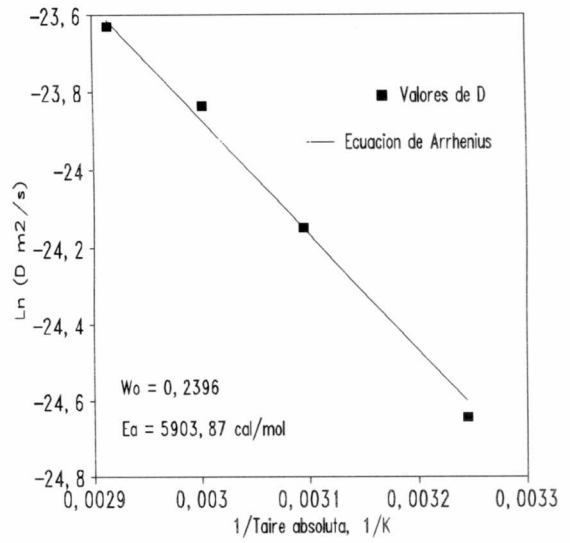
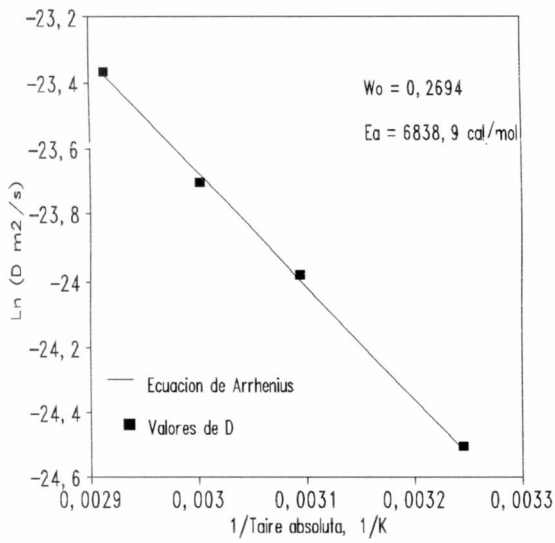


Figura 6.20. Gráficos a W_0 constante de valores ajustados (símbolos) y correlaciones tipo Arrhenius (líneas) para la funcionalidad del coeficiente de difusión efectivo del agua en granos de trigo con la temperatura.

Efecto de la humedad inicial en el coeficiente de difusión

Habiendo visto el buen ajuste tipo Arrhenius de D con T_a , se debe buscar ahora una forma de correlacionar D con el contenido de agua. En virtud de que la ec. (6.29) de difusión no permite utilizar una difusividad variable *durante el secado*, la única forma de considerar el contenido de agua en la correlación del D es a través de la humedad inicial (W_0).

Para observar los parámetros correlacionables con W_0 , en la Tabla 6.3. se listan los valores preliminares del factor preexponencial (D_∞) y de la energía de activación (E_a) empleados en los gráficos de la Figura 6.20

Tabla 6.3. Valores preliminares del factor preexponencial y de la energía de activación para el secado de trigo con aire caliente.

W_0 dec., b.s.	$D_\infty \times 10^7$ m ² /s	$s(D_\infty) \times 10^7$ m ² /s	E_a cal/mol	$s(E_a)$ cal/mol	r^2
0,2694	16,01	6,362	6838,9	264,6	0,998
0,2396	3,197	1,837	5903,87	381,43	0,993
0,2133	12,88	3,047	6984,06	157,57	0,999
0,1891	2,115	0,610	5902,04	191,5	0,998

Si bien la ecuación tipo Arrhenius presenta un muy buen ajuste en cada W_0 , los valores de D_∞ , y en menor medida los de E_a varían irregularmente con W_0 , lo que dificulta la posterior correlación de los mismos con la humedad. En este sentido, Nellist (1995) indicó que pequeñas modificaciones en la energía de activación de Arrhenius provocan grandes cambios en el factor preexponencial. Sin embargo, si estas cuatro ecuaciones de Arrhenius se grafican en la misma Figura, se obtiene lo siguiente:

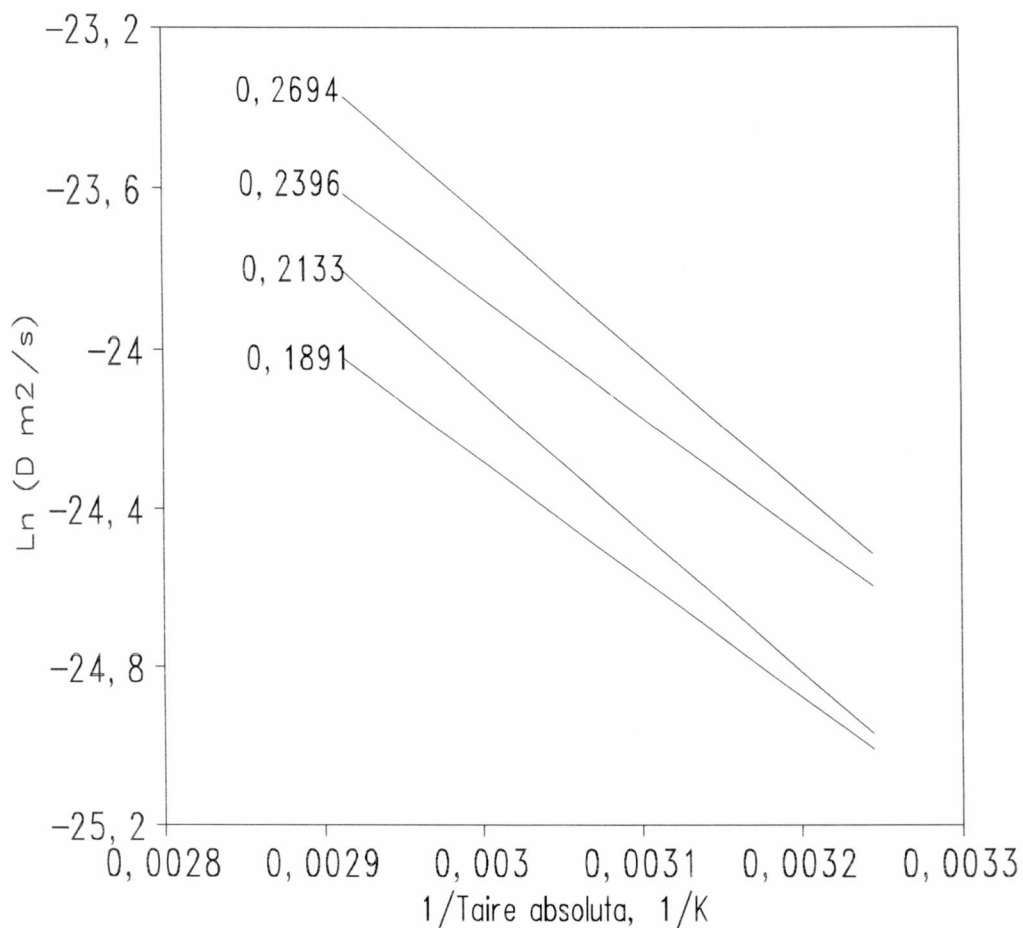


Figura 6.21. Ecuaciones tipo Arrhenius del coeficiente de Difusión con parámetros preliminares para las distintas W_0 indicadas en el gráfico.

La Figura 6.21 recopila las líneas representadas en los cuatro gráficos de la Figura 6.21. Las líneas se desplazan verticalmente hacia arriba a mayores W_0 , lo cual demuestra que D depende de W_0 . Sin embargo, los parámetros preliminares de la Tabla 6.3 no permiten observar una correlación sencilla con esta variable. No obstante, si se observa la Figura 6.21, se podrá encontrar que las pendientes de las líneas, representativas de E_a , no presentan una tendencia definida con W_0 , lo cual permitiría regresionar los datos con E_a independiente de la humedad inicial.

A efectos de explorar la tendencia de D_{∞} con W_0 se tomó un promedio de las E_a listadas en la Tabla 6.3 (6407 cal/mol) y se lo utilizó como valor fijo para aplicar nuevamente la ec. (6.35) a D vs $T_{a, abs}$, pero ajustando solamente el D_{∞} . La tendencia preliminar de estos nuevos valores de D_{∞} se muestra en la Figura 6.22:

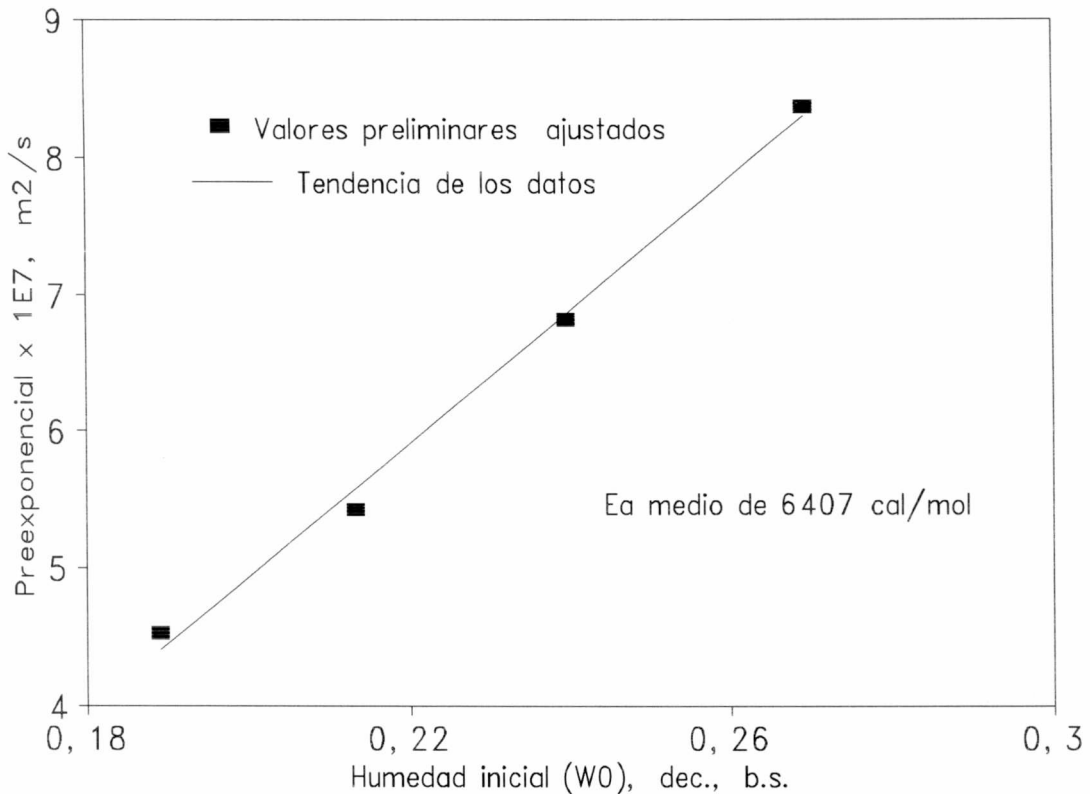


Figura 6.22. Tendencia del Factor preexponencial con la Humedad inicial del trigo, para un valor promedio de E_a . Nota: $1E7 \equiv 1 \times 10^7$.

Se observa un incremento lineal de D_{∞} con W_0 . Por consiguiente, el ajuste preliminar indirecto ha permitido encontrar las funcionalidades necesarias para realizar a continuación el ajuste directo a los resultados de capa delgada, a fines de hallar los valores finales de los parámetros.

Secadoras continuas de trigo

Ajuste directo del modelo difusivo de Becker a todas las curvas de secado en capa delgada

Con este fin se aplicó una única expresión matemática que incluye: la ecuación difusiva de capa delgada (ec. (6.29)), la ecuación tipo Arrhenius (ec. (6.35)) donde su preexponencial es función lineal de W_0 , y la correlación de área superficial equivalente de grano con W_0 . Los componentes de la expresión combinada son:

$$W = W_e + (W_0 - W_e) \left[1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} a_{ve0} \sqrt{D t} + 0.331 a_{ve0}^2 D t \right]$$

$$D = (D_a + D_b W_0) \text{EXP} \left(-\frac{E_a}{R (T_a + 273.16)} \right) \quad (6.36)$$

$$a_{ve0} = 1781.2 - 820.1 W_0$$

que permiten ajustar los datos completos de t , W_{ad} , W_0 y T_a en un sólo paso. Se tienen 159 pares de valores t , W_{ad} y 3 parámetros de ajuste: D_a , D_b y E_a , dando lugar a 156 grados de libertad. Los resultados del ajuste se listan en la Tabla 6.4.

Tabla 6.4. Ajuste directo de la ecuación difusiva de capa delgada combinada a la ecuación de Arrhenius incluyendo una funcionalidad lineal del factor preexponencial con W_0 .

Resultados del ajuste de datos de secado de trigo en capa delgada a los datos experimentales completos

$$D_a = -5,249 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}, s(D_a) = 1,088 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$D_b = 54,44 \times 10^{-7} \text{ m}^2/(\text{s kg/kg}), s(D_b) = 10,58 \times 10^{-7} \text{ m}^2/(\text{s kg/kg})$$

$$E_a = 6492,5 \text{ cal/mol}, s(E_a) = 125,1 \text{ cal/mol}$$

$$r^2 = 0,996$$

$$s_y = 0,0025 \text{ dec.}, \text{ b.s.}$$

Puede verse que el ajuste logrado es muy bueno, y que el error de la estima es del orden del error de determinación de humedad por el método de estufa.

Obsérvese que el valor límite de D_{∞} a $W = 0$ es negativo, lo cual no tiene sentido físico pues no pueden existir valores de coeficiente de difusión D menores que 0; esto resulta de vincular al preexponencial con la humedad inicial, la que, para esta correlación, no puede ser menor que 0,1891. Sin embargo, a efectos de evitar expresar la ecuación de ese modo, la recta del factor preexponencial puede reescribirse en una forma equivalente:

$$D_{\infty} = D_{\infty 1} + D_{\infty 2} (W_0 - 0.1891) \quad (6.37)$$

que por igualación con $D_{\infty} = D_a + D_b W_0$ (ec. (6.36)) permite obtener:

$$D_{\infty 1} = 5,046 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$$

$$D_{\infty 2} = b = 54,44 \times 10^{-7} \text{ m}^2/(\text{s kg agua/kg grano seco}).$$

Esta forma permite ver más claramente que la ecuación no debe usarse para W_0 menores de 0,1891, la menor humedad inicial cubierta en las experiencias, pero tampoco por encima de $W_0 = 0,2694$.

6.5.5. Comparación de valores observados y predichos de las curvas de secado en capa delgada

No obstante los valores muy buenos de r^2 y s_y obtenidos en la Tabla 6.4, se realizó una comparación de tres curvas de secado dimensionales, variando simultáneamente humedad inicial y temperatura.

Secadoras continuas de trigo

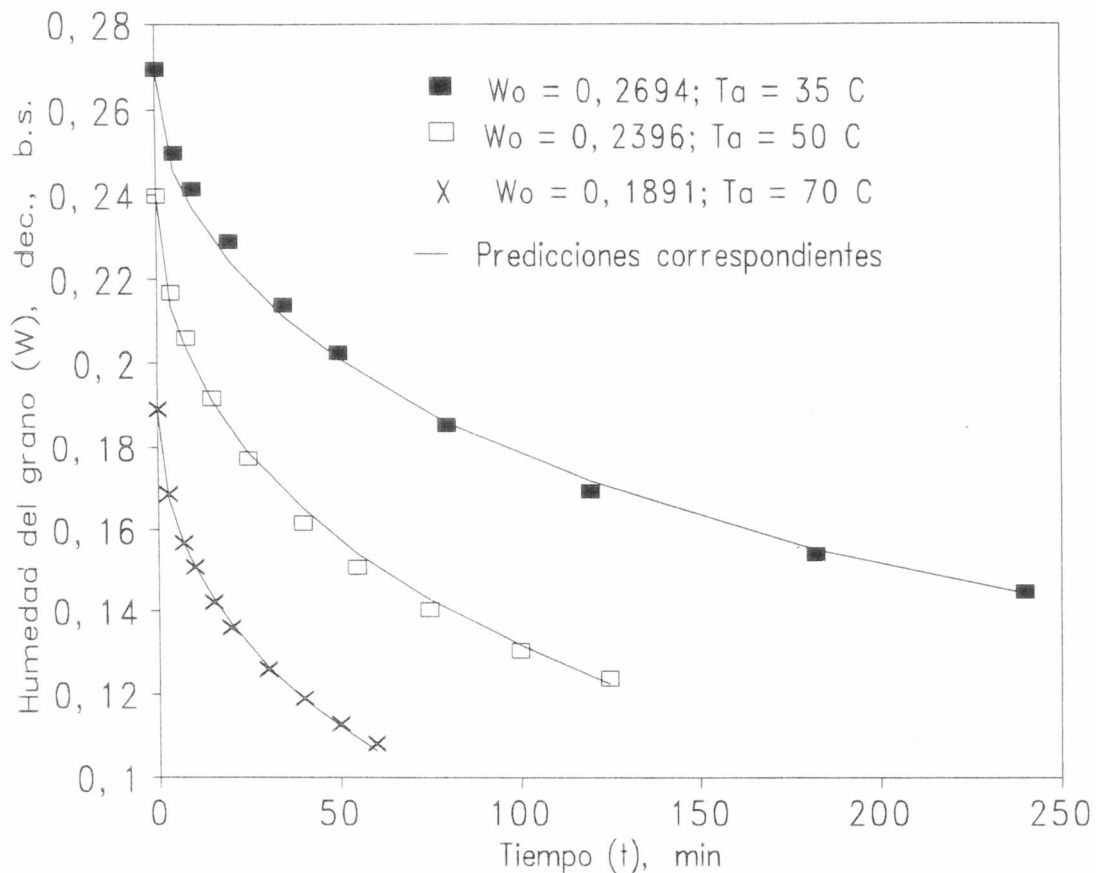


Figura 6.23. Humedad (dec., b.s.) de grano en función del tiempo para tres condiciones de secado diferentes tanto en humedad inicial como en temperatura de aire. Símbolos: datos experimentales; líneas: predicciones del modelo combinado ec. (6.36).

La predicción reproduce muy bien la información experimental para estas condiciones de secado, interpretando correctamente el efecto del tiempo, la temperatura y humedad del aire, y el efecto de la humedad inicial del grano.

Puede observarse que las curvas de secado de trigo indican una muy rápida reducción de la humedad al comienzo del secado, la cual se vuelve más gradual a tiempos mayores.

6.5.6. Comparación del Coeficiente de Difusión obtenido en este trabajo con los presentados por otros autores

Sun y Woods (1994) indican que los coeficientes de difusión efectivos pueden diferir apreciablemente de un autor a otro, aún para un mismo grano. Por tal motivo, se compararon los valores de D obtenidos aquí, calculados en función de la temperatura para $W_0 = 0,19$ y $0,25$, con los de Sun y Woods (1994) y Becker (1959) para trigo, que no incluyen una funcionalidad con la humedad del grano.

Las correlaciones de literatura son las siguientes:

Becker (1959) Trigo

$$D = 76.8 \times 10^{-4} \text{ Exp} (-6140 / T_{a \text{ abs}})$$

Sun y Woods (1994) Trigo

$$D = 7.507 \times 10^{-8} \text{ Exp} (-2806.5 / T_{a \text{ abs}})$$

Representadas junto a la ec. (6.36) en la Figura 6.24.

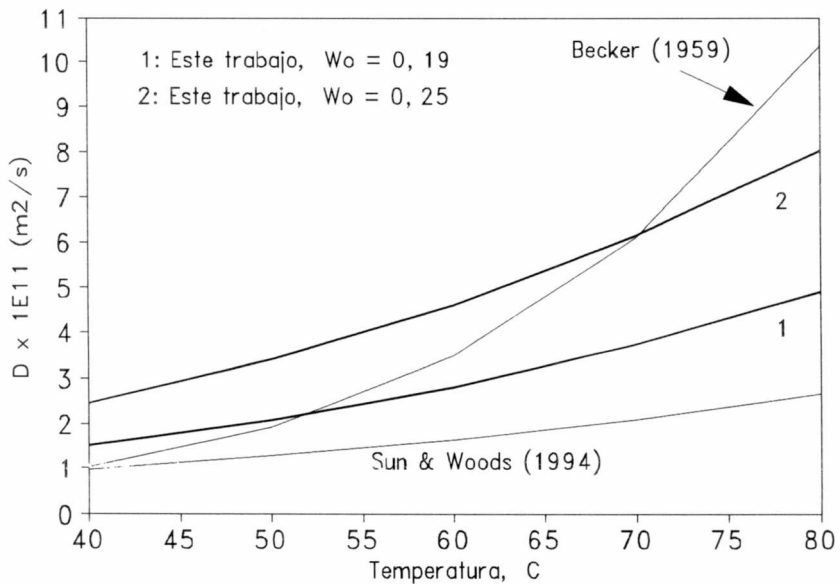


Figura 6.24. Coeficientes de Difusión de agua en trigo en función de la temperatura, incluyendo el de este trabajo, calculado para dos contenidos iniciales de humedad.

Nota: $1E11 \equiv 1 \times 10^{11}$

Secadoras continuas de trigo

La Figura 6.24 muestra que los coeficientes de difusión obtenidos en este trabajo prácticamente duplican su valor al pasar de una $W_0 = 0,19$ a $0,25$. A su vez, resultan entre 2 y 3 veces mayores a los de Sun y Woods (1994), con una pendiente comparable, un poco mayor, respecto de la temperatura. La comparación con los valores de D de Becker (1959) muestra el efecto de la elevada energía de activación obtenida por este autor ($E_a = 12200$ cal/mol): a bajas temperaturas, los valores obtenidos aquí son mayores a los de Becker, pero ésto se revierte para temperaturas más altas. A medida que el D obtenido en este trabajo se evalúa a mayores W_0 , el cruce de curvas con el D de Becker se produce a temperaturas mayores. Aparte de la influencia de la humedad inicial, se considera que las variaciones observadas entre coeficientes de difusión provienen de diferencias varietales de los trigos, la técnicas usadas para recolectar datos de secado en capa delgada, las humedades de equilibrio utilizadas -de las que dependerán necesariamente los valores de D y del tamaño de partícula o área específica asignada al grano.

Debe consignarse que la E_a obtenidas en este trabajo (≈ 6500 cal/mol) presenta una razonable coincidencia con la de Sun y Woods (1994) (≈ 5600 cal/mol) y es muy similar a la obtenida por Bruce (1985) para cebada (≈ 6200 cal/mol). En el caso de Becker (1959), como se mencionó previamente, su alta energía de activación, de 12200 cal/mol, debe haber resultado de la utilización de un valor prescrito de humedad superficial muy elevado : $0,103$ dec., b.s., independiente de la temperatura.

Se considera que los resultados obtenidos aquí contribuyen en el área de determinación de coeficientes de difusión puesto que las revisiones de parámetros cinéticos difusivos en granos y otros alimentos (Sokhansanj y Cenkowski, 1988; Jayas y colab., 1991; Zogzas y colab., 1994 y 1996; Zogzas y Maroulis, 1996) no han presentado correlaciones confiables del coeficiente de difusión de trigo con el contenido de agua. Por otra parte, la ecuación de capa delgada desarrollada aquí puede utilizarse para predecir tiempos de secado en capas delgadas de trigo destinado a semilla o, como en esta tesis, como parte integrante - la ecuación más importante- del modelo de lecho fijo, tema que se tratará en el capítulo 7.

APENDICE: Deducción de la ecuación difusiva a tiempos cortos

(Becker, 1959)

Partiendo de la ecuación diferencial de difusión no estacionaria:

$$\frac{\partial W_l}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 W_l}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial W_l}{\partial r} \right) \quad (\text{A1})$$

y definiendo una coordenada $s = R - r$, las condiciones iniciales y de contorno de interés resultan:

$$\begin{aligned} W_l &= W_0 & \text{en } t &= 0 \\ W_l &= W_s & \text{en } s &= 0 \text{ y } t > 0 \end{aligned} \quad (\text{A2})$$

(véase que $s = 0$ implica $r = R$).

Siendo que en los primeros instantes ($t \approx 0$) los cambios se reducen a la vecindad de la superficie, el problema se puede aproximar como el de un sólido plano semiinfinito. La solución de la ecuación diferencial para este caso, con las condiciones iniciales y de contorno planteadas toma la forma de la integral de error de Gauss:

$$1 - W_{lad} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^Z \text{Exp}(-Z^2) dZ \quad (\text{A3})$$

que da la humedad en función de la distancia contada desde la superficie. Los símbolos W_{lad} y Z se definen como sigue:

$$W_{lad} = \frac{W_l - W_s}{W_0 - W_s} \text{ y } Z = \frac{s}{2\sqrt{Dt}} \quad (\text{A4})$$

Para obtener la concentración promedio en un sólido finito en función del tiempo cerca de $t = 0$, se realiza un balance de materia alrededor de la superficie:

$$(W_0 - W) V = \int_0^t JS dt \quad (\text{A5})$$

donde, por la primera ley de Fick,

Secadoras continuas de trigo

$$J = -D \left(\frac{\partial W_1}{\partial S} \right)_{s=0} \quad (\text{A6})$$

así, la ecuación básica a resolver es:

$$(W_0 - W) = \frac{S}{V} \int_0^t -D \left(\frac{\partial W_1}{\partial S} \right)_{s=0} dt \quad (\text{A7})$$

Se busca ahora obtener la derivada parcial $(dW_1/ds)_{s=0}$ a partir de la solución de Gauss (ec. (A3))

Para esto, se debe despejar W_1 en A3 a partir de su definición (ec. A4) y reemplazar dZ por $ds/2\sqrt{Dt}$. En A3, debe considerarse, asimismo, que $\text{Exp}(-Z^2)$ tiende a 1 cuando $s \rightarrow 0$.

Con estos pasos se obtiene:

$$- \left(\frac{\partial W_1}{\partial S} \right)_{s=0} = \frac{W_0 - W_s}{\sqrt{\pi D t}} \quad (\text{A8})$$

reemplazando la ec. (A8) en la (A7), se obtiene una expresión intermedia de la humedad media (W):

$$\frac{W_0 - W}{W_0 - W_s} = \frac{S}{V} \frac{\sqrt{D}}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{1}{\sqrt{t}} dt \quad (\text{A9})$$

que, al integrarse da lugar a la expresión de la humedad media en función del tiempo buscada a tiempos cortos:

$$W_{ad} = \frac{W - W_s}{W_0 - W_s} = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} X$$

donde, siendo $a_v = \frac{S}{V}$ resulta

$$X = a_v \sqrt{Dt} \quad (\text{A10})$$

CAPITULO 7. MODELADO DEL SECADO DE TRIGO EN LECHO FIJO

CAPITULO 7. MODELADO DEL SECADO DE TRIGO EN LECHO FIJO

7.1 INTRODUCCION

7.1.1. Parte general

Como se había mencionado en la introducción del capítulo 6, los métodos ortodoxos de diseño de secadoras deben basarse en el estudio del secado de granos en lecho fijo (Brooker y colab., 1992). Un lecho fijo puede interpretarse y modelarse como una sucesión de capas delgadas de granos (Nellist y Bruce, 1995).

Al estudiar el secado en capa delgada (capítulo 6), las condiciones de temperatura y humedad del aire se consideraron constantes, y se había visto que tal suposición era muy próxima la realidad, dado que el aire atravesaba una sola capa.

Sin embargo, un lecho fijo, normalmente de 0,1 a 0,7 m de espesor, incluye entre 30 y 200 *capas delgadas físicas*, lo que provocará variaciones considerables entre la condición de entrada del aire al lecho y la de salida. Excepto a la entrada de la primera capa, la humedad y la temperatura del aire serán función del tiempo y de la coordenada de espesor del lecho, determinando que el tiempo de secado de un lecho fijo de granos se vea influenciado por los cambios en las fases aire húmedo y grano húmedo.

Por consiguiente, el secado de granos en lecho fijo es una operación compleja que depende de numerosas variables del aire, granos y lecho, cuyo efecto individual debe conocerse para estimar el tiempo de secado y el eventual daño a la calidad (Nellist, 1978; Lupano y Añón, 1986). Dado que el número de variables y sus combinaciones posibles es muy grande, la investigación basada solamente en experimentación física de escala completa, o aún de laboratorio, sólo conduce a un entendimiento limitado del comportamiento del lecho fijo (Giner y colab., 1998). Por otra parte, la experimentación física es costosa, dificultosa y demanda un tiempo considerable. Debe aclararse que lo cuestionable no es en modo alguno la experimentación en sí, sino el aprendizaje del secado en lecho fijo basado sólo en la experimentación (Nellist y Bruce, 1992).

Secadoras continuas de trigo

En Argentina, se han fabricado, utilizado y descripto secadoras de granos (De Dios, 1996) y se han realizado trabajos experimentales sobre el funcionamiento de secadoras comerciales (Gherbezza, 1990) que requieren ser complementados con estudios que relacionen condiciones de operación del aire y granos y dimensiones del equipo con parámetros del comportamiento de las máquinas. Los cálculos en secadoras se han basado en balances totales considerando evoluciones psicrométricas del aire. Este método asume implícitamente evaporación de agua pura y ausencia de calentamiento por encima de la temperatura de saturación adiabática, lo cual no se verifica en la práctica.

Por su parte, Rodríguez (1982) ha realizado estudios teórico-prácticos de secado de maíz en secadoras de flujo cruzado y co-corriente; se considera que los métodos que ha utilizado deben ampliarse, difundirse y demostrar su aptitud para ser considerados como un "método a seguir" en el diseño de secadoras de granos.

Como una contribución a estos fines, se estima necesario, en primer término, desarrollar y describir la deducción de modelos matemáticos basados en la transferencia de calor y materia aire-grano, a efectos de establecer la funcionalidad del tiempo de secado (t_s). A posteriori, se realizará una comparación de los t_s calculados con datos experimentales de secado de trigo a nivel de laboratorio, tomados de distintas fuentes de literatura, así como también una convalidación más general de las curvas de humedad y temperatura vs tiempo en distintas posiciones interiores de lecho. El desarrollo de ensayos normalizados de secadoras reales (IRAM, 1983) junto al empleo de modelos de simulación permitirá mejorar la confección de catálogos de comportamiento de modelos fabricados, beneficiando la comercialización interna y la exportación de secadoras de granos.

7.1.2. Modelo a desarrollarse para secado de trigo en lecho fijo en relación a contribuciones previas

El modelo básico que permite la predicción de la operación de secado de granos en lechos fijos está expresado por ecuaciones diferenciales (Brooker y colab., 1992), que surgen

al plantear balances de conservación de materia (agua) y energía en una capa delgada, adicionados con ecuaciones constitutivas de velocidad de transferencia de materia -la ecuación de capa delgada o ecuación de cinética de secado (capítulo 6)- y de calor. Asimismo, se requieren correlaciones o modelos de propiedades de equilibrio sorcional como isothermas y calor de sorción del agua en el grano (capítulo 4), además de propiedades geométricas, físicas y térmicas del grano y lecho (capítulos 2 y 6).

Las diferencias entre los modelos planteados pueden dividirse en categorías:

- (i) La ecuación de capa delgada utilizada o "modelo de secado del grano"
- (ii) El método de deducción seguido para desarrollar las ecuaciones de lecho fijo, incluyendo suposiciones realizadas para posibilitar el cálculo de las humedades y temperaturas de las fases aire y granos a distintas alturas de lecho (z) y distintos tiempos (t)
- (iii) Las propiedades físicas, fisicoquímicas y de transferencia empleadas para el sistema lecho relleno-aire intergranular
- (iv) El método utilizado para resolver las ecuaciones resultantes. Excepto el punto (i), que ha sido analizado en el capítulo 6, los puntos restantes serán considerados a continuación.

(ii) Métodos utilizados para deducir las ecuaciones de secado en lecho fijo

En secado de granos en lecho fijo, O'Callaghan y colab.(1971), Spencer (1969 y 1972), Bakker-Arkema y colab. (1974), Nellist (1974), Ingram (1976), Bruce (1984), Parry (1985), Nellist (1987) y Sun y Woods (1997 a y b) han deducido o empleado las *ecuaciones de secado*: cuatro ecuaciones diferenciales que calculan la temperatura y humedad del aire, y la temperatura y contenido de humedad del grano, variando con el tiempo y la posición en el lecho.

Sin embargo, es común que al presentar las ecuaciones de secado, no se incluyan las suposiciones del modelo ni se establezcan distinciones entre balances de conservación y ecuaciones de transferencia. Aunque el producto de las deducciones pudiera ser correcto, se

Secadoras continuas de trigo

considera conveniente emplear un método ortodoxo que permita ser seguido paso a paso, a partir de la identificación de los puntos de partida de la deducción. Las observaciones específicas respecto a la literatura previa en el tema serán mencionadas al deducirse las ecuaciones correspondientes. En este trabajo se seguirá un método general de simulación de procesos, aplicable a secado (Himmelblau y Bischoff, 1976; Cunningham y Lombardi, 1978; Farina y colab., 1986). La generalidad del procedimiento no es condición suficiente para desarrollar modelos de cada caso particular, pero es necesaria para clarificar el origen de las ecuaciones. Los pasos de deducción tratarán de observar la secuencia: planteo-suposiciones-información-resolución (Cunningham y Lombardi, 1978).

(iii) Propiedades utilizadas

Coefficientes de Transferencia de Calor

En la mayor parte de los trabajos de modelado del secado en lecho fijo se utilizan coeficientes de transferencia por unidad de volumen de lecho (coeficientes volumétricos de transferencia de calor) que son específicos para un sólo grano (Sun y Woods, 1997 a y b), y se expresan en la forma $h_{Tv} = C G_a^n$, siendo G_a el flujo de aire, C y n , constantes. De acuerdo a las ecuaciones del capítulo 6, h_{Tv} resulta igual a $h_T a$, donde " a " es el área superficial de partícula por unidad de volumen de lecho: $a = a_v (1 - \epsilon)$. En otros trabajos, se emplea h_T , pero expresado directamente en función de G_a^n .

En este trabajo, se utilizará h_T en base a propiedades variables con la condición del aire (capítulo 3), obtenido de la correlación Gamson modificada para J_H vs Re_p (Sokhansanj y Bruce, 1987) igualada a la definición general del J_H , como se ha mostrado en el capítulo 6.

Propiedades geométricas, porosidad y densidades de grano y lecho

Se utilizarán propiedades del grano evaluadas a la humedad inicial (W_0) como área superficial equivalente de grano (a_{ve0}) y área efectiva (a_{vp0}), densidad de grano y porosidad de lecho (ρ_{g0} y ϵ_0) y densidad de materia seca de grano referida al volumen inicial: $\rho_{s0} = \rho_{g0}/(1+W_0)$. Si bien el uso de estas propiedades implica que no se consideran las pequeñas variaciones de volumen de grano que pudieran ocurrir *durante* el secado, su correlación con W_0 permite "amortiguar" el efecto de esta suposición.

Dado que los valores de área específica de grano varían aproximadamente $\pm 20\%$ entre variedades de trigo, e influyen la predicción de la velocidad de secado (capítulo 6), los valores a emplearse deberían ser siempre aquellos de la variedad cuyo secado se esté simulando. Así, los valores medidos en el capítulo 2 pueden no ser apropiados para otras variedades. Observaciones similares valen para densidades de grano y porosidades de lecho.

Con respecto a ρ_{s0} (masa seca/volumen húmedo a W_0), debe consignarse que el mismo es en realidad un parámetro necesario para calcular la masa seca de una capa de volumen fijo, pero no representa en realidad la densidad de grano totalmente deshidratado (masa seca/volumen seco) a pesar de lo cual, en la literatura, se la nombra, por error, de tal manera. Si bien la masa seca de una capa de volumen fijo es constante en cada operación de secado, la misma varía cuando se parte de distintas humedades iniciales. Cuando esa capa está constituida por grano de baja humedad, su masa seca será mayor que la de granos de humedad más elevada. En consecuencia, resultará siempre conveniente aplicar la fórmula indicada para ρ_{s0} , en lugar de tomarla como una propiedad fija del material (Parry, 1985).

Calores latentes

Para el cálculo del calor de desorción del agua adsorbida al grano (L_g), se utilizará la expresión ya deducida en el capítulo 4 en base a la ecuación de Clapeyron y la isoterma de sorción de Henderson-Thompson.

Algunos de los trabajos presentados en lecho fijo utilizan calores de vaporización no

Secadoras continuas de trigo

dependientes de la temperatura ni la humedad (Spencer, 1969), algunos sólo de la humedad (Bruce y Giner, 1993), mientras que otros contemplan ambas variables (Spencer, 1972; Maier y Bakker-Arkema, 1992), pero en general por medio de la ecuación de Gallaher (1951) (ver capítulo 4).

(iv) Método numérico empleado

Los métodos de resolución numérica de las ecuaciones de secado de lechos fijos, que permiten obtener humedades y temperaturas de grano y aire en función del tiempo (t) y de la coordenada de espesor del lecho (z), han estado siempre influenciados por la necesidad de limitar el tiempo de cálculo. Con algunas excepciones que emplearon esquemas de diferencias finitas (Bakker-Arkema y colab., 1974), muchos trabajos previos usaron un método de Euler de 1° orden tanto en t como en z (Parry, 1985), que presenta un error de truncación considerable para curvas altamente no lineales. Las curvas de secado, sobre todo las de W vs t y T vs t en zonas cercanas a la entrada del aire ($z \approx 0$), presentan pendientes iniciales elevadas. A mayores z , estas pendientes son más suaves, como lo son, asimismo, las curvas de T_a y h_a en función de z .

Bruce y Giner (1993), en un trabajo sobre secado de trigo en lechos continuos en contracorriente, compararon (a) la resolución clásica de Euler de 1° orden con (b) otro esquema numérico que utilizó Euler de 2° orden en la variación con z y Runge-Kutta de 4° orden en la variación con t y con (c) un método de diferencias finitas incluido en un software comercial (NAG: Numerical Algorithms Group, 1989). Las predicciones de los métodos (b) y (c) fueron prácticamente iguales, y presentaron ciertas diferencias con el método (a). Por lo expuesto, se utilizará el método (b) para resolver las ecuaciones de secado a deducir. Dicho método es preciso y suficientemente económico en tiempo de cálculo.

7.1.3. Objetivos del capítulo

El objetivo general del capítulo es desarrollar un modelo matemático que permita calcular el tiempo de secado en lecho fijo.

Los objetivos específicos se indican a continuación:

(1) Desarrollar el modelo de secado de trigo en lecho fijo siguiendo un método generalizado proveniente de la teoría de Simulación de Procesos, por medio del cual se pueda discriminar explícitamente los balances de conservación de las ecuaciones constitutivas, y que incluya propiedades variables con significado físico.

(2) Resolver el sistema de ecuaciones a deducir con un algoritmo numérico que combine bajo error de truncación y buena velocidad de cálculo e implementarlo en un programa de computadora escrito en forma modularizada y estructurada en un lenguaje de alto nivel.

(3) Realizar una comparación general entre los tiempos de secado predichos por el modelo y valores experimentales de distintas fuentes de la literatura, y una comparación más detallada del comportamiento del modelo para distintas variables como humedad y temperatura del grano y del aire.

7.2. DESARROLLO DEL MODELO DE SECADO DE TRIGO EN LECHO FIJO

7.2.1. Consideraciones Generales

Un modelo matemático de lecho fijo debe ser capaz de predecir la evolución de las cuatro variables "de estado" del secado, a saber: humedad media del grano (W) (de aquí en más humedad del grano), temperatura media del grano (T) (de aquí en más temperatura del grano), temperatura del aire (T_a) y humedad absoluta del aire (h_a) (de aquí en más humedad

Secadoras continuas de trigo

del aire), en función del tiempo y posición en el espesor del lecho. Así, deben deducirse cuatro ecuaciones independientes. La base para estas expresiones serán los balances macroscópico-diferenciales de materia (agua) y energía en una capa de grano.

Cada capa será lo suficientemente delgada en la dirección del espesor del lecho como para poder despreciar gradientes de humedad y temperatura intergranulares. La Figura 7.1 muestra un esquema de la capa.

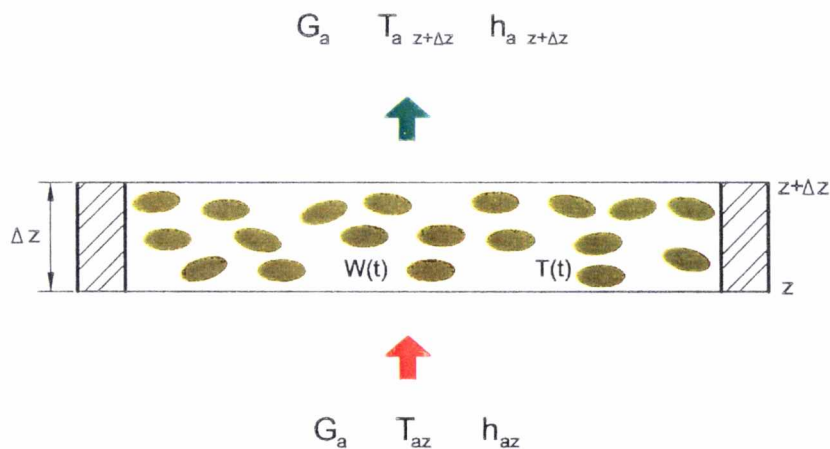


Figura 7.1. Esquema de una capa de granos y flujo de aire.

7.2.2. Suposiciones

Se consideran dos fases en la capa: aire húmedo intergranular y granos húmedos. Se plantearán balances de masa y energía en ambas fases teniendo en cuenta, para el desarrollo del modelo, las suposiciones siguientes:

- (I) La velocidad de transferencia de materia grano-aire presenta control interno estricto ($Bi_m > 100$), y el movimiento de humedad dentro de los granos está gobernado por la segunda ley de Fick para la difusión líquida en geometría esférica, considerando un material homogéneo e isotrópico (capítulo 6).
- (II) Como consecuencia del punto (I), la superficie del grano alcanza muy rápidamente la humedad de equilibrio con su entorno instantáneo (condición de contorno prescrita). Ese valor se podrá estimar, para las condiciones promedio de la capa, con un modelo para el equilibrio sorcional (capítulo 4).
- (III) Se asume que la velocidad de transferencia de calor está controlada externamente al grano (bajos Bi_c) (capítulo 6), por lo cual los perfiles internos de temperatura se consideran planos, aunque no constantes en el tiempo.
- (IV) El flujo de aire es unidimensional y uniformemente repartido en la sección transversal del lecho (Bakker-Arkema y colab., 1974; Nellist y Bruce, 1995).
- (V) Los granos se asumen como esferas de igual volumen que el grano para transferencia de materia (control interno) y de igual área/volumen para transferencia de calor (control externo) (Arroyo y Mascheroni, 1990).
- (VI) La conducción de calor entre granos del lecho se considera despreciable, fundamentalmente por la reducida área de contacto, comparada con la transferencia de calor convectiva aire-granos (Brooker y colab., 1992).

Secadoras continuas de trigo

(VII) Las pérdidas de calor por las paredes del lecho se consideran despreciables comparadas con la magnitud de la transferencia aire-grano (Bruce, 1984; Brooker y colab., 1992).

(VIII) La velocidad de acumulación de energía y vapor de agua en el aire húmedo intergranular de la capa se considera despreciable frente a los aportes convectivos (Brooker y colab., 1992).

7.2.3. Balances de conservación

El desarrollo de las ecuaciones de secado se basa en la capa elemental de la Figura 7.1. La capa actúa como un volumen de control compuesto por dos sistemas termodinámicos: aire intergranular y granos. En cada sistema, se plantean balances de materia y energía, y el otro sistema actúa como medio del primero y viceversa. Los balances de conservación siguen la forma general propuesta por Himmelblau y Bischoff (1976):

Velocidad de acumulación	=	Velocidad neta de entrada a través de las áreas de entrada y salida del sistema	+	Velocidad neta de entrada a través de las paredes laterales del sistema	+	Velocidad de producción	-	Velocidad de consumo
-----------------------------	---	--	---	---	---	----------------------------	---	-------------------------

Esta forma vale tanto para conservación de materia como de energía. Para el aire, el primer término del miembro derecho da cuenta de las diferencias de humedad o entalpía del aire entre las caras de entrada y salida de cada capa del lecho (Figura 7.1). El segundo término representa la velocidad de transferencia de calor o materia entre el grano y el aire, dada por ecuaciones constitutivas.

El primer sumando del miembro derecho (aportes convectivos) no se utiliza cuando el sistema son los granos de la capa, mientras que el segundo sumando, tanto en el sistema grano como aire intergranular, puede estar compuesto por más de una contribución. Con respecto al tercer y cuarto sumandos del miembro derecho, las posibles reacciones químicas que pudieran ocurrir, como el proceso respiratorio, no se consideran relevantes ni para la generación de calor ni para el consumo de materia dentro de los cortos tiempos involucrados en el secado con aire caliente. Los balances particulares que conducen a las ecuaciones de secado se escriben a continuación:

7.2.4. Forma inicial de las ecuaciones de secado. Balances de materia y energía

7.2.4.1. Balances de materia: agua

Sistema: El aire intergranular

$$\left| \begin{array}{l} \text{Velocidad de} \\ \text{acumulación de vapor} \\ \text{de agua} \end{array} \right| = \left| \begin{array}{l} \text{Velocidad neta de entrada} \\ \text{de vapor de agua asociada} \\ \text{al flujo de aire} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{l} \text{Velocidad de transferencia} \\ \text{de vapor desde los} \\ \text{alrededores (granos)} \end{array} \right|$$

Si este balance se expresa en forma matemática para una capa de espesor Δz se obtiene:

$$\rho_a c_0 S \Delta z \frac{\partial h_a}{\partial t} = G_a S h_{az} - G_a S h_{az+\Delta z} + \delta \dot{m}_v \quad (7.1)$$

Secadoras continuas de trigo

Sistema: Los granos en la capa

Velocidad de acumulación de humedad	=	Velocidad de transferencia de vapor hacia los alrededores (aire intergranular)
--	---	---

cuya versión matemática es la siguiente:

$$\rho_{so}(1 - \epsilon_0) S \Delta z \frac{\partial W}{\partial t} = - \delta \dot{m}_v \quad (7.2)$$

Igualando ahora las ecuaciones (7.1) y (7.2), reordenándolas y tomando límites para $\Delta z \rightarrow 0$, se obtiene la siguiente ecuación a derivadas parciales:

$$\rho_a \epsilon_0 S \frac{\partial h_a}{\partial t} + G_a S \frac{\partial h_a}{\partial z} - \rho_{so} (1 - \epsilon_0) S \left(- \frac{\partial W}{\partial t} \right) = 0 \quad (7.3)$$

Empleando la suposición (VIII) para el vapor de agua, se puede despreciar la velocidad de acumulación de vapor en la capa, por lo que se obtiene una ecuación diferencial ordinaria:

$$\frac{dh_a}{dz} = \frac{\rho_{so}(1 - \epsilon_0)}{G_a} \left(- \frac{\partial W}{\partial t} \right) \quad (7.4)$$

a partir de la cual se puede considerar que el aire opera en régimen pseudo estacionario.

7.2.4.2. Balances de Energía

En las expresiones de conservación de la energía, el estado de referencia de la entalpía se toma a 0°C, con agua en estado líquido (ASHRAE, 1997). Para los balances de energía, los cambios de energía cinética y potencial se consideran despreciables frente a los cambios de entalpía, y no existe trabajo contra partes móviles. En consecuencia, los balances relacionan cambios de entalpías con calores transferidos en estado no estacionario.

Sistema: El aire intergranular

Velocidad de acumulación de energía térmica	=	Velocidad neta de entrada de energía térmica asociada al flujo de aire	-	Velocidad de transferencia de calor convectiva hacia los granos	+	Velocidad de variación de la energía térmica debida al ingreso de vapor proveniente de los alrededores (granos)
---	---	--	---	---	---	---

que puede expresarse matemáticamente como sigue:

$$\rho_a \epsilon_0 S \Delta z \left(\frac{\partial H_a}{\partial t} \right) = G_a S H_{a,z} - G_a S H_{a,z+\Delta z} - \delta \dot{Q} + \delta \dot{m}_v H_v \quad (7.5)$$

donde H_v es la entalpía del vapor a la temperatura del grano.

Sistema: Los granos de la capa

Velocidad de acumulación de energía térmica dentro de los granos	=	Velocidad de transferencia de calor convectiva del aire a los granos	-	Velocidad de utilización de energía debida a la desorción de agua desde la superficie del grano
--	---	--	---	---

que, en términos matemáticos, se expresa así:

$$\rho_{so} (1 - \epsilon_0) S \Delta z \left(\frac{\partial H}{\partial t} \right) = \delta \dot{Q} - \delta \dot{m}_v H_v \quad (7.6)$$

Ecuación constitutiva para la velocidad de transferencia de calor

La velocidad de transferencia de calor convectiva grano-aire en la capa viene dada por la siguiente ecuación constitutiva

$$\delta \dot{Q} = h_T a_{vp0} (1 - \epsilon_0) S \Delta z (T_a - T) \quad (7.7)$$

Secadoras continuas de trigo

Combinación del balance de energía en el aire intergranular con la ecuación constitutiva de transferencia de calor y el balance de materia en el grano.

En la ec.(7.5), el flujo de materia transferida $\delta\dot{m}_v$, puede sustituirse por la expresión de la ec. (7.2) y la velocidad de transferencia de calor $\delta\dot{Q}$ por su definición de la ecuación constitutiva (7.7). Se obtiene así una relación, que, luego de tomar límites para $\Delta z \rightarrow 0$, toma la forma siguiente de una ecuación diferencial parcial:

$$\rho_a \epsilon_0 \frac{\partial H_a}{\partial t} + G_a \frac{\partial H_a}{\partial z} = - \rho_{s0} (1 - \epsilon_0) \frac{\partial W}{\partial t} H_v - h_T a_{vp0} (1 - \epsilon_0) (T_a - T)$$

Ecuación (7.8)

Aplicando la suposición (VIII) a la ecuación (7.8), la velocidad de acumulación de energía térmica en el aire intergranular de la capa puede despreciarse, obteniéndose otra ecuación diferencial ordinaria:

$$\frac{dH_a}{dz} = - \frac{(1 - \epsilon_0)}{G_a} \left(h_T a_{vp0} (T_a - T) - \left(- \frac{\partial W}{\partial t} \right) \rho_{s0} H_v \right) \quad (7.9)$$

Combinación del balance de energía en el grano con la ecuación constitutiva de transferencia de calor y el balance de materia en el grano.

Análogamente a lo hecho para el balance de energía del aire intergranular, se pueden reemplazar las ec. (7.2) y (7.7) en la (7.6), luego reordenar y tomar límites $\Delta z \rightarrow 0$. Se obtiene de esta forma la siguiente ecuación diferencial ordinaria para la variación temporal de la entalpía del grano con el tiempo:

$$\rho_{s0} \left(\frac{dH}{dt} \right) = h_T a_{vp0} (T_a - T) - \rho_{s0} \left(- \frac{\partial W}{\partial t} \right) H_v \quad (7.10)$$

7.2.5. Representación matemática de los balances de energía en aire intergranular y grano usando variables medibles.

A los fines de expresar las variaciones de las entalpías de aire y granos (ec. (7.9) y (7.10)) en términos de variables medibles, se utilizaron las definiciones de entalpía en función de temperatura y humedad absoluta para el aire, y en función de temperatura y contenido de humedad base seca para los granos.

Entalpía del aire húmedo

La entalpía del aire húmedo a la temperatura del seno del aire (T_a) se expresa en base seca como la suma de la contribución del aire seco y la del vapor que contiene:

$$H_a = H_{as} + H_{va} h_a \quad (7.11)$$

Para el reemplazo de la variación espacial dH_a/dz en la ec. (7.9), se debe derivar la ec. (7.11):

$$\frac{dH_a}{dz} = \frac{dH_{as}}{dz} + h_a \frac{dH_{va}}{dz} + H_{va} \frac{dh_a}{dz} \quad (7.12)$$

que requiere las expresiones individuales de las entalpías del aire seco y vapor de agua como función de la temperatura:

$$\begin{aligned} H_{as} &= C_{pa} T_a \\ H_{va} &= L_{w0} + C_{pv} T_a \end{aligned} \quad (7.13)$$

las que, reemplazadas en la ec.(7.12) permite obtener:

$$\frac{dH_a}{dz} = (C_{pa} + C_{pv} h_a) \frac{dT_a}{dz} + H_{va} \frac{dh_a}{dz} \quad (7.14)$$

El grupo $C_{pa} + C_{pv} h_a$ se denomina "calor específico del aire húmedo" o "calor húmedo".

Secadoras continuas de trigo

Entalpía de granos húmedos

La entalpía de los granos puede calcularse por combinación de las entalpías de materia seca y agua líquida, según:

$$H = H_s + H_w W \quad (7.15)$$

donde H_w es la entalpía del agua adsorbida a la temperatura del grano, T . A efectos de reemplazar dH/dt en la ec. (7.10), se debe encontrar la derivada de la ec. (7.15):

$$\frac{dH}{dt} = \frac{dH_s}{dt} + H_w \frac{dW}{dt} + W \frac{dH_w}{dt} \quad (7.16)$$

Por su parte, las entalpías de materia seca y agua adsorbida tienen las siguientes expresiones en función de la temperatura:

$$\begin{aligned} H_s &= C_{ps} T \\ H_w &= C_{pw} T \end{aligned} \quad (7.17)$$

las que, reemplazadas en la ec. (7.16), permiten obtener:

$$\frac{dH}{dt} = (C_{ps} + C_{pw} W) \frac{dT}{dt} + H_w \frac{dW}{dt} \quad (7.18)$$

7.2.6. Formas finales de los balances de energía en granos y aire intergranular de la capa

Teniendo ahora las derivadas de la entalpía del aire respecto de z expresadas en función de la temperatura del aire (T_a) y humedad absoluta (h_a) (ec. (7.14)) y la derivada de la entalpía de los granos respecto al tiempo expresada en función de su temperatura (T) y contenido de humedad (W) (ec. (7.18)), se puede reemplazar la primera en la ec. (7.9) y la segunda en la ec. (7.10).

Ecuación de la Temperatura del aire

Reemplazando entonces la ec. (7.14) para la dH_a/dz en la (7.9) y reordenando, se obtiene la forma final de la ec. diferencial para la temperatura del aire:

$$\frac{dT_a}{dz} = - \frac{(1 - \epsilon_0)}{(C_{pas} + C_{pv}h_a)} G_a \left[h_T a_{vp0} + \left(- \frac{dW}{dt} \right) \rho_{s0} C_{pv} \right] (T_a - T)$$

Ecuación (7.19)

Esta ecuación indica que la variación de la temperatura a lo largo de la coordenada del espesor del lecho ocurre por transferencia de calor convectivo con sus alrededores (granos), y que la variación se volverá menos importante en valor absoluto para mayores flujos máscicos de aire G_a (kg/(m²s)) y menores fuerzas impulsoras ($T_a - T$).

Este modelo considera el término del mezclado del vapor, proveniente de la desorción de agua del grano, con el aire de secado; allí, el vapor eleva su temperatura desde T , temperatura del grano, al valor resultante T_a , causando así un enfriamiento adicional del aire. En trabajos previos, este calentamiento del vapor de T a T_a se incluía en el balance de energía en el grano (Brooker y colab., 1992), lo cual, al menos formalmente, no debería ser correcto toda vez que la elevación de temperatura se produce en la película de aire estanca que rodea los granos y no en el interior de los mismos.

Ecuación de la Temperatura del grano

Pasando ahora a la fase grano, y reemplazando la expresión de la dH/dt (ec. (7.18)) en la (7.10), se obtiene la siguiente forma intermedia para la variación de la temperatura del grano con el tiempo:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{h_T a_{vp0} (T_a - T) - \left(- \frac{dW}{dt} \right) \rho_{s0} H_v + \rho_{s0} H_w \left(- \frac{dW}{dt} \right)}{\rho_{s0} (C_{ps} + C_{pw} W)} \quad (7.20)$$

donde H_v es la entalpía del vapor producido a la temperatura del grano (T) y H_w la entalpía

Secadoras continuas de trigo

del agua líquida adsorbida a la misma temperatura. Si se toma factor común el término $\rho_{s0}(-dW/dt)$ en la ec. (7.20), se obtendrá directamente la diferencia $H_v - H_w$ que no es sino el calor latente de desorción L_g , evaluado a W y T (capítulo 4). En consecuencia, se obtiene la forma final de la variación de la temperatura del grano con el tiempo:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{h_T a_{vp0} (T_a - T) - \rho_{s0} \left(-\frac{dW}{dt} \right) L_g}{\rho_{s0} (C_{ps} + C_{pw} W)} \quad (7.21)$$

Nótese que en muchos trabajos de secado (Parry, 1985; Sun y Woods, 1997 a y b), la notación empleada para el L_g resulta confusa: en lugar de expresar $L_g = L_g(W, T)$ como en la ec. (7.21) (que significa desorber (evaporar) el agua directamente a W y T), se inserta el grupo: $\{-C_{pw} T + L_g + C_{pv} T\}$, un camino termodinámicamente equivalente siempre y cuando el L_g se evalúe a W , pero a 0°C (El camino termodinámico es el siguiente: en lugar de desorber el agua a T , se la "enfía" líquida de T a 0°C , se la desorbe a esta temperatura y luego se "calienta" el vapor de 0°C a T). El problema surge al omitirse mencionar que L_g debe ser evaluado a 0°C , lo cual puede causar errores de alrededor del 5 al 10% en el tiempo de secado, dada la importancia del calor latente.

La ec. (7.21) indica que cualquier variación en la temperatura del grano se debe a la diferencia entre el calor que recibe del aire por convección forzada, cuya velocidad está dictada por la fuerza impulsora $(T_a - T)$ y el calor latente que utiliza para evaporar el agua adsorbida a la temperatura del grano (T), a un ritmo dictado por la velocidad de secado local en el lecho $(-dW/dt)$.

Debe notarse que tal diferencia sería cero si el grano se secara en el denominado "período de velocidad de secado constante" (capítulo 5), donde todo el calor cedido por el aire se utilizaría para evaporar agua sin permitir acumulación de energía térmica (y elevación de temperatura) en el grano. El secado de cereales se inscribe en el período de velocidad decreciente, de manera que los granos elevarán considerablemente su temperatura durante su transcurso.

Se han desarrollado ya las ec. (7.4) para la variación de la humedad absoluta del aire, (7.19) para la variación de la temperatura del aire y (7.21) para la velocidad de cambio de la temperatura de los granos. Sin embargo falta la ec. constitutiva de la velocidad de secado de granos individuales o ecuación de capa delgada, expresada como dW/dt en función del tiempo para cada capa del lecho fijo.

7.2.7. Velocidad de secado en la capa

Se usará la ecuación difusiva simplificada del capítulo 6 para $X = a_{ve0}(Dt)^{0.5} < 1$ o ecuación de tiempos cortos, y la forma de convergencia en un término de la serie infinita, para tiempos largos.

Velocidad de secado de capa a tiempos cortos

La ecuación de tiempos cortos se describe abajo

$$\frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = 1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} a_{ve0} \sqrt{Dt} + 0.331 a_{ve0}^2 Dt$$

donde, como se observó en el capítulo 6, se utiliza $D = D(T, W_0)$.

Expresando la velocidad de secado dW/dt de forma tal de mostrar explícitamente la fuerza impulsora en cada capa del lecho ($W - W_e$), se llega a la fórmula siguiente:

$$\frac{dW}{dt} = - (W - W_e) \frac{a_{ve0} \sqrt{\frac{D}{\pi t}} - 0.331 a_{ve0}^2 D}{\left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} a_{ve0} \sqrt{Dt} + 0.331 a_{ve0}^2 Dt \right)} \quad (7.22)$$

Secadoras continuas de trigo

Velocidad de secado de capa a tiempos largos

Para $X > 1$, la solución exacta en serie infinita EPG descrita en el capítulo 6 converge con un sólo término:

$$\frac{W - W_e}{W_0 - W_e} = \frac{6}{\pi^2} \exp\left(-\frac{\pi^2}{9} a_{ve0}^2 D t\right)$$

que, derivada respecto del tiempo, permite encontrar una forma en la cual t no aparece explícitamente:

$$\frac{dW}{dt} = - (W - W_e) \frac{\pi^2}{9} a_{ve0}^2 D \quad (7.23)$$

7.2.8. Resumen de las ecuaciones de cambio necesarias para modelar el secado de granos en lecho fijo

Las ec. (7.4), (7.19), (7.21) y (7.22) o (7.23) forman el sistema de cuatro ecuaciones diferenciales o "ecuaciones de secado" que describen la variación de las cuatro variables de estado del secado: humedad del aire (h_a), temperatura del aire (T_a), temperatura de los granos (T) y contenido de humedad de los granos (W). Para la continuidad de la evaluación de dW/dt entre tiempos cortos y largos, se deberá realizar el cambio de la ec. (7.22) a la (7.23) a $X = 1$ en cada capa. Debe indicarse que tal circunstancia ocurrirá a distintos tiempos dimensionales (t), debido a las evoluciones particulares de la temperatura del grano en cada capa, y por ende, del coeficiente de difusión.

Debe enfatizarse, asimismo, que la humedad de equilibrio W_e depende de la temperatura y humedad relativa del aire, que variará capa a capa en la dirección z y tiempo a tiempo en cada z , de acuerdo a las evoluciones particulares de T_a y h_{ra} en ellas.

La forma final de las cuatro ecuaciones de secado se reescribirán agrupadas a continuación por razones de claridad:

Ecuación constitutiva de transferencia de materia: velocidad de secado de granos en la capa

$$\frac{dW}{dt} = - (W - W_e) \frac{a_{ve0} \sqrt{\frac{D}{\pi t}} - 0,331 a_{ve0}^2 D}{\left(1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} a_{ve0} \sqrt{D t} + 0,331 a_{ve0}^2 D t \right)} \quad (7.22)$$

$$\frac{dW}{dt} = - (W - W_e) \frac{\pi^2}{9} a_{ve0}^2 D \quad (7.23)$$

Ecuación para la variación de la temperatura del grano

$$\frac{dT}{dt} = \frac{h_r a_{vp0} (T_a - T) - \rho_{s0} \left(-\frac{dW}{dt} \right) L_g}{\rho_{s0} (C_{ps} + C_{pw} W)} \quad (7.21)$$

Ecuación para la variación de la humedad absoluta del aire

$$\frac{dh_a}{dz} = \frac{\rho_{s0}(1 - \epsilon_0)}{G_a} \left(-\frac{dW}{dt} \right) \quad (7.4)$$

Ecuación para la variación de la temperatura del aire

$$\frac{dT_a}{dz} = - \frac{(1 - \epsilon_0)}{(C_{pas} + C_{pv} h_a) G_a} \left[h_r a_{vp0} + \left(-\frac{dW}{dt} \right) \rho_{s0} C_{pv} \right] (T_a - T)$$

Ecuación (7.19)

7.3. PARAMETROS DE LAS ECUACIONES DE SECADO

Aún cuando de por sí las ecuaciones de secado ya presentan una complejidad considerable, la notación utilizada en las ec. (7.4) a (7.23) oculta la variación adicional de parámetros y propiedades. Las mismas, declaradas o desarrolladas en capítulos previos, se resumen a continuación.

7.3.1. Propiedades del agua y del aire

- *Calores específicos* (capítulo 3)

Aire húmedo: $C_{pah} = C_{pa} + C_{pv} h_a$

Aire seco: $C_{pa} = 1008 \text{ J}/(\text{kg}^\circ\text{C})$

Vapor de agua $C_{pv} = 1883 \text{ J}/(\text{kg}^\circ\text{C})$.

Agua líquida: $C_{pw} = 4187 \text{ J}/(\text{kg}^\circ\text{C})$

- *Presión de saturación líquido-vapor de agua pura*

$p_s = \text{Exp} (A - B/(T + 273,16) - C \text{ Ln} (T + 273,16))$, Pa

$A = 54,119$, $B = 6547,1$, $C = 4,23$ (capítulo 3)

- *Presión parcial del vapor en el aire húmedo*

$p_v = p h_a / ((M_v/M_a) + h_a)$, Pa (capítulo 3)

- *Humedad relativa del aire*

$h_{ra} = p_v / p_s$, decimal (capítulo 3)

- *Calor latente de vaporización de agua pura*

$$L_w = (R/M_v) (B - C (T + 273,16)) \quad (B \text{ y } C \text{ de la correlación de } p_s).$$

que, reordenada para su uso en °C, da:

$$L_w = 2,4903 \times 10^6 - 1953,8 T, \text{ J/kg (capítulo 3).}$$

7.3.2. Propiedades del grano y del lecho

Dado que el modelo no contempla el escaso cambio de volumen de los granos *durante el secado*, las variables asociadas al volumen fueron correlacionadas con la humedad inicial (W_0):

- *Áreas superficiales por unidad de volumen de grano, densidad de grano y lecho de trigo, fracción de huecos del lecho.*

Las correlaciones de a_{ve} y a_{vp} (m^2/m^3) con la humedad, se calculan en función de W_0 .

$$\text{Área específica equivalente: } a_{ve0} = 1781,2 - 820,1 W_0$$

$$\text{Área específica efectiva: } a_{vp0} = 1960 - 1004,1 W_0$$

A su vez, se realizaron regresiones lineales de las densidades del grano (ρ_g) y del lecho (ρ_L) en función de W (datos del capítulo 2), y se las calculó aquí en función de la humedad inicial (densidades en kg/m^3).

$$\text{Densidad del grano: } \rho_{g0} = 1376,3 - 363,5 W_0$$

$$\text{Masa seca de los granos/volumen húmedo: } \rho_{s0} = \rho_{g0} / (1 + W_0)$$

$$\text{Densidad del lecho: } \rho_{L0} = 877,6 - 361,3 W_0$$

$$\text{Fracción de huecos o porosidad del lecho: } \epsilon_0 = 1 - \rho_{L0} / \rho_{g0}$$

Secadoras continuas de trigo

El valor medio de ϵ_0 , en el rango de humedades de 0,147 a 0,287, fué de 0,384, con muy baja variación (datos del capítulo 2).

- Calor específico del grano

Se presenta la ecuación aproximada

$$C_p = C_{ps} + C_{pw} W, \text{ J/(kg grano seco } ^\circ\text{C)} ; \text{ (Nellist, 1987)}$$

donde:

$$C_{ps} = 1300 \text{ J/(kg } ^\circ\text{C)}$$

que, según se verificó aquí, estima muy bien los datos experimentales de Disney (1954) (datos no mostrados).

- Coeficiente de Difusión Efectivo del agua en el trigo

Ecuación desarrollada en el capítulo 6:

$$D = [D_{\infty 1} + D_{\infty 2} (W_0 - 0.1891)] \text{ EXP} \left[- \frac{E_a}{R (T + 273.16)} \right]$$

$$D_{\infty 1} = 5,046 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s} ; D_{\infty 2} = 54,44 \times 10^{-7} \text{ m}^2/(\text{s. kg agua / kg seco})$$

$$E_a = 6492,5 \text{ cal/mol para } R = 1,987 \text{ cal}/(\text{mol K})$$

ó

$$E_a = 27183 \text{ J/mol para } R = 8,314 \text{ J}/(\text{mol K})$$

- Contenido de Humedad de equilibrio de los granos

Isoterma de Henderson-Thompson (capítulo 4):

$$W_e = 0.01 \left[- \frac{\text{Ln} (1 - h_{ra})}{k_{HT} (T_a + C_{HT})} \right]^{1/N}$$

con parámetros de trigo duro: $k_{HT} = 2,31 \times 10^{-5}$; $C_{HT} = 55,815$; $N = 2,2857$

- *Calor de sorción del agua en el trigo (L_g)*

Se utiliza el modelo deducido en función de la ecuación de Clapeyron combinada a la isoterma de Henderson-Thompson (capítulo 4). El valor de L_g viene dado en función de la temperatura (T) y la humedad (W) del grano:

$$L_g = L_w(T) + \frac{R(T + 273.16)^2}{M_v} \left[\frac{k_{HT}(100W)^N \text{Exp}[-k_{HT}(T + C_{HT})(100W)^N]}{1 - \text{Exp}(-k_{HT}(T + C)(100W)^N)} \right]$$

donde $L_w(T)$ es el calor de vaporización del agua pura, evaluado a la temperatura del grano.

- *Coefficiente de transferencia de calor aire-grano (h_T)*

Correlación de Sokhansanj y Bruce (1987) (capítulo 6)

$$J_H = 3.27 \text{ Re}_p^{-0.65}$$

donde $\text{Re}_p = G_a D_p / \mu_a$, donde, como se describió en los capítulos 3 y 6, da lugar a una expresión con propiedades variables donde $h_T \propto G_a^{0.35}$.

7.4. RESOLUCION NUMERICA DEL MODELO DE SECADO EN LECHO FIJO

Las ec. (7.21) y (7.22) o (7.23), (7.4) y (7.19) forman un sistema de cuatro ecuaciones diferenciales ordinarias acopladas (EDO) para la capa de la Figura 7.1. El sistema no es convencional dado que las variables del grano, W y T, deben integrarse en el tiempo mientras que las variables del aire, T_a y h_a se integran en la coordenada del espesor del lecho, z. Debe indicarse que las cuatro variables mencionadas son funciones de t y z.

Las condiciones iniciales requeridas para resolver las ecuaciones son las siguientes:

Secadoras continuas de trigo

$$t = 0 \begin{cases} W = W_0 & \text{para } 0 \leq z \leq Z_{\max} \quad (\text{ec. (7.22)}) \\ T = T_0 & \text{para } 0 \leq z \leq Z_{\max} \quad (\text{ec. (7.21)}) \end{cases}$$

$$z = 0 \begin{cases} h_a = h_{a1} & \text{para } t \geq 0 \quad (\text{ec. (7.4)}) \\ T_a = T_{a1} & \text{para } t \geq 0 \quad (\text{ec. (7.19)}) \end{cases}$$

Este sistema de EDO es fuertemente no lineal dado que las cuatro variables de estado de secado W , T , h_a and T_a están presentes en las cuatro ecuaciones de secado a través de los parámetros indicados en las secciones 7.3.1. y 7.3.2.. En consecuencia, el sistema requiere solución numérica.

7.4.1. Algoritmo básico de integración numérica de ecuaciones de secado en lecho fijo.

Integración en z, a t constante

Se calculan las cuatro ecuaciones de secado (dW/dt , dT/dt , dT_a/dz y dh_a/dz) para una capa dada, por ejemplo $z = 0$ (primera capa). Mientras las derivadas temporales se almacenan para esa capa, se integran las derivadas en z , calculando la humedad y temperatura del aire a la salida de esa capa

$$h_{az+\Delta z} = h_{az} + (dh_a/dz)_{z_c} \Delta z$$

$$T_{az+\Delta z} = T_{az} + (dT_a/dz)_{z_c} \Delta z$$

donde los valores en z son los de entrada a la capa y los de $z + \Delta z$ los de salida. El símbolo "zc" es el valor de z para el cual se calculan esas derivadas, o bien, dependiendo del método numérico empleado, puede significar un promedio de derivadas en el intervalo Δz . Los valores del aire a la salida de la capa serán los de entrada de la capa siguiente. El proceso se sigue aplicando "capa por capa" hasta llegar a $z = Z_{\max}$, cubriendo así todo el espesor del lecho.

Integración en t, a z constante

Con las dW/dt y dT/dt almacenadas para cada capa al tiempo considerado, las W y T son integradas en el intervalo de tiempo Δt , por medio de:

$$W_{t+\Delta t} = W_t + (dW/dt)_{tc} \Delta t$$

$$T_{t+\Delta t} = T_t + (dT/dt)_{tc} \Delta t$$

donde ahora "tc" corresponderá a la forma particular de evaluar la derivada en ese intervalo de tiempo. El tiempo se adelanta un Δt y se vuelve a integrar el lecho en z . Luego de cada integración en t , en cada tiempo, se calcula la humedad media de los granos en el lecho (W_m) como promedio de los valores en todas las capas; cuando W_m alcanza el valor deseado, el método de resolución se detiene, y el tiempo "t" al cual esto ocurre se denomina "tiempo de secado", t_s . Mediante la resolución del modelo, los resultados obtenidos son t_s (resultado práctico principal) más el "mapa" de valores de W , T , h_a y T_a (y por consiguiente h_{ra}) en función de z y t . Además, se pueden calcular "parámetros de comportamiento" como consumo específico de energía, homogeneidad del secado, etc.

7.4.2. Descripción del método numérico específico de resolución.

El método a utilizarse en este trabajo aplica la técnica de Runge-Kutta de cuarto orden para integrar las ecuaciones diferenciales de la fase granos (dW/dt y dT/dt) en combinación con un método de Euler de 2° orden (Euler modificado) a fines de integrar las correspondientes a la fase aire (dh_a/dz y dT_a/dz). La Figura 7.2 muestra un esquema del método de resolución. Se observa que, a un tiempo dado, por ejemplo t_b (al comienzo del intervalo de tiempo, Δt), las variables T_a y h_a son integradas a lo largo de la dirección del espesor del lecho.

Secadoras continuas de trigo

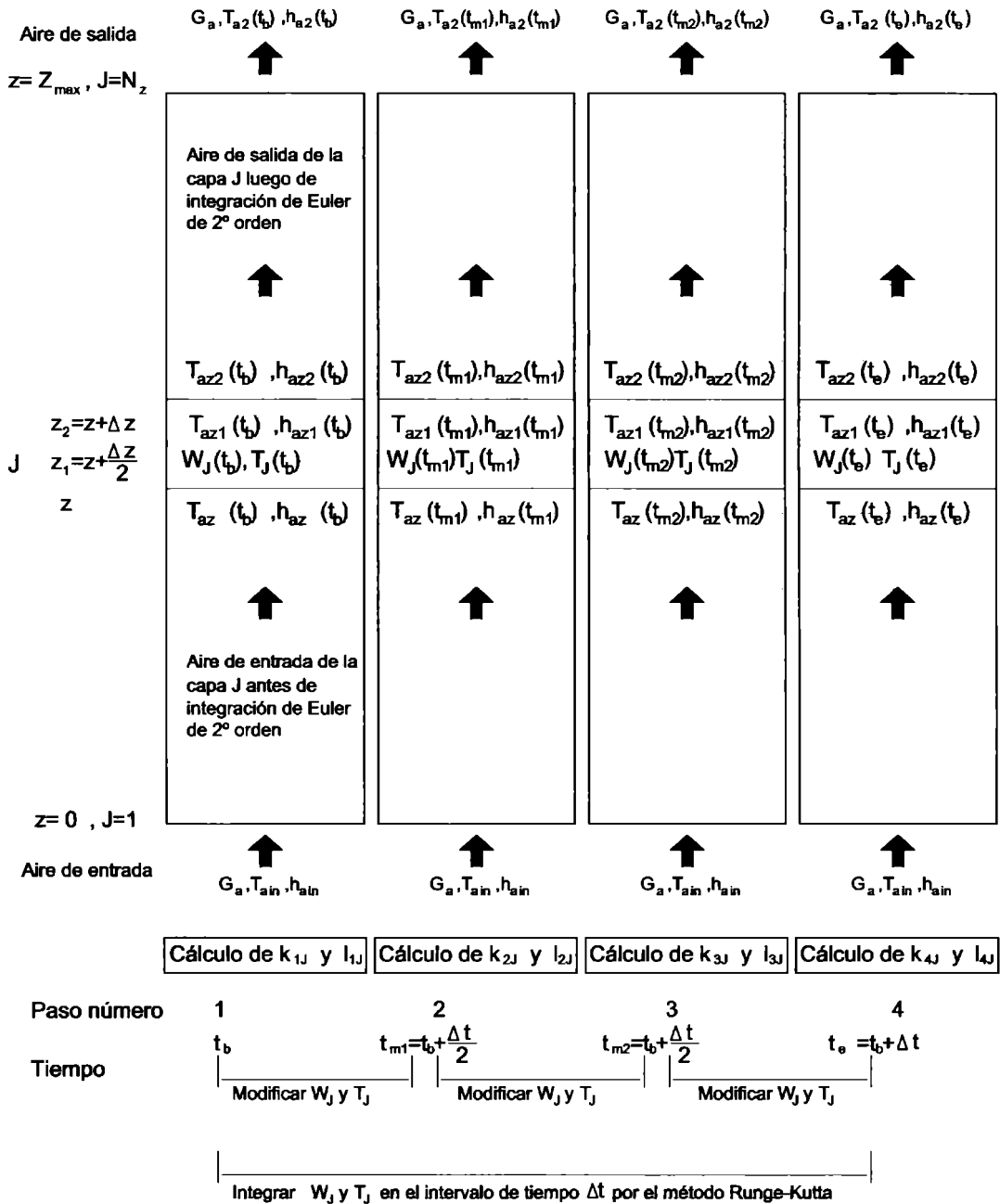


Figura 7.2. Esquema del método numérico de integración utilizado.

7.4.2.1. Integración en la dirección z a un tiempo dado.

En cada capa "j" (intervalo de longitud de z a z + Δz), la integración se realiza por un método de Euler de 2° orden o Euler modificado. La misma consta de dos pasos.

Primer paso: cálculo de derivadas en el centro del intervalo

$$T_{a\ z1} = T_{a\ z} + \left(\frac{dT_a}{dz} \right)_z \frac{\Delta z}{2} \qquad h_{a\ z1} = h_{a\ z} + \left(\frac{dh_a}{dz} \right)_z \frac{\Delta z}{2}$$

que da valores de T_a y h_a en $z_1 = z + \Delta z/2$, esto es, en el centro del intervalo de espesor de lecho Δz a partir de sus valores y derivadas en z. Los valores en z_1 se usan, a su vez, para calcular derivadas centradas (más representativas) para T_a y h_a en el intervalo Δz , usadas para integrar las variables del aire desde z a $z_2 = z + \Delta z$ (esto es, en el intervalo completo Δz) de la manera siguiente:

Segundo paso: integración en el intervalo completo Δz

$$T_{a\ z2} = T_{a\ z} + \left(\frac{dT_a}{dz} \right)_{z1} \Delta z \qquad h_{a\ z2} = h_{a\ z} + \left(\frac{dh_a}{dz} \right)_{z1} \Delta z$$

Los valores de $T_{a\ z2}$ y $h_{a\ z2}$ así calculados representan las condiciones del aire a la salida de la capa j, que se toman como valores de entrada para la capa siguiente j+1. El proceso continúa al tiempo dado hasta que z alcanza Z_{max} , el espesor total del lecho. En cada paso de integración a lo largo de z, los valores de humedad y temperatura del grano en cada capa, W_j y T_j , no se modifican, pero sus derivadas temporales se almacenan para la integración en el tiempo por Runge-Kutta (Figura 7.2).

Secadoras continuas de trigo

7.4.2.2. Integración en el tiempo, t

Se requieren cuatro pasos de integración a lo largo de z por cada intervalo de tiempo: los mismos se realizan a tiempos t_b , $t_{m1} = t_b + \Delta t/2$, $t_{m2} = t_b + \Delta t/2$, y $t_e = t_b + \Delta t$. A t_b , las derivadas dW/dt y dT/dt de cada capa se almacenan como k_{1j} y l_{1j} , respectivamente, y se usan luego para modificar W_j y T_j entre t_b y t_{m1} . El método continúa en forma similar de t_{m1} a t_{m2} , y de t_{m2} a t_e . Las ecuaciones para las modificaciones citadas son:

$$W_{j \ t_{m1}} = W_{j \ t_b} + k_{1j} \frac{\Delta t}{2}$$

$$T_{j \ t_{m1}} = T_{j \ t_b} + l_{1j} \frac{\Delta t}{2}$$

$$W_{j \ t_{m2}} = W_{j \ t_b} + k_{2j} \frac{\Delta t}{2}$$

$$T_{j \ t_{m2}} = T_{j \ t_b} + l_{2j} \frac{\Delta t}{2}$$

$$W_{j \ t_e} = W_{j \ t_b} + k_{3j} \Delta t$$

$$T_{j \ t_e} = T_{j \ t_b} + l_{3j} \Delta t$$

Dentro de este intervalo Δt , los valores de dW/dt y dT/dt de cada capa se almacenan en el cuarto paso de integración a lo largo de z como k_{4j} y l_{4j} , respectivamente. Luego, los valores de W y T de cada capa se pueden integrar finalmente en el intervalo completo de tiempo Δt por el método de Runge-Kutta:

$$W_{j \ t_e} = W_{j \ t_b} + \left(\frac{k_{1j} + 2 k_{2j} + 2 k_{3j} + k_{4j}}{6} \right) \Delta t$$

$$T_{j \ t_e} = T_{j \ t_b} + \left(\frac{l_{1j} + 2 l_{2j} + 2 l_{3j} + l_{4j}}{6} \right) \Delta t$$

7.4.3. Características de la implementación del modelo en un programa de simulación

El modelo y la resolución numérica fueron implementados en un programa FORTRAN 77, aplicando técnicas de modularización y programación estructurada (López Román, 1995).

Selección de intervalos de tiempo y longitud

Luego de correr el programa en distintas condiciones, se obtuvo estabilidad numérica para un $\Delta t = 10$ s y $\Delta z = 0,003$ m, puesto que las predicciones no cambiaron al usar intervalos más pequeños. El criterio de estabilidad fué tomado en las condiciones de cambios más bruscos (alta humedad inicial del grano y alta temperatura del aire). El programa fué corrido en una computadora tipo PC Pentium MMX 166 MHz, presentando cortos tiempos de ejecución.

7.5. MODELADO DE LA CONDENSACION DE AGUA EN GRANOS

Justificación

Dado que los granos ceden vapor al aire, la humedad relativa crece conforme el mismo atraviesa el lecho. Las condiciones de bajo caudal de aire, elevado espesor total del lecho y temperaturas de entrada de aire no muy elevadas favorecen el crecimiento de humedades relativas hasta el valor de condensación. Es necesario distinguir entre la posible readsorción de agua que se predecirá si $W_e > W$, de la condensación de agua. En la primera, no hace falta que el aire esté saturado, y la cinética de capa delgada puede dar cuenta automáticamente de esta situación.

En saturación, sin embargo, la ecuación de integración dh_a/dz (ec. (7.4)) no puede reconocer la saturación del aire, por lo cual se pueden predecir valores de h_a que den lugar a $p_{va} > p_s$, esto es, que conduzcan a valores irreales de $h_{ra} > 1$. Cuando esto sucede, se suele suponer que h_{ra} es aproximadamente igual a la unidad (en rigor 0,998-0,999 para evitar que la matemática del equilibrio sorcional prediga un W_e tendiendo a infinito) para continuar el cálculo de otra capa. Así, se puede modelar tan solo la readsorción de vapor pero no la condensación de agua líquida sobre el grano.

Secadoras continuas de trigo

El problema no suele ser importante en la mayoría de los casos de secado continuo de trigo pues el aire caliente presenta una gran capacidad de disolución de vapor y el espesor de los lechos rara vez supera 0,35 m. Así, el problema puede existir sólo en los minutos iniciales y en las capas más próximas a la salida del aire.

Sin embargo, es importante intentar un modelado de la condensación para hacer más flexible al modelo, y permitir su uso en un rango más amplio de condiciones (Nellist, 1974).

Descripción de la rutina de condensación

El procedimiento utilizado para modelar aquí la condensación se basa en una rutina desarrollada por Nellist (1974) dentro de un esquema de integración de lecho por Euler de 1° orden en z y t . Por consiguiente, la rutina fué adaptada al método numérico empleado aquí.

Se describirá a continuación el procedimiento que se invoca cada vez que la h_{ra} calculada en primera instancia sea > 1 . En la práctica, el valor límite usado no fué la unidad, por los problemas de la matemática sorcional, sino $h_{rmax} = 0,996$.

La descripción se limitará a la integración en un tiempo dado (por ejemplo $t = t_b$), para el primer intervalo de integración en z , y dentro de él, para el primer paso de integración, esto es, entre z y $z_1 = z + \Delta z/2$. Sin embargo, el método se aplica para cualquier paso en z y cualquier valor del tiempo.

Asumiendo que se comienza con aire no saturado a la entrada de la capa, se calculan normalmente las cuatro ecuaciones de secado dW/dt , dT/dt , dh_a/dz y dT_a/dz , integrándose las dos últimas en la primera mitad del intervalo: $\Delta z/2$. Si la h_a calculada en $z_1 = z + \Delta z/2$ (punto medio de la capa) da lugar a una $h_{ra} \equiv p_{va}/p_s > h_{rmax}$ (p_s se evalúa a T_a en $z_1 = z + \Delta z/2$), se calcula la diferencia $h_{ra} - h_{rmax}$, denominada "discrepancia" (DIS). Un valor de DIS mayor que 0,001 pone en funcionamiento un lazo iterativo donde se calcula una nueva $p_{va} = h_{rmax} p_s$, para reevaluar la humedad absoluta de saturación (h_{as}) a esa nueva p_v .

La diferencia entre la h_a calculada originalmente y la h_{as} es la cantidad de vapor en exceso. Usando un balance de materia en la capa, ese exceso se asume que condensa sobre los granos de la capa, aumentando su humedad W . En consecuencia, dividiendo ese aumento por un intervalo de tiempo, se obtiene la dW/dt (> 0 ahora), resultante de condensación en la capa. Por consiguiente, en condensación, la dW/dt no se calcula por la cinética de capa delgada (ec. (7.22) o (7.23)), sino de la manera recién descripta.

Inicializando un contador de iteraciones, y usando esa nueva dW/dt se vuelven a calcular las otras ecuaciones de media capa: dT/dt , dh_a/dz y dT_a/dz . Al integrar nuevamente h_a y T_a en ese $\Delta z/2$, se obtiene una nueva h_{ra} , que puede ser otra vez $> h_{max}$, obteniéndose una nueva DIS. Utilizando la dW/dt y la última DIS, se llama a un procedimiento de búsqueda (Nellist, 1974) que repite el esquema mencionado de adjudicación del exceso de vapor en el aire como agua condensada al grano y recálculo de las derivadas restantes, hasta obtener el valor de dW/dt para el cual $h_{ra} = h_{max} \pm 0,001$. Esto aumenta el tiempo de cálculo del programa, pero sólo en aquellas condiciones operativas que conducen a la saturación del aire. El procedimiento de condensación fué programado dentro de un lazo de DO WHILE, estructura de control con control lógico que favorece la programación de lazos iterativos (López Román, 1995).

7.6. RESULTADOS Y DISCUSION

7.6.1. Variables y parámetros que afectan el tiempo de secado

El modelo desarrollado en la sección anterior permite deducir que el tiempo de secado t_s de un lecho dado de granos depende al menos de siete variables, tres de ellas de la fase aire como temperatura y humedad de entrada (T_{a1} y h_{a1}) y flujo másico del aire seco (G_a), tres de la fase granos: contenido de humedad inicial (W_0), temperatura inicial (T_0), contenido de humedad media final en lecho (W_{mf}), y una del equipo: el espesor del lecho (Z_{max}).

Secadoras continuas de trigo

$$t_s = f(T_a, h_a, G_a, Z_{\max}, T_0, W_0, W_{mf}) \quad (7.24)$$

La frase " un lecho dado de granos " no es ociosa, pues representa una cantidad de propiedades adicionales a las condiciones operativas de la ec. (7.24), que pueden cambiar hasta cierto punto de una variedad a otra de trigo. Estas son, por un lado, los diámetros de partícula y magnitudes relacionadas como áreas específicas de grano, que influyen en la velocidad de secado y en la de transferencia de calor.

Otras propiedades que presentan cierta variación son la densidad de materia seca referida al volumen inicial del grano (ρ_{s0}), porosidad de lecho ϵ_0 (que a su vez depende, en un lecho dado, con el grado de compactación), calor de desorción (L_g), coeficiente de difusión (D), y humedades de equilibrio sorcional, W_e , incluyendo el fenómeno de histéresis (capítulo 4). En consecuencia, la funcionalidad real del tiempo de secado y de los parámetros de comportamiento se extiende mucho más allá de las siete variables originalmente descritas, lo que muestra la complejidad del problema y, por tanto, la necesidad de extender el uso de los modelos matemáticos, no sólo para evaluar el tiempo de secado para un juego de condiciones operativas dadas, sino también para estimar la sensibilidad paramétrica del modelo con las propiedades enumeradas. Sin embargo, los modelos deben ser convalidados contra datos experimentales.

7.6.2. Comparación de predicciones del modelo con datos experimentales.

7.6.2.1. Datos de Warner y Browne (1962)

La Tabla 7.1 muestra la comparación entre tiempos de secado predichos y experimentales para distintas condiciones operativas en lechos de $Z_{\max} = 0,61$ m. Los datos corresponden a Warner y Browne (1962).

TABLA 7.1: Comparación de tiempos predichos con experimentales de Warner y Browne (1962)

N°	Condiciones del aire					Condiciones del grano			Tiempo de secado t_s , min		Errores, %	
	T_{a1} °C	h_{a1} kg/kg	G_a kg/(m ² s)	W_0 dec. b.s.	W_{mf} dec. b.s.	Predicho		Exp.	Predicho a W_{mf}	E_{pt}	E_{pw}	
						W_{mf} dec. b.s.	W_{mf} a t_s dec. b.s.					
1	37,8	0,011	0,17	0,247	0,151	0,131		960	748	-22,0	20,8	
2	37,7	0,013	0,22	0,250	0,147	0,136		840	730	-13,1	10,2	
3	37,9	0,010	0,28	0,255	0,148	0,131		660	527	-20,2	15,9	
4	37,6	0,010	0,34	0,253	0,152	0,138		540	440	-22,7	13,9	
5	37,9	0,010	0,39	0,258	0,152	0,140		480	407	-15,2	11,3	
6	48,9	0,010	0,11	0,269	0,101	0,064		1920	1195	-37,8	22,0	
7	49,1	0,009	0,16	0,267	0,125	0,119		720	665	-7,6	4,2	
8	48,9	0,008	0,16	0,202	0,133	0,118		540	430	-20,3	21,7	
9	49,0	0,009	0,22	0,198	0,126	0,112		480	380	-20,8	19,4	
10	49,1	0,008	0,22	0,269	0,143	0,109		600	437	-27,2	27,0	
11	49,1	0,010	0,27	0,274	0,157	0,138		420	347	-17,3	16,2	
12	59,7	0,013	0,10	0,290	0,147	0,122		930	797	-14,3	17,5	
13	59,6	0,017	0,16	0,244	0,110	0,103		660	620	-6,0	5,2	
14	59,7	0,012	0,16	0,285	0,127	0,114		630	578	-8,2	8,2	
15	60,1	0,012	0,21	0,239	0,109	0,092		540	450	-16,7	13,0	
16	59,6	0,012	0,20	0,252	0,136	0,134		390	382	-2,0	1,7	
17	58,6	0,012	0,26	0,290	0,163	0,151		330	298	-9,6	9,8	
18	59,4	0,011	0,26	0,247	0,138	0,136		300	292	-2,7	1,8	
19	59,5	0,011	0,31	0,244	0,122	0,122		300	301	+ 0,4	0,0	
20	60,5	0,009	0,37	0,231	0,125	0,122		240	231	-3,7	2,8	

Secadoras continuas de trigo

En la Tabla 7,1, el valor W_{mfp} es la humedad final media predicha por el modelo al tiempo de secado experimental. Los errores E_{pt} y E_{pw} son de tipo relativo porcentual. El valor de E_{pt} viene dado por:

$$E_{pt} = 100 \frac{(t_s \text{ predicho} - t_s \text{ experimental})}{t_s \text{ experimental}} \quad (7.25)$$

donde t_s pred. es el tiempo de secado predicho por el modelo para alcanzar la humedad media final experimental, W_{mf} .

El error E_{pw} se calcula de la manera siguiente:

$$E_{pw} = 100 \frac{[(W_0 - W_{mfp}) - (W_0 - W_{mf})]}{(W_0 - W_{mf})} \quad (7.26)$$

donde se compara la humedad removida predicha por el modelo al tiempo experimental de secado ($W_0 - W_{mfp}$) con la experimental ($W_0 - W_{mf}$).

Para estos datos de Warner y Browne (1962), el valor promedio de E_{pt} , tomando el módulo de cada valor, fue de 14,2%, mientras que la media de los E_{pw} , calculada en forma similar, fue un poco menor, 12,1%.

El primer análisis que puede hacerse es la influencia del espesor del lecho: si bien todas las corridas se realizaron a $Z_{max}=0,61$ m, lo cual no permite aún establecer la tendencia del error E_{pt} con esta variable, los resultados de $T_{a1} \approx 60^\circ\text{C}$, predichos en casi todos los casos con bajo error, indicarían que el espesor no es en sí mismo causa de desviación.

E_{pt} versus la extensión del tiempo de secado

Para comparar la evolución del error porcentual con el orden de los tiempos de secado (t_s), tanto los E_{pt} de este trabajo como aquellos que surgen de las predicciones de Bruce (1984) para los mismos datos, se graficaron en la Figura 7.3:

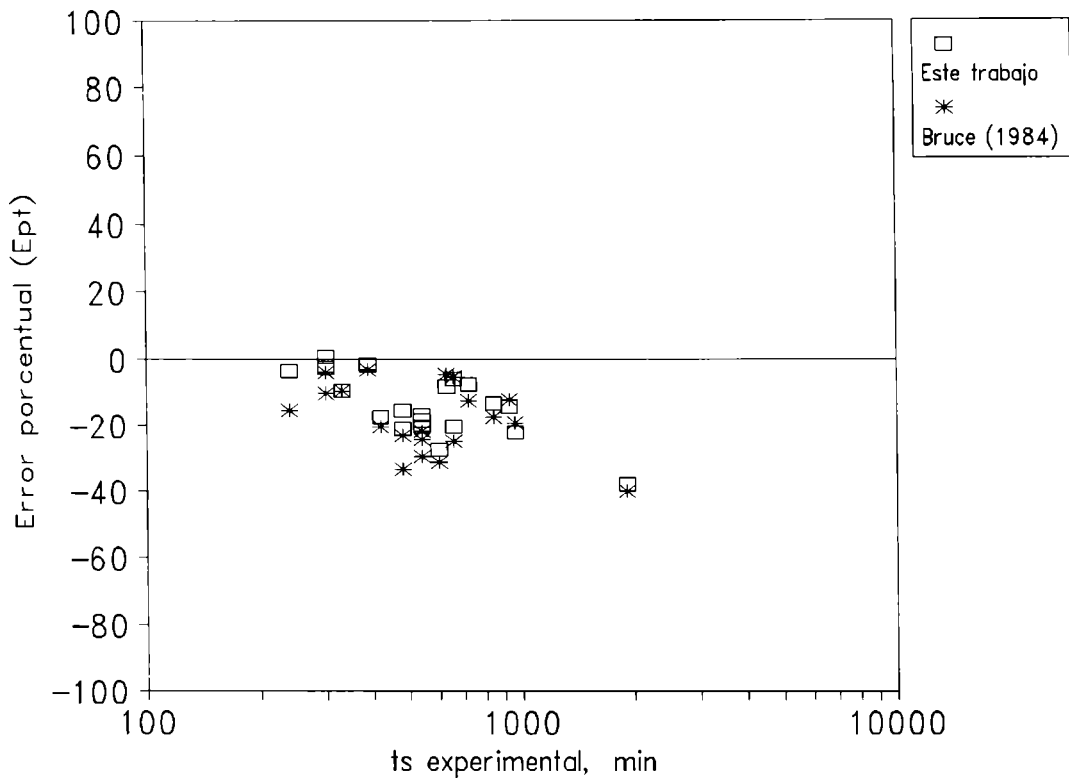


Figura 7.3. Errores porcentuales entre tiempos de secado (t_s) predichos y experimentales para este trabajo y para el de Bruce (1984), en función de t_s experimental.

En primer lugar, puede verse que las predicciones de este trabajo, en general, permiten un progreso respecto de la contribución anterior, especialmente en el tiempo experimental más corto: 240 min y en dos corridas de $t_s \approx 300$ min. En rigor, cualquier tiempo experimental mayor que los usados en la determinación del coeficiente de difusión por medio de las corridas de capa delgada, esto es, $t_s > 240$ min (capítulo 6) significa una extrapolación de los datos. Justamente esa es la zona donde el modelo se desvía de los datos experimentales. Debe considerarse, no obstante, que, en secadoras continuas de trigo con aire caliente, con espesores de lecho de 0,20-0,40, los tiempos de residencia experimentales son, prácticamente siempre, menores a 180 min (Nellist, 1987), de manera que el modelo predice

Secadoras continuas de trigo

bien en la zona de mayor interés. Debe observarse que el modelo, al igual que el de Bruce (1984), tiende a subestimar los tiempos experimentales de Warner y Browne (1962). Todos los errores E_{pt} son < 0 , excepto uno, y todos los E_{pw} , excepto uno que es 0, resultan positivos; se tiende a predecir mayor evaporación de agua a medida que crece t_s . Se analizará la tendencia del error con otras condiciones operativas.

E_{pt} vs la temperatura de entrada del aire

Si se toman promedios parciales de los errores E_{pt} por nivel de temperatura de entrada del aire (T_{a1}), nominalmente de 40, 50 y 60°C, los valores hallados son de 18,6, 21,9 y 7,1%. La tendencia aparente con la temperatura no es en realidad muy clara pues el error a nivel 50°C es mayor que en los otros dos. A su vez, el error es muy bajo a nivel 60°C. Los datos se muestran en la Figura 7.4.

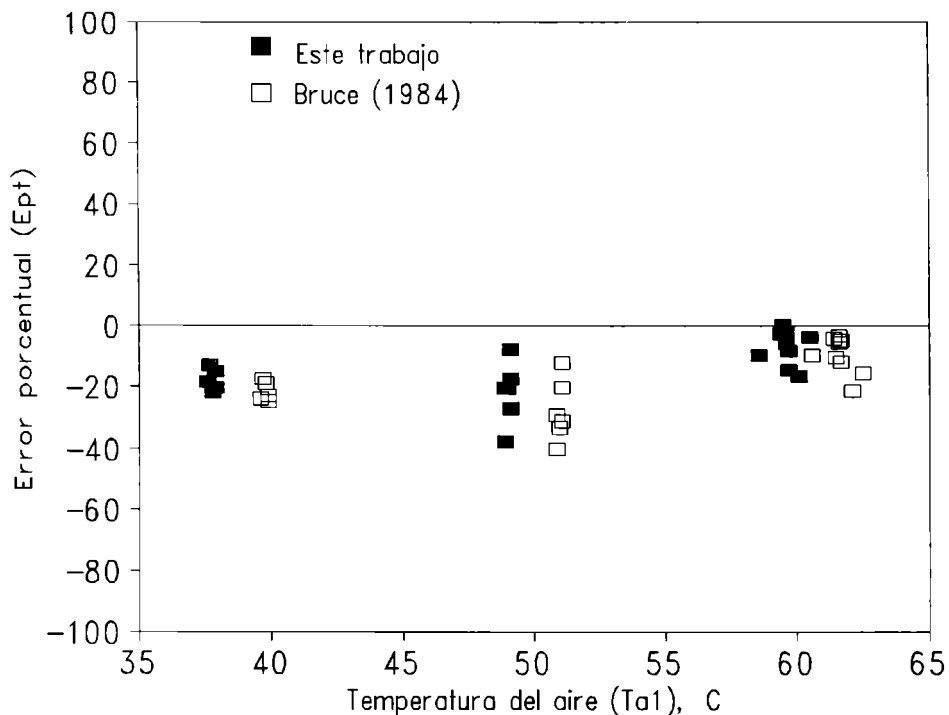


Figura 7.4. Errores porcentuales en función de la temperatura del aire a la entrada del lecho

Para las predicciones de Bruce (1984) de la Figura 7.4, las temperaturas asignadas a los datos se desplazaron levemente hacia la derecha, a fines de evitar superposición.

Obsérvese que la causalidad de T_{a1} está ligada al tiempo de secado: a mayor T_{a1} , el secado se acelera y los tiempos son menores. Si se considera esto y que los errores fueron similares a 40 y 50°C, se podría concluir que el nivel de error no está directamente relacionado a la temperatura del aire, sino a la escala de tiempos. Debe analizarse, no obstante, las posibles razones de las desviaciones a escalas de tiempo mayores que 300 min.

Comparación del modelo de este trabajo con el de Bruce (1984)

El modelo de Bruce (1984) presenta ecuaciones de secado dT/dt , dT_a/dz y dh_a/dz comparables con las de este trabajo, pero su cinética de capa delgada es del tipo Lewis $(-dW/dt) = k_L (W - W_e)$ que predice, a nivel de capa delgada, un secado más lento que el observado a tiempos cortos y más rápido a tiempos largos. El valor de k_L empleado incluye una dependencia tipo Arrhenius de T_a , con una Energía de activación aparente de 8800 cal/mol. Así, su funcionalidad con T_a es más fuerte que la de este trabajo ($E_a \approx 6500$ cal/mol). Otra diferencia importante es la utilización de una curva de equilibrio de Nellist y Dumont (1979). A estos efectos, la Figura 7.5 la compara a 50°C con la isoterma de Henderson-Thompson para trigo-duro, empleada en esta tesis:

Si bien existe una similitud de las predicciones a valores intermedios de h_r , la curva de Nellist -Dumont predice mayores humedades de grano a bajas y altas humedades relativas. Esto reduce las fuerzas impulsoras, haciendo el modelo tendiente a calcular mayores tiempos de secado, especialmente en el rango de tiempos largos.

Secadoras continuas de trigo

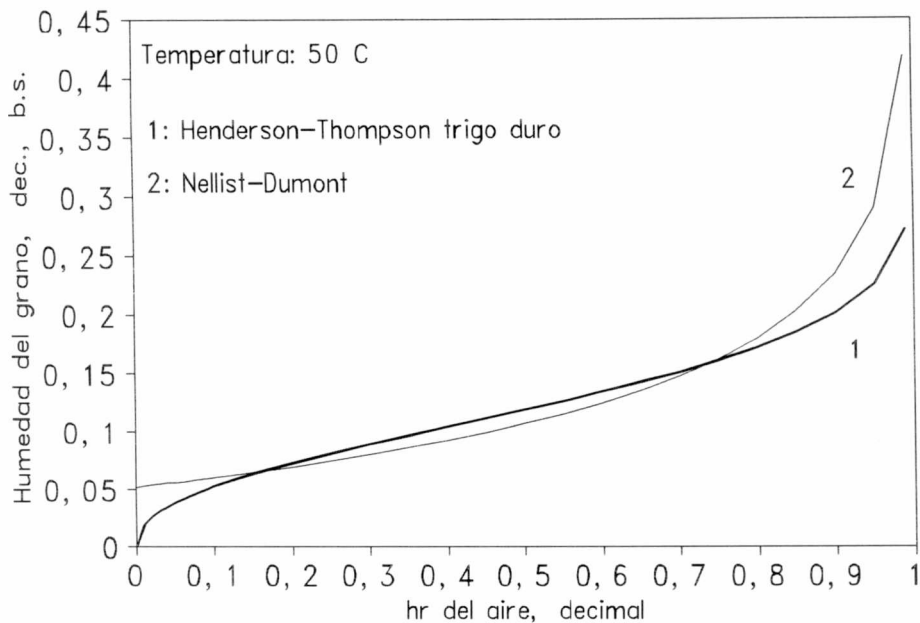


Figura 7.5. Isoterma de Henderson-Thompson para trigo duro y curva de equilibrio de secado de Nellist-Dumont (1979) empleada en el trabajo de Bruce (1984).

El empleo de la ecuación de Gallaher para L_g (capítulo 4) hace al modelo más demandante de calor latente a bajas humedades, comparado con el empleado aquí. Los factores enumerados ejercen una compensación natural de la tendencia de la ecuación de Lewis a predecir un secado más rápido a tiempos largos. Debe indicarse que al realizarse el trabajo de Bruce (1984), era usual priorizar la obtención de un modelo de lecho fijo de "rápido" tiempo de poder de cálculo, lo que explica el uso de la ecuación de Lewis y un algoritmo numérico de 1° orden en t y z .

En conclusión, se observa que el modelo desarrollado en esta tesis, que no presenta efectos de compensación, permite mejorar las predicciones del trabajo previo. Sin embargo, se continuará el análisis de la posible causa de desvío de los datos a tiempos largos.

E_{pt} vs el caudal del aire

Se graficaron los E_{pt} frente a G_a en la Figura 7.6.

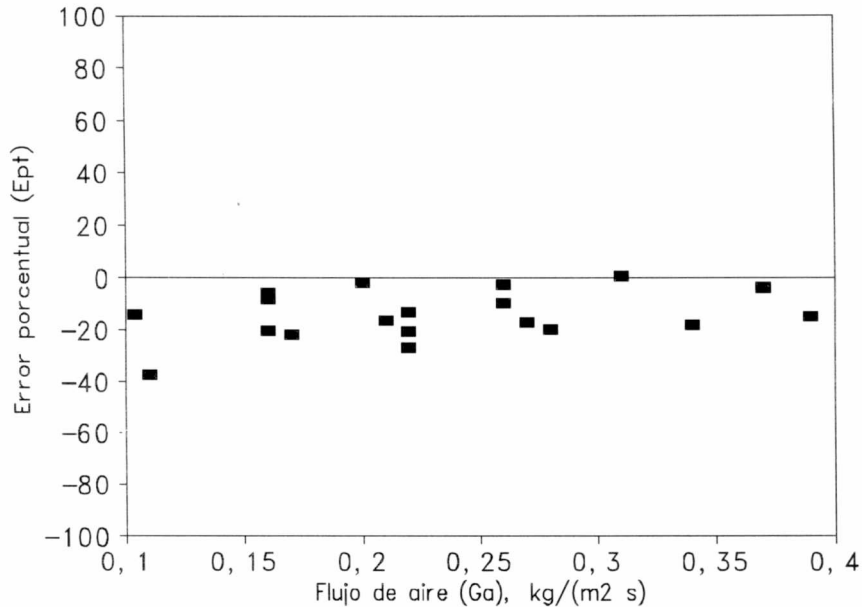


Figura 7.6. Errores porcentuales del tiempo de secado vs flujo de aire

Se interpreta que la Figura 7.6 no muestra una tendencia definida del E_{pt} con el flujo de aire (G_a); así, el modelo interpretaría correctamente su efecto, tanto a nivel fluidodinámico como a nivel de agente de acarreo de la humedad evaporada en el lecho fijo de trigo.

E_{pt} vs la humedad absoluta del aire

Una variable que no se considera de mucha importancia en secado con aire caliente es la humedad absoluta del aire; dado que el aire ambiente tiene una muy limitada capacidad de disolver vapor, los niveles de la misma están muy acotados e influyen poco cuando el aire se calienta previo al secado pues en cualquier caso habrá un marcado descenso de la humedad relativa. De todas maneras, la Figura 7.7 muestra la evolución de E_{pt} con la humedad absoluta del aire de entrada h_{a1} .

Secadoras continuas de trigo

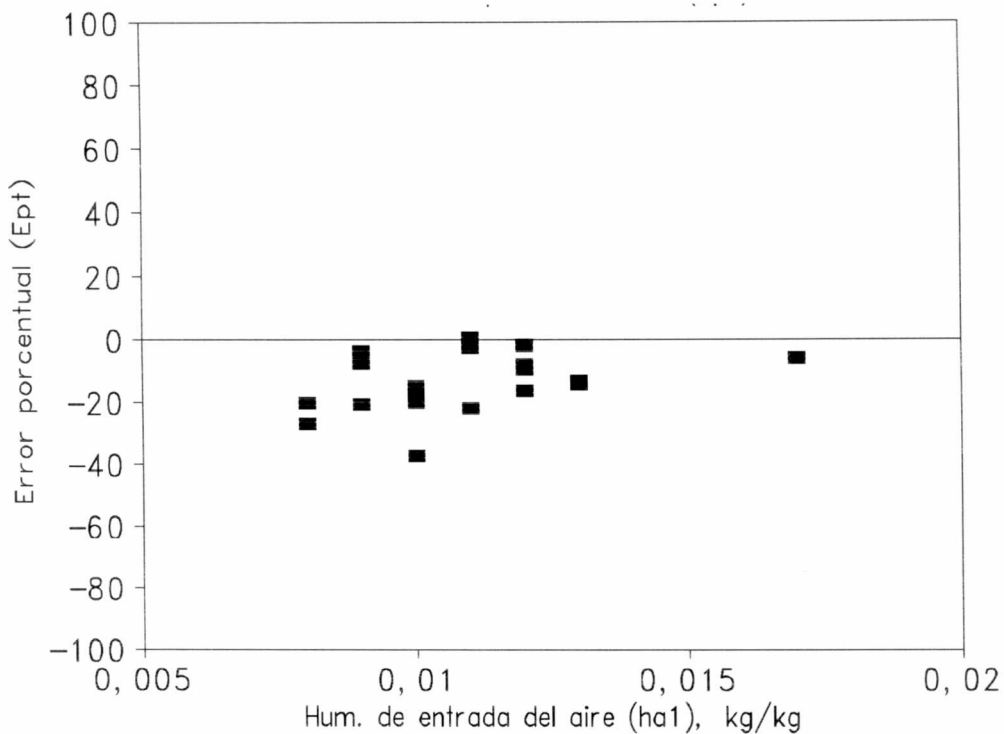


Figura 7.7. Errores porcentuales del tiempo de secado vs humedad absoluta del aire de entrada

No se observa ninguna tendencia definida, de manera que la humedad absoluta no es en sí misma causa de errores.

E_{pt} vs los contenidos de humedad iniciales (W_0) y finales medios del lecho (W_{fm})

Las variables individuales cuya influencia resta observar son el contenido de humedad inicial y final medio del grano.

Las Figuras 7.8 y 7.9 no muestran ninguna influencia definida de W_0 ni W_{mf} , respectivamente. En el caso de W_0 , se atribuye ésto a que la cinética de capa delgada desarrollada en el capítulo 6, da cuenta correctamente del efecto de W_0 en el D.

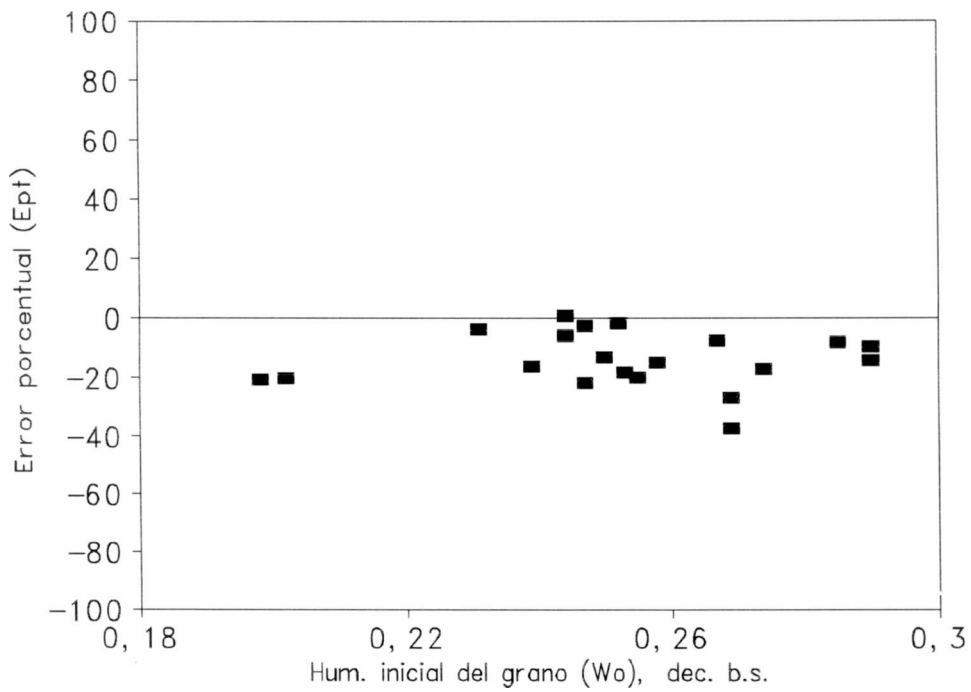


Figura 7.8. Errores porcentuales del tiempo de secado vs humedad inicial del grano

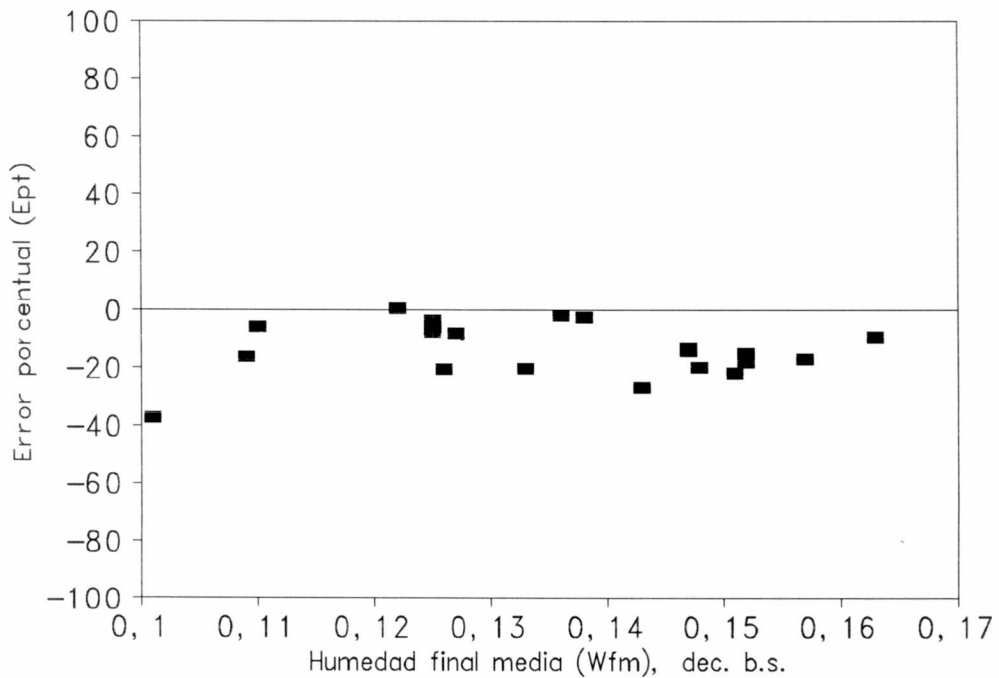


Figura 7.9. Errores porcentuales del tiempo de secado vs humedad media final del lecho

Secadoras continuas de trigo

Análisis de combinación de variables: Error medio del tiempo de secado vs la capacidad de secado del aire

Si se grafica el E_{pt} en función del producto del flujo de aire por la diferencia entre la humedad absoluta de saturación $h_{as} = h_{as}(T_{a1})$ y el valor de entrada (h_{a1}), se podrá contabilizar la capacidad de secado del aire. Menores caudales a menores temperaturas permiten el desarrollo de mayores h_r en el lecho durante el secado y viceversa. Los datos se muestran en la figura siguiente.

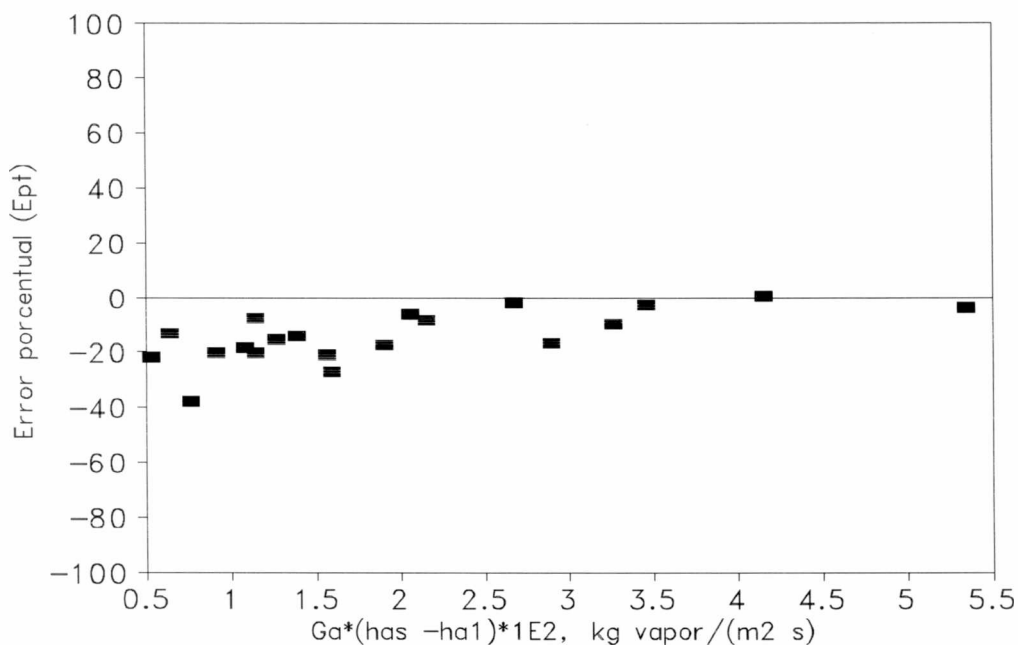


Figura 7.10. Errores porcentuales del tiempo de secado vs el producto de $G_a \cdot (h_{as} - h_{a1})$ (medida de la capacidad de secado del aire). Nota: $1E2 \equiv 1 \times 10^2$

La misma muestra una tendencia bastante definida hacia errores bajos del modelo, a medida que crece la capacidad del aire de retener vapor. Así, para los datos de Warner y Browne (1962), se observa que el modelo predice mejor cuanto mayor es la capacidad de secado del aire. Debe notarse que las corridas que presentan menor producto $G_a \cdot (h_{as} - h_{a1})$ son las que conducen a un mayor tiempo de secado, y se observa que las predicciones son buenas

en las condiciones del secado continuo de trigo con aire caliente: lechos delgados, temperaturas moderadas a altas y caudales de aire razonables (alto producto G_a ($h_{as} - h_{a1}$)).

Predicción del modelo en el interior del lecho

Las Figuras 7.11 y 7.12 muestran datos experimentales y predicciones de humedades de grano versus tiempo para la corrida N° 18 de la Tabla 7.1 a distintas alturas de lecho (z), expresadas como fracción del espesor total (Z_{max}). La Figura 7.11 muestra resultados hasta $1/2 Z_{max}$, esto es de 0 a 0,3 m (espesor típico para el secado de trigo en equipos continuos).

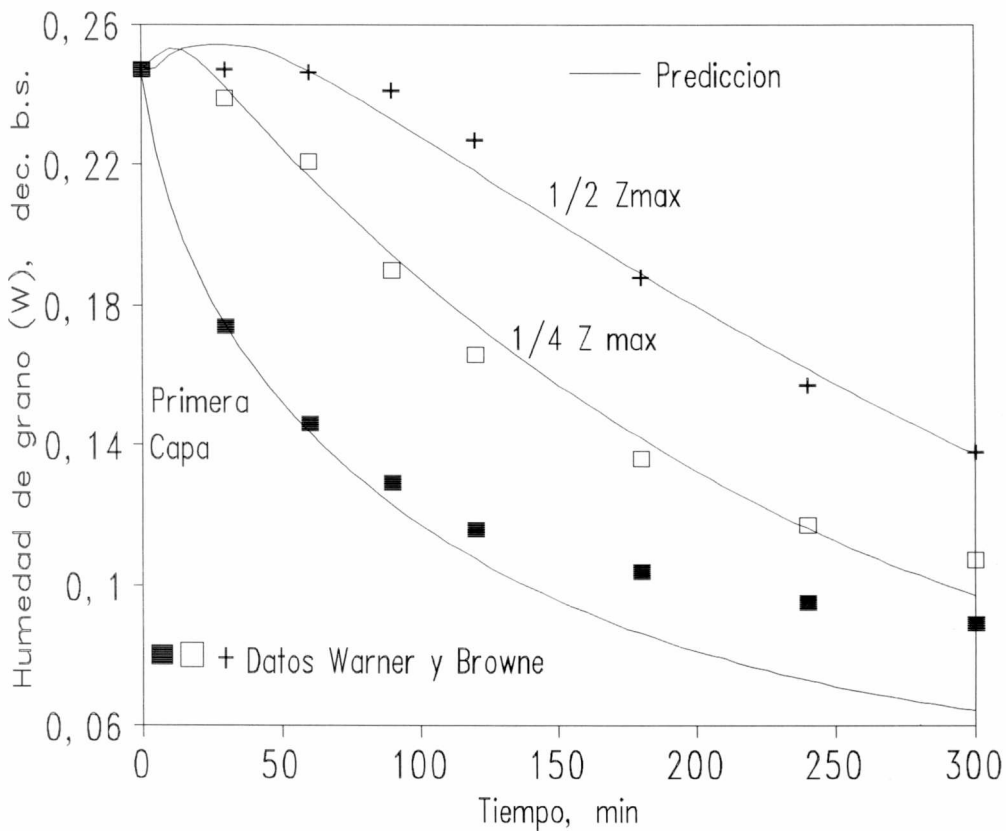


Figura 7.11. Curvas de humedad de grano experimentales y predichas en función del tiempo, para distintas posiciones del lecho entre $z = 0$ y $z = 1/2 Z_{max}$. Datos de corrida 18 de la Tabla 7.1: $T_{a1} = 59,4^{\circ}C$; $G_a = 0,26 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$, $Z_{max} = 0,61$.

Secadoras continuas de trigo

Capas del lecho cercanas a la entrada del aire

La Figura 7.11 muestra para $z \approx 0$, que los datos experimentales se predicen bien hasta el nivel de humedades mínimo cubierto en el desarrollo de la ecuación difusiva del capítulo 6 (0,10 dec., b.s.) o bien dentro de los tiempos utilizados para el ajuste de D a esa temperatura (hasta 120 min). A menores humedades, o mayores tiempos, se predice un secado más rápido de la primera capa. Sun y Woods (1994) han indicado que el valor de los parámetros cinéticos depende de la escala de tiempo de secado en capa delgada empleados en su ajuste, mayormente debido a que el valor de equilibrio asintótico es alto inicialmente y parece cambiar con el tiempo (humedad de equilibrio "dinámica"). Precisamente puede observarse que los datos experimentales a $z \approx 0$ tienden a una asíntota aparente más alta que las predicciones; estas mayores velocidades de secado predichas pueden deberse al uso de humedades de equilibrio (W_e) estáticas (predicha por la ecuación de Henderson-Thompson que, a las bajas h_r de $z \approx 0$, presentarían valores mas bajos que los asintóticos aparentes, determinando una fuerza impulsora mayor.

Curvas medidas a valores mayores de z a lo largo del lecho

La misma figura 7.11 muestra que las curvas a $1/4 Z_{\max}$ y $1/2 Z_{\max}$ se predicen muy bien con el modelo. Para estos valores de z , la humedad relativa del aire es moderada. La predicción indica una rehidratación inicial, debida a la alta humedad relativa acarreada por el aire en su paso por las primeras capas del lecho, cuya velocidad inicial de secado es elevada al principio. Luego, conforme tal velocidad se reduce, el aire llega más seco a $1/4 Z_{\max}$ y $1/2 Z_{\max}$, permitiendo el posterior secado de las mismas.

La Figura 7.12 presenta datos y predicción para las curvas de $3/4 Z_{\max}$ y Z_{\max} . La curva predicha a Z_{\max} es un promedio de los últimos 3 cm del lecho.

Puede verse que el modelo predice muy bien la curva a $3/4 Z_{\max}$, unos 0,45 m desde la base del lecho. En la curva $z = Z_{\max} = 0,61$ m, la predicción es buena inicialmente, pero luego la caída de humedad predicha es más rápida que la observada.

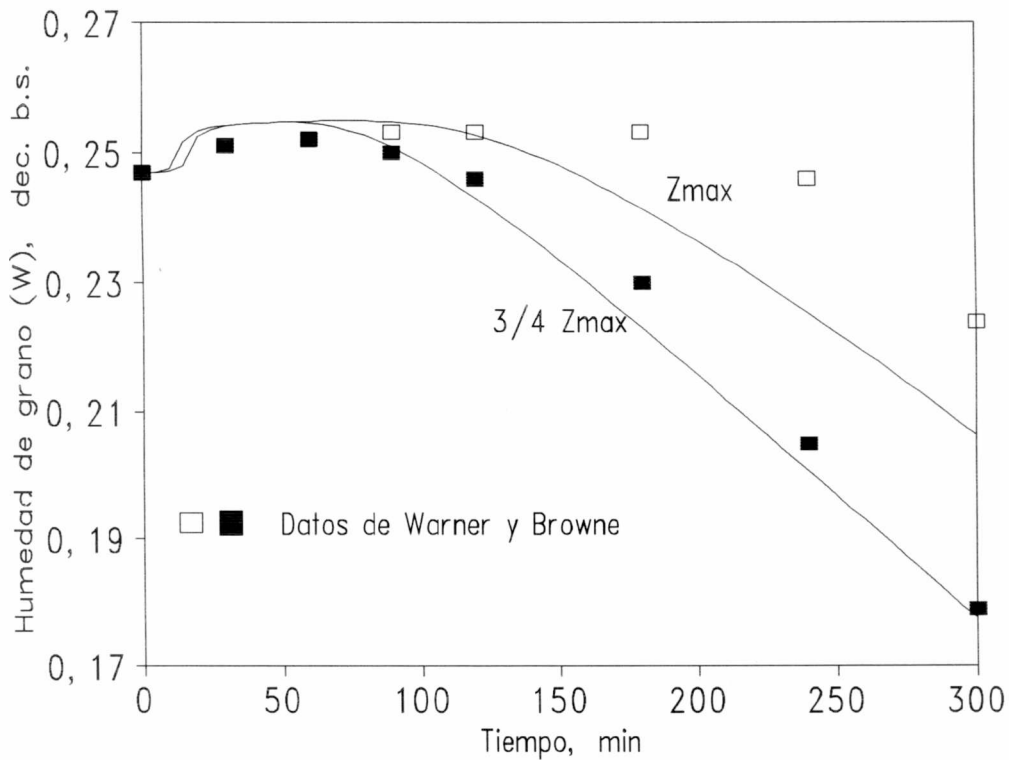


Figura 7.12. Curvas de humedad de grano experimentales y predichas en función del tiempo, para distintas posiciones del lecho entre $z = 3/4 Z_{max}$ y Z_{max} . Datos de corrida 18 de la Tabla 7.1: $T_{a1} = 59,4^{\circ}C$; $G_a = 0,26 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$, $Z_{max} = 0,61$)

Los datos experimentales en $3/4 Z_{max}$ y Z_{max} muestran una rehidratación que se predice muy aceptablemente, haciendo uso de la rutina de condensación. Sin embargo, la desorción posterior en Z_{max} se predice más rápido. Una de las posibilidades es que las humedades de equilibrio predichas a altas h_r hayan sido menores a las reales. Asimismo, es probable que la suposición de que las derivadas dT_a/dt y dh_a/dt son despreciables frente a las espaciales en la resolución numérica pueda no ser válida en esta zona de lechos de gran espesor. De todas maneras, la predicción general del modelo dentro del lecho se considera muy satisfactoria.

Se muestran a continuación curvas predichas para estas condiciones operativas.

Secadoras continuas de trigo

Predicción de humedad y temperatura del grano en función del tiempo y espesor del lecho

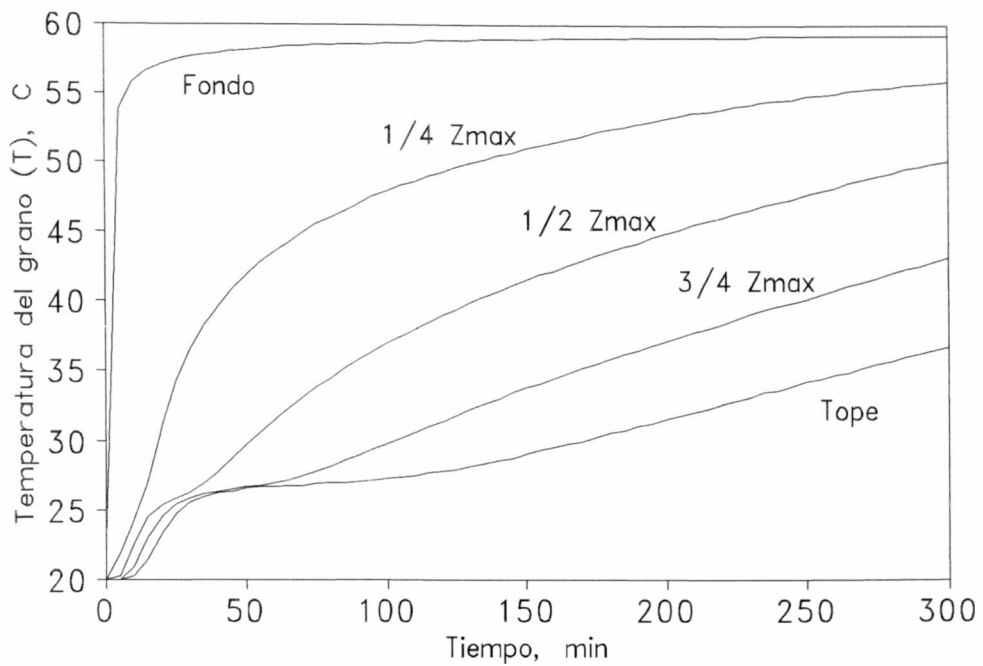
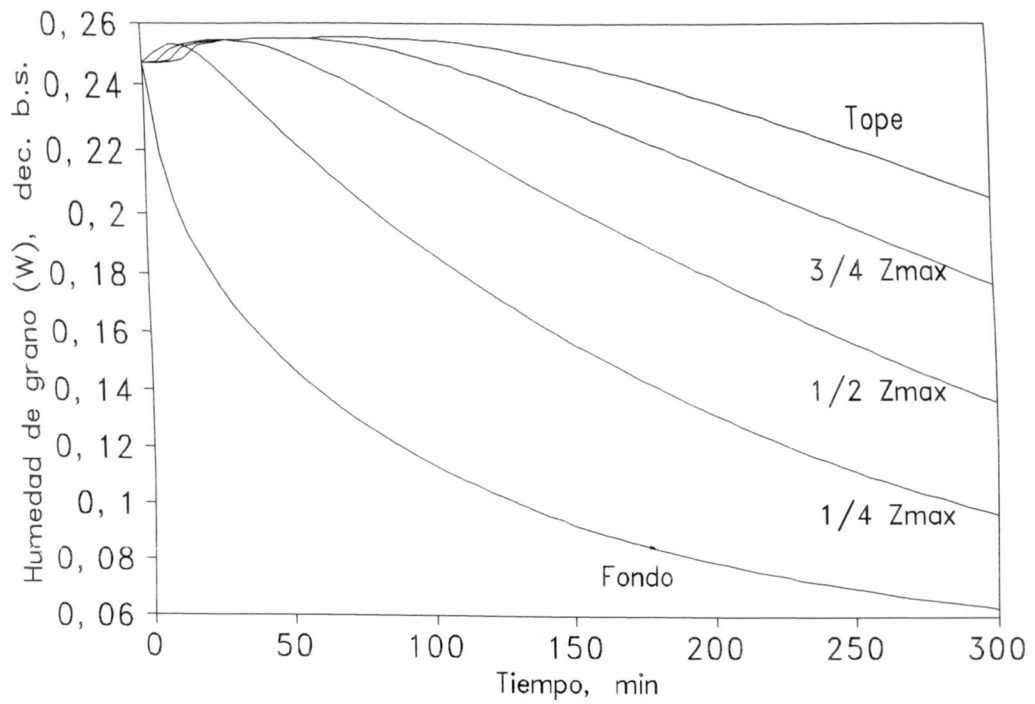


Figura 7.13: predicciones de humedad (gráfico superior) y temperatura de los granos (gráfico inferior) en función del tiempo y z. Condiciones de Figuras 7.11 y 7.12.

El gráfico de humedades muestra que la única curva similar a las de secado en capa delgada es la del fondo ($z \approx 0$), pues es también la única que recibe aire de temperatura y humedad constantes. Para las capas de las posiciones restantes, el aire llega húmedo y frío al principio, razón por la cual la velocidad de secado decrece. La rehumectación se predice primero en las capas no tan alejadas de la entrada del aire, pues son las primeras que enfrentan aire saturado.

Al reducirse la velocidad de secado en las capas cercanas a $z \approx 0$, el aire puede recorrer una distancia mayor hasta saturarse; esto explica la rápida desorción del agua condensada en la capa de $z = 1/4Z_{\max}$ y la readsorción de humedad en las capas más alejadas de la entrada del lecho a tiempos posteriores.

El tope del lecho comienza a secar a los 150 min, es decir transcurre la mitad del tiempo de secado del lecho sin haber perdido humedad. Esta es una de las razones por las cuales no es conveniente utilizar espesores de lecho tan grandes como 0,6 m, aparte de las mayores pérdidas de carga involucradas, que originan altos costos de inversión y de operación de los ventiladores.

Con respecto al gráfico de T vs t , se observa que la capa del fondo del lecho ($z \approx 0$), donde el comportamiento es similar al de una "capa delgada", la temperatura aumenta muy rápidamente hacia la del aire ($59,4^{\circ}\text{C}$) y que el calentamiento de las capas más alejadas demora bastante tiempo más, al recibir aire de menor temperatura durante prácticamente todo el secado.

Un aspecto interesante de la predicción es que la rehumectación inicial en el gráfico superior se traslada al gráfico inferior en bruscos aumentos de temperatura iniciales debido al calor liberado en la condensación del vapor sobre el grano. Al cesar tal fenómeno, las capas más alejadas de la entrada del aire caliente retoman su incremento lento de temperatura con el tiempo.

Secadoras continuas de trigo

La comparación con las 20 corridas experimentales tomadas del trabajo de Warner y Browne (1962) han indicado un buen comportamiento del modelo en casos donde los tiempos de secado son cortos o moderados, como lo que tienen lugar en secadoras de aire caliente, y desvíos, en este caso subestimaciones del tiempo de secado, cuando los tiempos son muy largos.

A continuación se mostrarán comparaciones contra 9 corridas de otros tres trabajos previos en el área de secado de trigo en lecho fijo: Clark y Lamond (1968), Woodforde y Lawton (1965) y O'Callaghan y colab. (1971). Estas permitirán incorporar una mayor diversidad estadística y realizar comparaciones adicionales del comportamiento del modelo, en variables como humedades media del lecho, y temperatura y humedad relativa de salida del aire.

7.6.2.2. Datos de Clark y Lamond (1968), Woodforde y Lawton (1965) y O'Callaghan y colab. (1971)

Los datos de Woodforde y Lawton fueron medidos en lechos de espesor $Z_{\max} = 0,15$ m , los de O'Callaghan y colab. para 0,30 m y los de Clark y Lamond para Z_{\max} de 0,61 y 0,70 m. Los dos primeros trabajos son especialmente importantes pues corresponden al rango usual de espesores de lecho encontrados en la práctica. A su vez, los datos de Z_{\max} 0,6-0,7 permitirán corroborar si los desvíos observados al predecir los datos de Warner y Browne (1962) se mantienen en magnitud y signo.

Las condiciones operativas y tiempos experimentales, así como los valores simulados, se presentan en la Tabla 7.2.

TABLA 7.2: Comparación adicional de tiempos predichos con experimentales de Clark y Lamond (1968) (A), Woodforde y Lawton (1965) (B) y O'Callaghan y colab. (1971) (C)

N°	Condiciones del aire				Condiciones del grano			Tiempo de secado t_s min		Errores %		
	Z_{max} (m)	T_{a1} °C	h_{a1} kg/kg	G_a kg/(m ² s)	Experimental		Predicho		Exp.	Pred. a W_{mf}	E_{pt}	E_{pww}
					W_0 dec., b.s.	W_{mf} dec., b.s.	W_{mfp} a t_s exp. dec., b.s.					
A												
1	0,61	27,2	0,01	0,50	0,330	0,194	0,188	0,188	600	560	-6,6	4,4
2	0,61	32,2	0,01	0,14	0,370	0,160	0,200	0,200	1440	1782	23,8	-19,0
3	0,61	75,0	0,01	0,25	0,470	0,116	0,100	0,100	480	455	-5,2	4,5
4	0,70	64,4	0,01	0,14	0,470	0,102	0,136	0,136	1080	1185	9,7	-9,2
B												
1	0,152	43,3	0,009	0,31	0,245	0,163	0,161	0,161	133	128	-3,7	2,4
2	0,152	65,6	0,009	0,31	0,245	0,115	0,120	0,120	120	128	6,7	-3,8
3	0,152	87,8	0,008	0,31	0,245	0,081	0,076	0,076	120	113	-5,8	3,0
C												
1	0,30	70,0	0,008	0,19	0,367	0,252	0,252	0,252	130	130	0,0	0,0
2	0,30	70,0	0,008	0,19	0,312	0,229	0,225	0,225	110	106	-3,6	4,8

Secadoras continuas de trigo

Comportamiento general de las predicciones vs el tiempo de secado

Los resultados de los errores de la Tabla 7.2 presentan algunas similitudes respecto a los predichos para los datos de Warner y Browne (1962) de la Tabla 7.1, pero también algunas diferencias importantes. Los tiempos de secado de Woodforde y Lawton (corridas B1-B3, $Z_{\max} = 0,152$ m) y de O'Callaghan y colab. (corridas C1 y C2, $Z_{\max} = 0,30$ m), fueron predichos con bajo error, sin tendencia definida, para distintas condiciones de caudal de aire y temperatura. Obsérvese que los tiempos de secado de tales corridas se sitúan entre 100 y 130 min y son representativos de los tiempos de residencia de trigo en secadoras continuas de flujo cruzado (Nellist, 1987). La predicción de los lechos altos de Clark y Lamond en la Tabla 7.2. se realiza aquí con una tendencia menos definida que la observada para los datos de Warner y Browne (Tabla 7.1). Los datos de E_{pt} de la Tabla 7.2 se representan en la Figura 7.14 en función de los tiempos de secado experimentales:

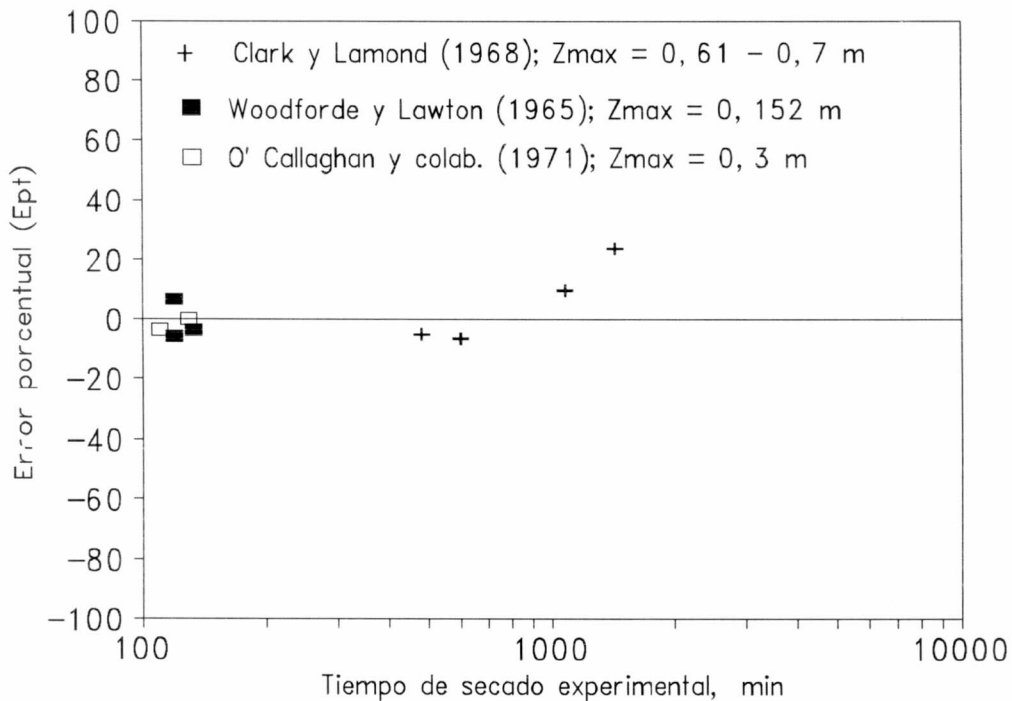


Figura 7.14. Errores porcentuales en los tiempos de secado en función del tiempo de secado experimental, para datos de Clark y Lamond (1968), Woodforde y Lawton (1965) y O'Callaghan y colab. (1971)

La Figura 7.14 muestra un buen comportamiento general del modelo, y otra vez se observa que los desvíos ocurren a tiempos experimentales muy elevados, fuera del interés práctico de secado de trigo en secadoras de aire caliente. Obsérvese que aquí el desvío a tiempos largos cambia de signo respecto a la predicción de los datos de Warner y Browne (Tabla 7.1, Figura 7.3).

En la Figura 7.14, se sobreestima ahora el tiempo de secado en los dos casos de tiempos muy largos. Si bien esto puede indicar que el modelo es más robusto que lo que podría sugerir la comparación con los datos previos de Warner y Browne, el cambio de tendencia a tiempos largos sólo permitiría concluir que los desvíos ocurren a tiempos largos, fuera del rango medido en las corridas de capa delgada del capítulo 6.

Convalidación de las predicciones de distintas variables

A continuación, se realiza una comparación de las predicciones del modelo con datos adicionales correspondientes a las corridas de la Tabla 7.2. Estas incluyen la convalidación de las curvas estimadas de humedad media vs tiempo, humedad de capa superior del lecho, y condiciones del aire de salida como temperatura y humedad relativa.

La gráfica de humedad media del lecho de granos (W_m) vs tiempo para la corrida A-1, se muestra en la Figura 7.15, la cual es aproximada correctamente por el modelo, a pesar de tratarse de un caso de baja temperatura de aire. Spencer (1972) ha indicado que la humedad media del lecho cae linealmente con el tiempo mientras existan capas que no se hayan secado en el tope del lecho. De acuerdo a la Figura 7.15, eso ocurre hasta unos 250 min, y es bien reproducido por el modelo.

Para esta corrida A-1, las curvas experimentales y predichas de temperatura de salida del aire en función del tiempo se muestran en la Figura 7.16.

Secadoras continuas de trigo

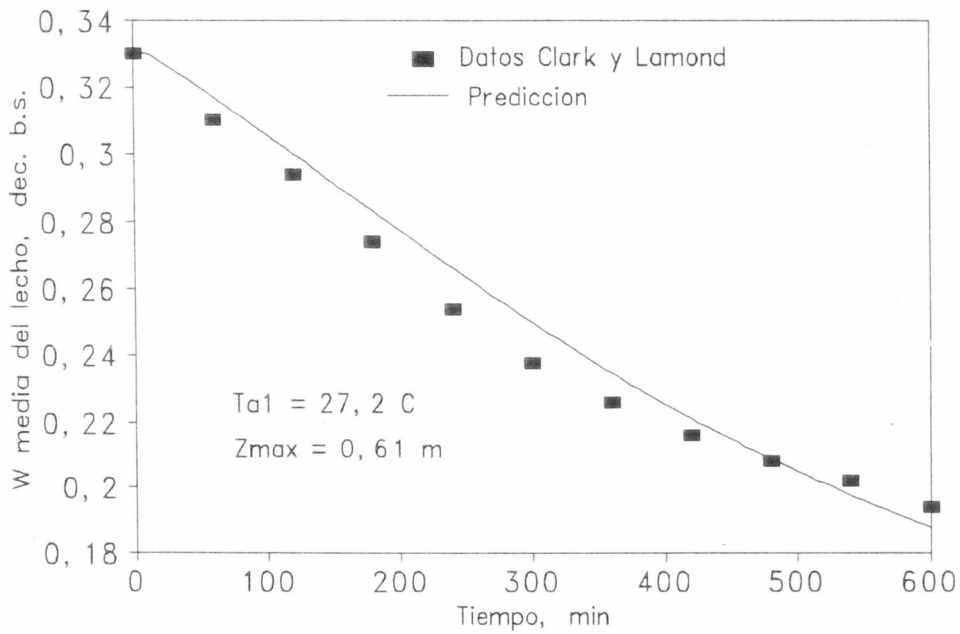


Figura 7.15. Humedad media de grano vs tiempo. Corrida A-1, Tabla 7.2.

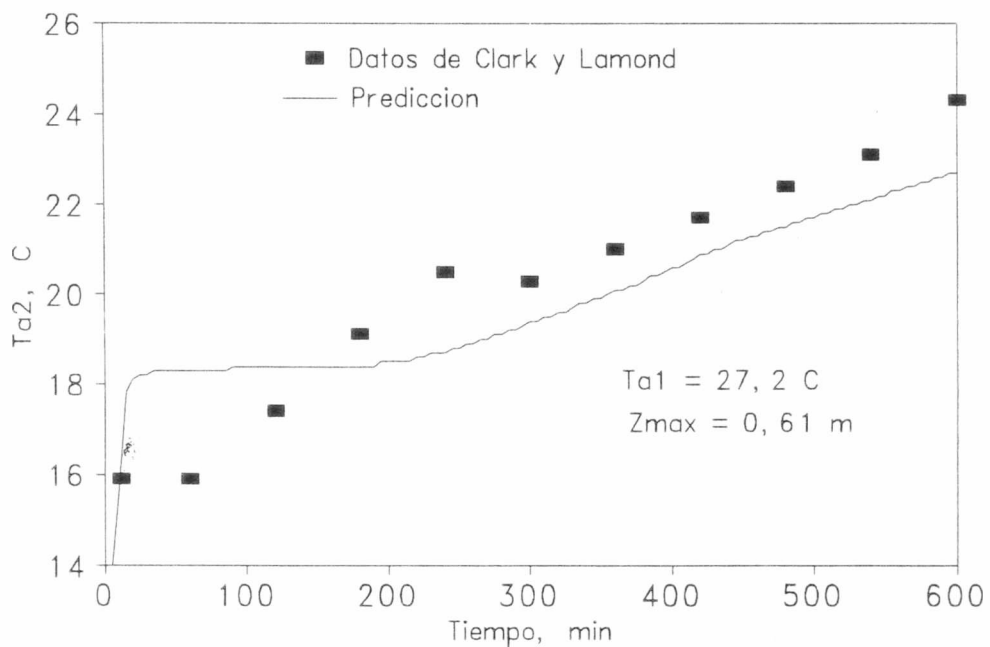


Figura 7.16. Temperatura de salida del aire vs t. Corrida A-1, Tabla 7.2.

Se observa una buena concordancia general, con errores del orden de 1°C. Las predicciones mantienen una temperatura constante del aire (luego de un incremento inicial) hasta los 200 minutos. Con el programa VPAIR (capítulo 3), se confirmó que ese valor corresponde a la temperatura de saturación adiabática del aire de entrada (T_{sa}). Así, mientras las capas superiores permanecen sin secarse (mientras el "frente de secado" (Brooker y colab., 1992) no las alcanza), el aire sale de un lecho alto a la T_{sa} del aire de entrada. A $t > 200$ min, se observa una elevación progresiva de la temperatura de salida del aire, en concordancia con el secado de las capas superiores del lecho mencionadas para la Figura 7.15 y la no linealidad de la caída de W_m con t .

Para la corrida A-3, a una temperatura de aire de entrada de 75°C, la Figura 7.17 presenta datos y predicciones de la humedad media (W_m) y la humedad de la capa superior de granos (W_s) en función del tiempo:

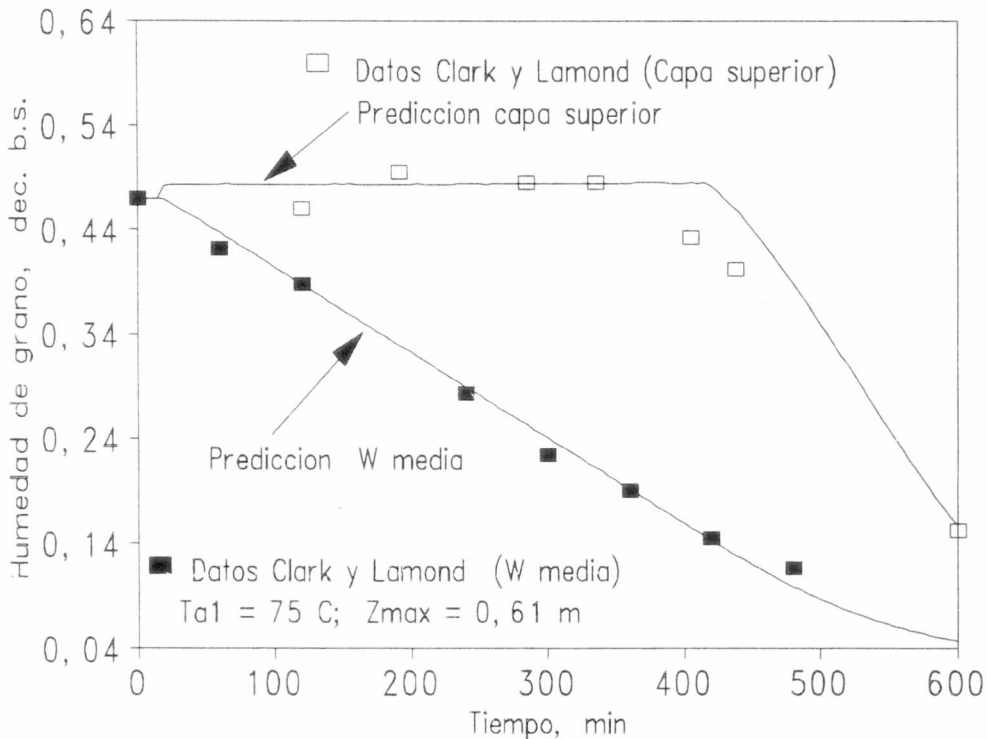


Figura 7.17. Humedad media del lecho y humedad de la capa superior en función del tiempo. Corrida A-3 de la Tabla 7.2.

Secadoras continuas de trigo

La Figura 7.17 muestra una muy buena concordancia de predicciones y datos experimentales no sólo para la W_m sino también para la humedad de la capa superior. Se observa que el tope del lecho comienza a secar luego de 350-400 minutos, período durante el cual la humedad media cae linealmente con el tiempo.

Para la misma corrida A-3, se muestra la predicción de la Temperatura (T_{a2}) (Figura 7.18) y humedad relativa (h_{ra2}) del aire a la salida en función del tiempo (Figura 7.19).

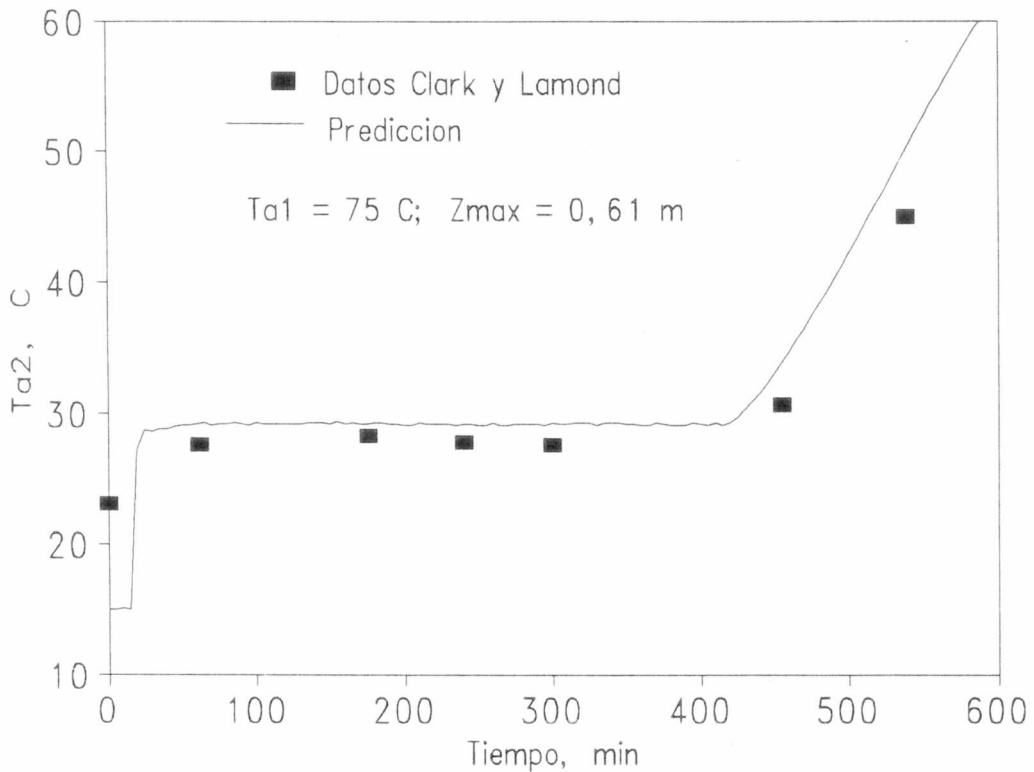


Figura 7.18. Predicción y datos experimentales de temperatura de salida del aire vs tiempo en las condiciones de la corrida A-3

Se observa en la Figura 7.18 una buena predicción de la temperatura de salida, que mantiene un valor constante de $\approx 30^{\circ}\text{C}$ similar a la T_{sa} del aire de entrada, durante los primeros 400 minutos. Esto corresponde a la zona donde W_m cae linealmente con t y la capa superior no se seca. A posteriori, el tope comienza a secarse y la temperatura de salida

aumenta rápidamente con el tiempo. La curva de humedad relativa del aire de salida se muestra en la Figura 7.19.

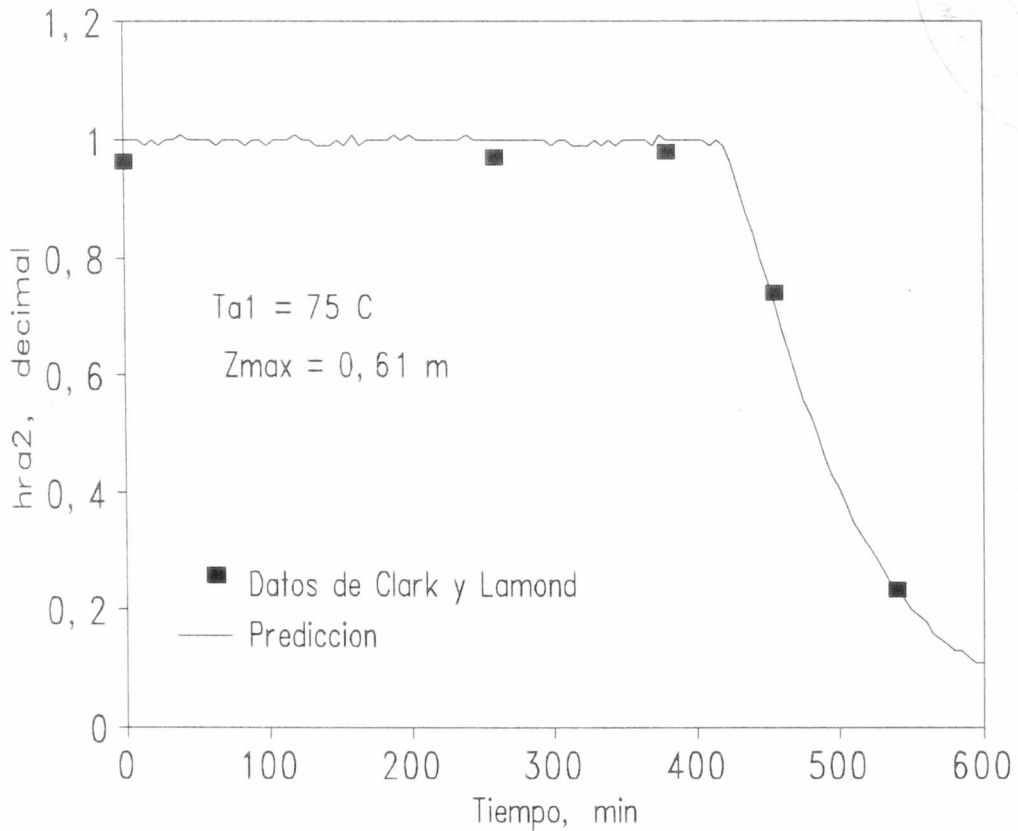


Figura 7.19. Predicción y datos experimentales de humedad relativa del aire a la salida del lecho en función del tiempo, para la corrida A-3.

Se observa que mientras la capa superior de granos no se seca, la humedad relativa del aire de salida, tanto predicha como experimental, se mantiene prácticamente en saturación, lo que es congruente con el hecho de que el aire de salida se mantenga a la T_{sa} . Cuando el tope comienza a secarse, elevando la temperatura de salida del aire, ($t > 400$ min), la h_r del aire de salida comienza a caer rápidamente con el tiempo.

Secadoras continuas de trigo

Como resumen, se indica que el E_{pt} medio (promedio de valores absolutos) fue de 11,3% para la predicción de los datos de Clark y Lamond (1968) (corridas A1-A4, Tabla 7.2), de 5,4% para los de Woodforde y Lawton (1965) (corridas B1-B3) y de 1,8% para las corridas C1 y C2 de O'Callaghan y colab. (1971). El promedio general para estas 9 corridas adicionales fue de 7.2%, que se considera muy bueno.

7.6.2.3. Error porcentual medio de la convalidación de las Tablas 7.1 y 7.2

Considerando los resultados de E_{pt} de la Tabla 7.1. para los datos de Warner y Browne y los de la Tabla 7.2 para datos de Clark y Lamond, Woodforde y Lawton, y O'Callaghan y colab., el error porcentual promedio de 29 corridas fue de 12,1%. El error resulta mucho más bajo en condiciones típicas de secado de trigo con aire caliente.

7.6.2.4. Análisis de las posibles fuentes de desviación del modelo frente a datos experimentales

Realizada una convalidación satisfactoria del modelo con los datos experimentales globales de tiempos de secado y habiéndose comparado las predicciones de diversas variables del lecho y del aire, se discutirán a continuación una serie de causas por medio de las cuales el modelo puede desviarse de los datos experimentales. Se considera que esta enumeración es preferible a asignar causas particulares para las desviaciones de cada corrida, dado que, en cada una de ellas, las desviaciones pueden ser el resultado de varios factores que actúan en conjunto.

Si se asume que la cinética difusiva simplificada con D función de la humedad inicial del grano y de la Temperatura es satisfactoria, y que el error de truncación de la resolución numérica es muy bajo para el tipo de curvas predichas, quedan por mencionar las siguientes causas de posibles desviaciones del modelo.

- Se consideraron despreciables los términos de acumulación dT_a/dt y dh_a/dt frente a los aportes convectivos.

El efecto es esperable en condiciones de alta humedad relativa, especialmente en zonas donde la humedad y la temperatura del aire cambian muy rápido con el tiempo. Sin embargo, en la zona de 0,20-0,40 m de espesor de lecho, con utilización de temperaturas de aire moderadas a altas, típicas del secado en secadoras de granos, la suposición realizada no parece haber introducido errores.

- Uso del modelo en rangos de tiempos mayores que los empleados en el ajuste de parámetros cinéticos por secado en capa delgada.

Este efecto parece ser directo: cuanto más se extrapolan los tiempos de capa delgada, el modelo de lecho fijo tiende a desviarse de los datos experimentales. El hecho de que haya habido subestimaciones del tiempo de secado en Tabla 7.1 y sobreestimaciones en la Tabla 7.2, no permitiría establecer una causa única. Las subestimaciones podrían ser explicadas por la predicción de menores humedades de equilibrio de grano a bajas y altas h_r . Las sobreestimaciones podrían explicarse en el ítem siguiente.

- Condensación de humedad en el grano

En la realidad, toda el agua condensada sobre los granos permanece un tiempo en su superficie y, si no es reevaporada, parte ingresa por difusión. Si las condiciones son tales que la reevaporación es rápida, el agua condensada en la superficie se evaporará con mayor facilidad que la que tenía originalmente el grano. La rutina de condensación, según se considera, da cuenta en forma correcta de la condensación, pero la cinética difusiva de parámetros globalizados atribuye el incremento del contenido de agua a un aumento en la

Secadoras continuas de trigo

humedad media del grano. Así, la desorción del agua condensada puede predecirse más lentamente de lo que podría ocurrir en la práctica. La magnitud del efecto dependerá de la historia de la humedad relativa alrededor de los granos rehumectados, de la magnitud de la condensación en las capas rehumectadas, y de la proporción de lecho en el cual ocurre este fenómeno.

Tamaño de partícula, densidad del grano, porosidad del lecho

La propiedad geométrica de tamaño de partícula tiene un efecto importante sobre la velocidad de secado, a través de las áreas específicas a_v de las ec. (7.22) y (7.23) de cinética difusiva de capa delgada. Siempre que sea posible, debería utilizarse el a_v de la variedad cuyo secado se está simulando.

Las mismas consideraciones valen para la densidad del grano y porosidad del lecho, dado que afectan directamente las ecuaciones de secado (7.4), (7.19) y (7.21). La porosidad es muy importante puesto que, aún para una variedad dada de grano, puede cambiar con el grado de compactación del lecho, que depende a su vez del método de llenado.

**CAPITULO 8. MODELO CINETICO DE PERDIDA DE
GERMINACION DURANTE EL SECADO DE TRIGO CON AIRE
CALIENTE**

CAPITULO 8. MODELO CINETICO DE PERDIDA DE GERMINACION DURANTE EL SECADO DE TRIGO CON AIRE CALIENTE

8.1.INTRODUCCION

8.1.1. Antecedentes y justificación

Uno de los principales desafíos en el secado comercial de granos con aire caliente consiste en llevar a cabo la operación sin causar daño apreciable a la calidad de los mismos. Varios autores han estudiado previamente la relación entre condiciones de secado y calidad de trigo (Lindberg y Sorensson, 1959; Ghaly y colab., 1973 y 1974; Ghaly y Taylor, 1981; Ghaly y Van der Touw, 1982; Nellist 1978, 1980 y 1981; Schreiber y colab., 1981).

En el capítulo 7, se ha visto que es posible modelar las transferencias de calor y materia en un lecho fijo de manera de interpretar el complejo fenómeno de secado. Sin embargo, la optimización del equipo requiere contar con una expresión matemática que relacione un parámetro de calidad, por ejemplo, la viabilidad potencial del grano que está siendo secado, con las variables relevantes. De esa manera se podrán elegir condiciones operativas que establezcan un compromiso entre rapidez de secado, un daño a la calidad bajo o nulo y un limitado consumo de energía por kg de agua evaporada (Schreiber y colab., 1981).

La viabilidad de los granos de trigo, expresada como porcentaje de germinación, ha mostrado ser un parámetro apropiado para observar el efecto del tratamiento térmico en la calidad de los granos (Lupano y Añón, 1986). Nellist (1978) ha indicado que, aún para trigo destinado a molienda, los ensayos de germinación extraídos de muestras secadas marcan un límite superior para el daño a la calidad panadera. Esta última propiedad se expresa como el volumen de piezas panarias de muestras extraídas durante o al final del secado, referido al de una muestra control de trigo secado con aire ambiente (Bruce, 1992). La ventaja de los ensayos de germinación reside en su mayor simplicidad y en el uso de muestras más

Secadoras continuas de trigo

pequeñas. Nellist (1978) indica que si bien el ensayo germinativo puede resultar algo conservador para la calidad panadera, hay un rango de condiciones de humedad elevada (mayor que 0,25 dec., b.s.) para las cuales el daño por tratamiento térmico a la germinación y a la calidad panadera son comparables. En general, se puede establecer que una reducción determinada de germinación marca el comienzo de la reducción en la calidad panadera (Bruce, 1992). Si bien en secadoras se suelen establecer temperaturas de entrada máximas para evitar el daño térmico al trigo, no suele tenerse en cuenta que el valor recomendado es un promedio de una cierta distribución, debida fundamentalmente a que los caudales de aire rara vez son uniformes en la sección de entrada. Por consiguiente, el efecto sobre la calidad del grano resulta, en general, más agresivo que lo que podría estimarse en base a la temperatura media de entrada. Esa mayor agresividad puede tenerse en cuenta empleando un índice más sensible que la calidad panadera, como es el ensayo germinativo o ensayo de viabilidad.

Los factores que afectan la viabilidad de las semillas durante el secado con aire caliente son: la historia previa de la semilla, la humedad y temperatura de los granos, y el tiempo de secado (Roberts, 1960; Nellist, 1978; Schreiber y colab. 1981).

En condiciones de almacenamiento a temperatura y humedad constante de grano, Roberts (1960) propuso que el porcentaje de germinación disminuye con el tiempo conforme a la curva de distribución normal. Nellist (1978) sugirió que el concepto podía aplicarse a los rangos de humedades, temperaturas y tiempos del secado comercial de granos.

El modelo probabilístico debe basarse en una desviación estandar dada por ecuaciones de calentamiento hermético de los granos ("sealed heating equations"). Estos ensayos consisten en sumergir granos envasados en tubos herméticos de aluminio de pequeño diámetro, o bien sachets de aluminio, en un baño termostatzado por un tiempo predeterminado, luego del cual se realiza el ensayo de germinación. Se cubren así un rango de condiciones de humedad (W), temperatura (T) y tiempo (t), las que pueden modificarse de a una por vez.

Sin embargo, estas condiciones (sin evaporación) son diferentes a las del secado, donde W y T varían simultáneamente en el tiempo; así, el empleo de modelos surgidos de ensayos de calentamiento hermético puede no ser apropiado para las condiciones de secado con aire caliente.

Nellist (1978) presentó un método de cálculo en el cual el secado fué considerado como una sucesión de pequeños intervalos de tiempo, cada uno de ellos con un valor constante de temperatura y humedad. La pérdida de germinación en cada intervalo se calculó con la función de distribución normal basada en una desviación típica dada por las ecuaciones de calentamiento hermético.

Otros autores (Schreiber y colab., 1981; Lupano y Añón, 1986) han obtenido modelos cinéticos, basados en datos experimentales de las pérdidas de viabilidad durante el secado.

Schreiber y colab. (1981) determinaron los porcentajes de germinación de muestras tomadas durante el secado de trigo en capa delgada a temperatura de aire constante (que como se ha visto en el capítulo 6, corresponde a condiciones casi constantes de temperatura de grano), y realizaron el estudio para un amplio rango de temperaturas, proponiendo un modelo de orden cero para interpretar los resultados. Estos autores obtuvieron una energía de activación para la caída de germinación de 52000 cal/mol. Las temperaturas del centro de los granos de trigo fueron medidas con termocuplas, un procedimiento invasivo que, aún llevado a cabo con mucho cuidado, resulta poco confiable en un grano pequeño como el trigo. Por otra parte, en secado comercial de granos, los mismos están expuestos a un tratamiento térmico donde no sólo la humedad sino la temperatura, varían continuamente en el tiempo.

Por su parte, Lupano y Añón (1986) estudiaron los efectos del secado en una estufa de convección forzada sobre las propiedades de las proteínas de germen de trigo y el poder germinativo, y, entre otros análisis, correlacionaron el porcentaje de germinación en función del tiempo con un modelo cinético de primer orden para varios casos de temperatura equivalente constante de germen, estimada en forma indirecta a través de ensayos de

Secadoras continuas de trigo

calorimetría diferencial de barrido. Su modelo de primer orden consideró la influencia de la temperatura y el tiempo, no así la de la humedad, sobre la viabilidad del grano, pero resultó ser el punto de partida para el modelo desarrollado en este capítulo.

8.1.2. Objetivos

El primer objetivo de esta investigación fué desarrollar una expresión cinética para estimar la pérdida de viabilidad del trigo durante el secado, en base a datos experimentales medidos en condiciones de disminución continua de humedad del grano y aumento continuo de la temperatura (situación análoga a las de las secadoras reales) y en donde la temperatura de los granos sea medida por una técnica no invasiva.

Otro objetivo, no menos importante que el primero, es que la expresión cinética a obtener sea precisa y versátil, de manera de poder ser implementada junto a modelos de simulación de transferencia de calor y materia de secado (capítulo 7), a fines de posibilitar una predicción continua del potencial germinativo en las capas. Esto permitirá, a su vez, un diseño más cuidadoso de los equipos de secado, realizado en base a condiciones de operación que preserven la calidad del grano.

8.2. MATERIALES Y METODOS

8.2.1. Trigo

Se utilizó trigo pan duro (*Triticum aestivum*) variedad Marcos Juárez-INTA, con humedades de recibo de 0,12 a 0,15 (dec., b.s.). Los granos fueron cultivados en Pergamino, y secados naturalmente en campo para no alterar su calidad.

8.2.2. Preparación de las muestras para el secado

Los granos se humectaron a niveles predeterminados agregando la cantidad necesaria de agua en recipientes. Luego de sellados, los mismos fueron agitados

periódicamente durante 48 h. Las humedades obtenidas, denominadas ahora humedades iniciales del secado, variaron entre 0,24 y 0,33 dec., b.s.

8.2.3. Equipo y técnica experimental de secado

El secado de las muestras se realizó en un lecho fluidizado de escala banco. En este sistema, tanto la humedad como la temperatura del grano se consideran uniformes en el lecho para cada tiempo, debido al alto grado de mezclado. Así, las muestras obtenidas son representativas de todo el lecho (Hoebink y Rietema, 1980; Giner y Calvelo, 1987).

Cuando la altura del lecho está por encima de un valor mínimo, el sistema permite medir la temperatura del grano a través de la temperatura del aire a la salida del lecho, y registrarla en función del tiempo. La temperatura a la entrada del lecho no fue medida.

El lecho fue construido para un trabajo previo (Giner y Calvelo, 1987). Su sección era rectangular, de 0,245 m x 0,322 m, con paredes laterales de vidrio aisladas con paneles de poliestireno expandido. La base del lecho estaba constituida por metal perforado con orificios de 1,5 mm de diámetro en arreglo triangular, dando un área libre del 23%.

El aire fue impulsado por medio de un ventilador centrífugo de 5,5 CV trifásico asincrónico. Se utilizó una velocidad superficial de aire de 1,2 m/s, el mínimo valor que mantenía el lecho en total fluidización y mezclado (Giner y Calvelo, 1987). El aire se hacía pasar a través de un módulo de 7 resistencias eléctricas de 2 kW cada una, que podían conectarse individualmente. A diferencia del trabajo citado, no se utilizó control automático en estas experiencias, y las resistencias podían conectarse progresivamente durante el secado, a fines de proporcionar un tratamiento térmico variable en cada una de las mismas.

Las técnicas de determinación de la temperatura de los granos, humedad y porcentaje de germinación se describen a continuación:

Secadoras continuas de trigo

Medición continua de la temperatura de los granos

En un lecho fluidizado, la diferencia entre las temperaturas de la fase gas y la sólida disminuye abruptamente con la distancia desde la base del lecho debido a la alta velocidad de transferencia de calor (Kunii y Levenspiel, 1969; Hoebink y Rietema, 1980). Si la altura del lecho es suficiente, la temperatura del sólido puede considerarse igual a la que presenta el aire a la salida del lecho.

Para calcular la altura del lecho (Z_{\max}) necesaria para aproximar suficientemente la temperatura del aire de salida a la de los granos, se utilizó el método recomendado por Kunii y Levenspiel (1969). El mismo parte del balance de calor macroscópico-diferencial siguiente en una rodaja de espesor dz del lecho fluidizado:

$$G_a C_{pa} dT_a = h_T a_v (1 - \epsilon) dz (T_a - T) \quad (8.1)$$

Integrando entre la entrada del lecho y la salida, en un instante dado de tiempo, se obtiene:

$$\frac{T_{a2} - T}{T_{a1} - T} = \text{EXP} \left[- \frac{6 h_T (1 - \epsilon)}{G_a C_{pa}} \frac{Z_{\max}}{D_p} \right] \quad (8.2)$$

Para asegurar un valor estimado suficientemente alto de Z_{\max} , se utilizaron tres correlaciones distintas para h_T en lechos fluidizados de partículas grandes: Kunii y Levenspiel (1969); Pandey y Upadhyay (1981) y Vázquez y Calvelo (1983), y se utilizó el valor más bajo. Este fue $h_T = 130 \text{ W/m}^2 \text{ K}$, proporcionado por la correlación de Vázquez y Calvelo a una temperatura de aire de entrada de 70°C y $G_a = 1,2 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$. Usando tales valores en la ecuación (2) junto a $\epsilon=0,385$, $C_{pa} = 1010 \text{ J}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$ y $D_p = 3,2 \times 10^{-3} \text{ m}$, se llega a:

$$\frac{T_{a2} - T}{T_{a1} - T} = \text{EXP} [- 124 Z_{\max}] \quad (8.3)$$

por medio de la cual se pueden tabular la relación entre diferencias de temperaturas en función de Z_{\max}

Tabla 8.1. Relación de diferencias de temperatura aire-grano entre la entrada y salida del lecho fluidizado, en función del espesor total del lecho

Z_{\max} , m	$100 \cdot [(T_{a2} - T)/(T_{a1} - T)]$
0,01	29,0
0,03	2,4
0,05	0,2
0,08	$5,0 \times 10^{-3}$

Se observa que para una altura de lecho de 0,05 m, la diferencia de temperaturas a la salida sería el 0,2% de la existente a la entrada del lecho, lo que sería suficiente precisión. Sin embargo, dado que el método no contempla la transferencia de materia, se seleccionó una altura mayor, $Z_{\max} = 0,08$ m que, como se ve en la tabla, da un margen mayor de seguridad para asumir que T es igual a T_{a2} , la temperatura de salida del aire.

Este espesor Z_{\max} es la altura de lecho no expandido, esto es, antes de fluidizarlo. Los valores usados de $(1-\epsilon) Z_{\max}$ en la ec. (8.2) corresponden ambos a un lecho no expandido, dado que el producto se mantiene constante al fluidizarse el lecho. La altura elegida en el equipo utilizado representa una masa de aproximadamente 5 kg de trigo por experiencia.

La temperatura del aire a la salida, T_{a2} , fué registrada en forma continua con una termocupla de Cu-Ct Omega de respuesta rápida con referencia electrónica, conectada a un registrador potenciométrico Honeywell 196 de dos canales y resolución ajustable al rango de valores de la variable medida.

Determinación del contenido de humedad de los granos

En cada corrida experimental de secado, se tomaron nueve muestras de 20-25 g cada una. De éstas, se separaron 6-8 g para determinaciones duplicadas del contenido de humedad por un método de grano entero: 2 h a 130°C en estufa ventilada. Los valores obtenidos

Secadoras continuas de trigo

(W_{GE}) fueron corregidos a los del método estándar (W) de la AOAC (1980) (grano molido, 1 h a 130°C en estufa ventilada), por medio de la siguiente correlación, obtenida en un trabajo previo (Giner y Calvelo, 1987):

$$W = 0.02793 + 0.9537 W_{GE} \quad (8.4)$$

Determinación del porcentaje de germinación

El procedimiento fué similar al empleado por Lupano y Añón (1986). Los porcentajes de germinación se determinaron a 20°C en cajas de Petri estériles. Para cada muestra, se sembraron dos cajas con 25 semillas cada una, ubicando las semillas entre dos papeles de filtro humedecidos. La siembra se realizó el mismo día del ensayo de secado, y las semillas germinadas se contaron luego de 72 h de sembradas.

8.3.RESULTADOS Y DISCUSION

8.3.1. Datos experimentales medidos

La Tabla 8.2 muestra los datos experimentales medidos en este trabajo. Los mismos corresponden a las historias térmicas, T vs t , las curvas de secado, W vs t , y la variable dependiente, la germinación en función del tiempo, G vs t .

Las corridas realizadas muestran condiciones donde la pérdida de viabilidad fué nula, otras donde la misma fué moderada y otras donde el tratamiento fué drástico. Dada la técnica empleada, no es posible extraer conclusiones directas de la influencia de las historias térmicas y de secado en la germinación, dado que W y T cambian al mismo tiempo, tal como ocurre en una secadora.

Cinética de pérdida de calidad

Tabla 8.2. Datos experimentales tiempos (t), humedades de grano (W), temperaturas de grano (T) y porcentajes de germinación (G)

Unidades: [t]: min, [W]: dec., b.s., [T]: °C, [G]: %. Rango de W: 0,336 - 0,106. Rango de T: 15 - 82,7°C; Rango de G: 100 - 8%.

Corrida 1			Corrida 2			Corrida 3			Corrida 4			Corrida 5					
t	W	T G	t	W	T G	t	W	T G	t	W	T G	t	W	T G			
0	0,278	18,2 92	0	0,262	20,0 92	0	0,326	20,0 96	0	0,316	20,0 100	0	0,310	20,0 98			
2	0,266	37,6 92	3	0,233	48,3 100	3	0,302	45,4 90	2	0,300	40,7 96	2	0,291	39,8 94			
4	0,250	47,3 92	5	0,213	52,0 94	7	0,269	54,5 90	4	0,286	48,3 88	4	0,275	46,2 98			
8	0,228	50,1 96	8,5	0,201	55,0 96	12	0,243	57,6 88	8	0,254	56,6 88	8	0,258	52,4 94			
15	0,204	52,3 88	12,5	0,186	56,6 90	20	0,201	60,7 92	12	0,235	59,2 90	15	0,219	57,6 94			
25	0,184	54,0 90	20	0,170	58,0 90	30	0,172	62,1 88	17	0,210	61,8 84	25	0,193	61,1 96			
40	0,154	55,0 92	31	0,147	59,2 92	46,5	0,148	63,6 90	28	0,177	64,7 84	35	0,168	63,3 96			
55	0,140	55,0 96	40	0,138	59,4 88	58	0,139	64,1 88	40	0,152	66,7 88	45	0,153	64,3 98			
71	0,130	55,7 90	51	0,126	59,8 96	75	0,122	64,6 86	60	0,128	67,6 82	60	0,133	65,3 94			
Corrida 6			Corrida 7			Corrida 8			Corrida 9			Número de juegos de datos t,W,T,G = 81.					
t	W	T G	t	W	T G	t	W	T G	t	W	T G	t	W	T G			
0	0,240	20,0 96	0	0,336	20,0 98	0	0,323	15,0 100	0	0,273	17,0 98	0	0,273	17,0 98	0	0,273	17,0 98
3	0,219	45,9 96	2	0,304	50,1 80	2	0,298	49,8 88	2	0,259	51,5 94	2	0,259	51,5 94	2	0,259	51,5 94
5	0,212	52,0 94	4	0,280	58,1 70	4	0,279	54,5 90	4	0,240	57,9 98	4	0,240	57,9 98	4	0,240	57,9 98
8,5	0,201	55,2 92	7	0,251	63,0 40	7	0,252	58,6 80	7	0,218	62,6 94	7	0,218	62,6 94	7	0,218	62,6 94
12	0,194	56,6 92	10	0,225	63,9 36	10	0,234	61,3 72	10	0,206	64,8 86	10	0,206	64,8 86	10	0,206	64,8 86
16,5	0,181	58,1 100	20	0,177	67,6 22	15	0,210	65,3 66	16	0,179	70,4 86	16	0,179	70,4 86	16	0,179	70,4 86
26	0,158	63,7 92	30	0,153	71,9 30	25	0,174	70,4 52	25	0,151	75,2 62	25	0,151	75,2 62	25	0,151	75,2 62
36	0,142	68,9 92	45	0,122	76,5 16	35	0,148	74,3 36	35	0,129	77,6 62	35	0,129	77,6 62	35	0,129	77,6 62
46	0,126	72,1 96	60	0,107	78,7 8	45	0,126	78,2 34	45	0,109	82,7 44	45	0,109	82,7 44	45	0,109	82,7 44

Secadoras continuas de trigo

Debe indicarse que todos los datos medidos se consideraron como parte del rango de temperaturas, humedades y tiempos cubiertos, esto es, no se consideran solamente los valores finales. Nellist (1981) ha indicado que la pérdida de viabilidad a un tiempo dado no depende de un valor particular de temperatura y/o humedad a ese tiempo sino de la combinación de la historia de humedad (curva de secado) e historia térmica a la que estuvieron expuestos los granos inmediatamente antes de ese tiempo.

8.3.2. Análisis inicial de los Datos Experimentales

Como se puede observar, los datos no permiten identificar la influencia de una variable en particular, pero se encuentra en la corrida 6 que los granos, partiendo de humedades moderadas (0,240), mantienen la viabilidad aún cuando su temperatura final llegó a 72,1°C, donde tenían una humedad de 0,106. A su vez, en la corrida 7 los granos parten de una humedad alta (0,336) y ya al llegar a una temperatura de 60°C el poder germinativo se había reducido de 98 a 40%. Estos datos indican la fuerte interacción humedad-temperatura: cuanto mayor es la humedad del grano, éste se vuelve más sensible a la temperatura y viceversa. Los datos de la corrida 6 se representan en la Figura 8.1, y los de la corrida 7 en la Figura 8.2. En cada Figura, se muestran los datos de Germinación vs tiempo (gráfico superior) y los de W y T vs tiempo (gráfico inferior).

Las tendencias observadas en las Figuras 8.1 y 8.2 en cuanto a la interacción temperatura-humedad están de acuerdo con lo obtenido por Hutchinson (1944): a mayor humedad, la temperatura de comienzo del deterioro es menor. Este autor relacionó empíricamente las variables t , T y W para sus experiencias de calentamiento sellado, con las que, a temperatura y humedad de grano constantes, se obtenía el tiempo de exposición transcurrido antes del "comienzo del deterioro" ("start of damage") o "pérdida completa de la germinación" ("complete kill"). Uno de los inconvenientes de estas expresiones es que no permiten calcular porcentajes de germinación sino los límites inferiores y superiores del daño.

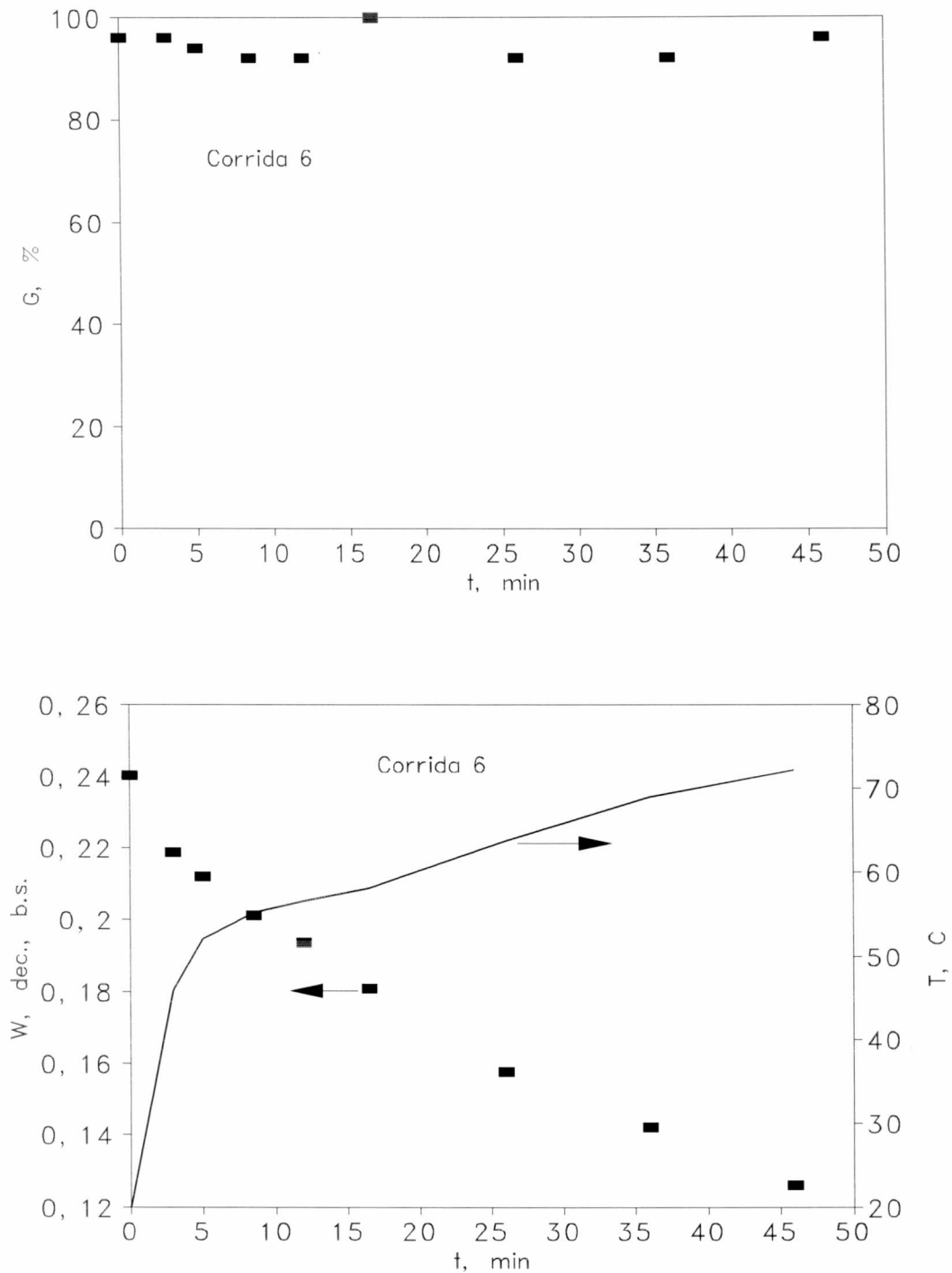


Figura 8.1. Datos experimentales de germinación [gráfico superior], humedad (símbolos) y temperatura del grano (línea) [gráfico inferior], en función del tiempo, para la corrida 6 de la Tabla 8.2.

Secadoras continuas de trigo

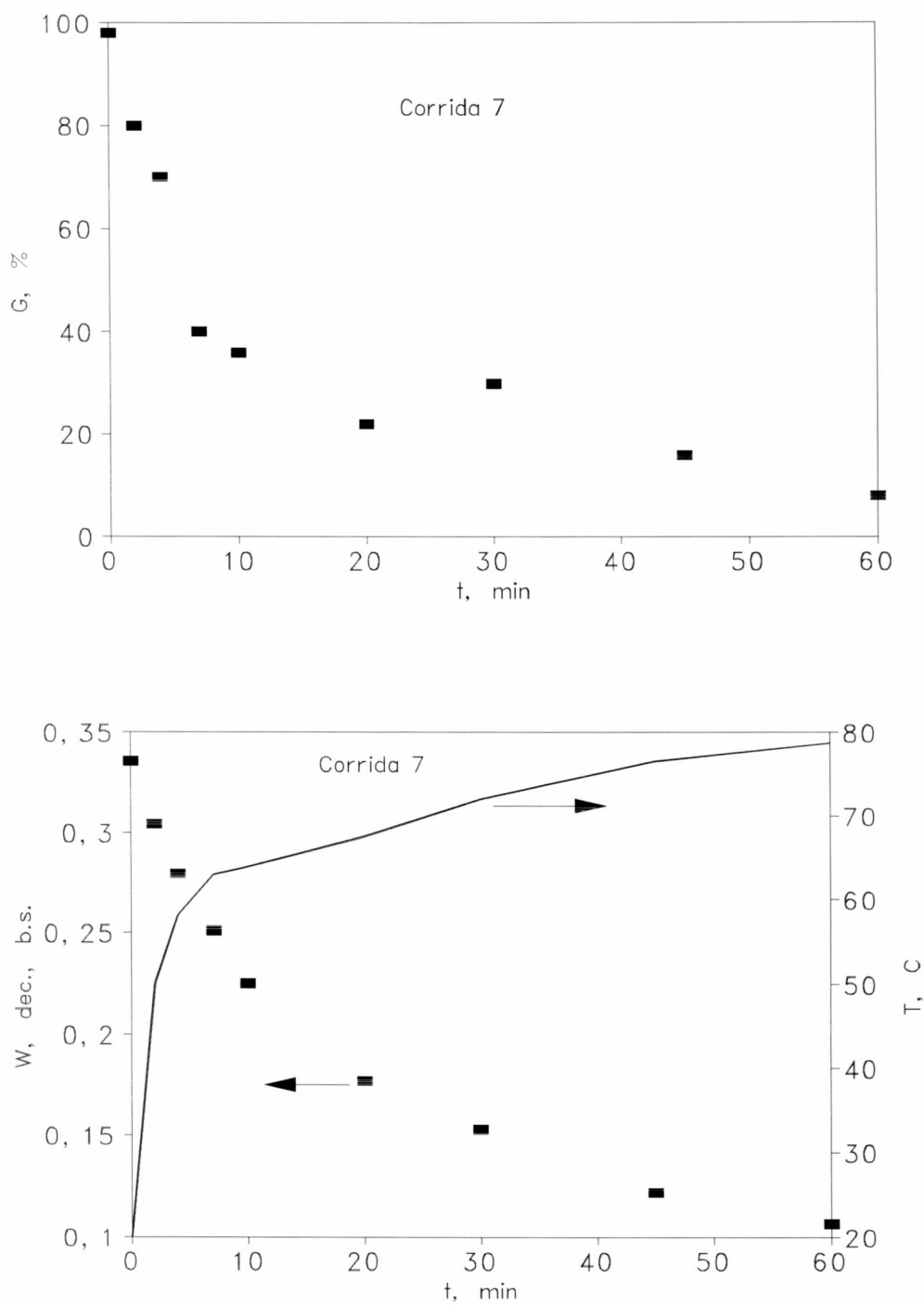


Figura 8.2. Datos experimentales de germinación [gráfico superior], humedad (símbolos) y temperatura del grano (línea) [gráfico inferior], en función del tiempo, para la corrida 7 de la Tabla 8.2

8.3.3. Interpretación del fenómeno de pérdida de germinación

A partir de los datos de las Figuras 8.1 y 8.2, se puede inferir que si todas las semillas se comportaran iguales, el porcentaje de las viables debería caer del valor inicial (idealmente 100) para un tratamiento térmico suave a 0 para un tratamiento térmico severo. Tal situación, efectivamente, puede darse. Sin embargo, los datos indican la existencia de una franja de condiciones de tiempo, humedad y temperatura donde sólo algunas semillas permanecen viables y otras pierden la viabilidad. En consecuencia, el porcentaje de semillas viables se reduce progresivamente conforme el tratamiento térmico se vuelve más severo, no en la forma de un escalón de 100 a 0.

Nellist (1981) ha indicado que la extensión de ese daño parcial presenta una repetibilidad, de manera que puede considerarse una propiedad del sistema. No obstante, indicó que la desviación típica de los porcentajes de germinación en torno al 50% es mucho más alta que para germinaciones altas y bajas.

Roberts (1960) interpretó que la pérdida de germinación a temperatura y humedad constante de almacenamiento varía con el tiempo de acuerdo con la función de distribución normal. Esta ley se verifica en las condiciones de tiempos largos (días, meses, años) de almacenamiento. Nellist (1978) interpretó que la misma ley debía verificarse en las escalas de tiempo de operaciones de secado con aire caliente. Así, luego de cada combinación de tiempo-temperatura-humedad existiría un porcentaje repetitivo de semillas viables, lo cual puede considerarse como una probabilidad fraccional.

Existe una forma alternativa de considerar la germinación, que consiste en hacer una analogía entre la germinación y la concentración de un reactivo para una transformación química. Desde este punto de vista, la germinación se asume, a los propósitos del cálculo, como si fuera un reactivo, cuya velocidad de consumo variará de acuerdo a la intensidad de las condiciones de tratamiento.

Secadoras continuas de trigo

8.3.4. Relaciones matemáticas previas entre condiciones del grano y daño a la viabilidad

Los modelos indicados previamente, y utilizados para evaluar el impacto del tratamiento térmico en la viabilidad, son los siguientes:

8.3.4.1. Ecuaciones de calentamiento hermético (sealed heating equations)

Las ecuaciones de Hutchinson (1944) mencionadas anteriormente, dan la temperatura de "comienzo del deterioro" (T_{cd}) o la de pérdida completa de germinación (T_{pc}) (ambas en °C):

$$\begin{aligned} T_{cd} &= a_{cd} - b \operatorname{Ln} t - c \operatorname{Ln} M_p \\ T_{pc} &= a_{pc} - b \operatorname{Ln} t - c \operatorname{Ln} M_p \end{aligned} \quad (8.5)$$

Los parámetros de Hutchinson citados por Nellist (1978) son $a_{cd} = 112,4$, $a_{pc} = 120,7$, $b = 2,345$ y $c = 19,05$. Dado que b y c son iguales en ambas ecuaciones, la diferencia de temperaturas calculable entre comienzo del deterioro y pérdida completa de germinación será siempre de $120,7 - 112,4 = 8,3^\circ\text{C}$.

En la ec. (8.5) el tiempo (t) (en horas) es el período transcurrido a la humedad constante M_p (% b.h.). Podrá verse que las temperaturas que pueden aplicarse hasta el comienzo del deterioro (T_{cd}) se reducen conforme aumenta el tiempo de exposición a M_p constante o con el aumento de M_p a tiempo constante. Como se puede apreciar, estas expresiones no permiten la predicción del porcentaje de germinación sino el comienzo y el fin del deterioro, respectivamente.

8.3.4.2. Modelo probabilístico

Roberts (1960) ha indicado que la distribución de germinación en el tiempo para un tratamiento térmico de humedad y temperatura constantes puede expresarse según:

$$G = \frac{1}{\sigma \sqrt{2 \pi}} \int_{t=t_0}^{\infty} \text{EXP} \left[-\frac{(t - t_{med})^2}{2 \sigma^2} \right] dt \quad (8.6)$$

donde t_{med} = tiempo medio de exposición para $G = 0,5$ (50%) dado por ecuaciones de calentamiento hermético similares a las de Hutchinson (1944). El valor σ es la desviación típica, definida por Roberts (1960) como: $K_o t_{med}$, donde K_o es una constante específica de la especie considerada.

Si bien la expresión usada por Roberts fue empleada con éxito en condiciones de humedad y temperatura de grano moderadas y aproximadamente constantes durante tiempos prolongados, que son características del almacenamiento de granos, Nellist (1978) propuso un método para adaptar el modelo probabilístico a las condiciones del secado con aire caliente: valores drásticos y cambiantes de temperatura, variaciones simultáneas de humedad y cortos tiempos de exposición. El mismo se basa en la expresión siguiente:

$$\frac{dG}{dt} = - \frac{1}{\sigma \sqrt{2 \pi}} \text{EXP} \left[-\frac{(t - t_{med})^2}{2 \sigma^2} \right] \quad (8.7)$$

Esta expresión puede integrarse numéricamente considerando que el secado está compuesto de pequeños intervalos de tiempo, cada uno de ellos con W y T constantes (Nellist, 1981). En cada Δt , se estima el t_{med} con ecuaciones tipo Hutchinson para las condiciones de temperatura y humedad de granos medias en ese intervalo y el σ , para estimar la variación de la germinación con la ec. (8.7). El nuevo valor de germinación se obtiene de acuerdo a la siguiente expresión:

$$G_{t+\Delta t} = G_t - \frac{dG}{dt} \Delta t \quad (8.8)$$

Las predicciones de un simulador de secadoras de flujo cruzado (Nellist, 1987) han mostrado una menor sensibilidad del modelo probabilístico comparado con las caídas de

Secadoras continuas de trigo

germinación experimentales, lo cual tendió a repetirse en una aplicación reciente, en condiciones de bajas pérdidas de germinación, durante la convalidación de un modelo de simulación de secadoras de flujo mixto (Giner y Bruce, 1998). En el último caso, no obstante, el modelo predijo muy bien una caída de germinación del 50% en condiciones de temperatura elevada. La menor sensibilidad en condiciones moderadas puede provenir de la utilización del σ calculado en base a las ecuaciones de calentamiento hermético, esto es, a que el modelo no se basa en datos medidos en condiciones de secado.

8.3.4.3. Modelo cinético de Schreiber y colab. (1981)

En el trabajo ya mencionado, los autores propusieron una forma diferencial de un modelo cinético de orden n:

$$\frac{dG}{dt} = -k G^n \quad (8.9)$$

donde k resulta función de la temperatura y el contenido de humedad del grano. Empleando el método diferencial de ajuste de la ecuación cinética, los autores encontraron $n = -0,18$, que fué asumido como orden cero.

Como se ha mencionado, Schreiber y colab. emplearon datos de secado en capa delgada, donde la temperatura del grano se mantiene aproximadamente constante, muy similar a la del aire de secado en cada corrida. Por otra parte, el ajuste de los parámetros cinéticos por el método diferencial plantea problemas en virtud de que las derivadas experimentales presentan una correlación más pobre con respecto al tiempo, humedad y temperatura, que la que normalmente se obtiene con el método integral. Esto es especialmente importante en una propiedad biológica como la germinación, cuyos valores presentan cierta oscilación, como puede observarse en los datos de la Tabla 8.2, o en las Figuras 8.1 y 8.2.

Si bien los modelos cinéticos constituyen una forma empírica de tratar el fenómeno

de pérdida de viabilidad, el proceso biológico subyacente es tan complejo que posiblemente esta vía sea por el momento la más apropiada. Por otra parte, es posible que un método integral planteado por intervalos permita mayor confiabilidad que el diferencial en el ajuste de los datos. Con respecto al orden del modelo, se ha informado que la cinética de desnaturalización de proteínas del germen de trigo (asociadas al fenómeno de la pérdida de viabilidad), responde satisfactoriamente a una expresión primer orden (Lupano y Añón, 1986). En consecuencia, se propondrá un ajuste de un modelo de primer orden por intervalos, para interpretar los datos de la Tabla 8.2.

8.3.5. Desarrollo del modelo cinético de primer orden para condiciones variables

Forma preliminar del modelo para humedad y temperatura de grano constantes en el tiempo.

Los datos del porcentaje de germinación (G) como función del tiempo (t, min) se ajustaron a un modelo cinético de primer orden:

$$\frac{dG}{dt} = -k G \quad (8.10)$$

donde k es la constante cinética (min^{-1}). Si la ec. (8.10) se integra entre $t = 0$ y $t = t$, para condiciones constantes, se encuentra la expresión siguiente:

$$G = G_0 \text{Exp} (- k t) \quad (8.11)$$

que indica una caída exponencial de G con el tiempo, siendo la pendiente más abrupta cuanto mayor es la viabilidad del grano. Este modelo podría plantearse para ensayos de calentamiento hermético, donde tanto W como T son constantes el tiempo, ajustar luego "k" en cada una de ellas y luego representarla en función de la temperatura a varias humedades de grano, para hallar la funcionalidad de k con T y W. Sin embargo, esta forma de ajuste indirecto de dos pasos no puede plantearse en las condiciones cambiantes de W y T con t que

Secadoras continuas de trigo

ocurren en el secado (ver datos de la Tabla 8.2), lo cual hace necesario adaptar el modelo de primer orden a dichas condiciones.

Forma del modelo cinético para humedad y temperatura de grano variables en el tiempo.

Para un intervalo Δt , suficientemente corto como para considerar valores medios constantes de $W = W_m$ y $T = T_m$, el modelo cinético de primer orden, resulta:

$$G_{t+\Delta t} = G_t \text{Exp} (- k \Delta t) \quad (8.12)$$

Dado que la variación simultánea de W_m y T_m de un intervalo de tiempo al siguiente no permite ajustar primero k y luego observar su variación con tales variables, se deben asignar funcionalidades asumidas "a priori" (método directo de ajuste). Teniendo en cuenta los resultados de Lupano y Añón (1986), se puede proponer que k dependa de T_m por medio de una función tipo Arrhenius:

$$k = Z \text{Exp} \left(- \frac{E_{aq}}{R (T_m + 273.16)} \right) \quad (8.13)$$

donde Z , factor preexponencial (min^{-1}), puede escribirse de la siguiente forma (Lupano y Añón (1986)):

$$k = \text{Exp} \left(- \frac{E_{aq}}{R (T_m + 273.16)} + \text{Ln } Z \right) \quad (8.14)$$

donde E_{aq} es la energía de activación para la pérdida de viabilidad durante el secado con aire caliente (cal/mol), siendo R la constante de los gases en cal/(mol K).

En cualquiera de las dos formas presentadas por la ecuación tipo Arrhenius puede verse que la constante cinética k se incrementará para valores crecientes de Z y decrecientes de E_{aq} . De los resultados experimentales de la Tabla 8.2, se ha concluido que, por encima

de un cierto umbral, la caída de germinación se vuelve más rápida para valores crecientes de la humedad y la temperatura.

En este sentido, se ha visto que los granos húmedos son muy termosensibles aún a valores moderados de la temperatura, mientras que los granos muy secos pueden ser calentados a temperaturas altas sin sufrir mayores pérdidas de viabilidad.

Así, se asumió que el efecto de la humedad en la viabilidad podía interpretarse de la manera siguiente:

$$\ln Z = z_1 + z_2 W_m \quad (8.15)$$

donde z_1 y z_2 son constantes a ser determinadas.

La funcionalidad con W_m se restringió al factor preexponencial puesto que los ajustes preliminares del modelo indicaron una ausencia de funcionalidad de E_{aq} con W_m en el rango de humedades cubierto por este trabajo. La funcionalidad preliminar asignada a la energía de activación había sido $E_{aq} = e_1 + e_2/W_m$, y el valor obtenido de e_2 fue tal que el efecto del segundo sumando era importante sólo cuando W_m tendía a 0, esto es, fuera del rango experimental.

En consecuencia, los parámetros de ajuste del modelo resultan: E_{aq} , z_1 y z_2 .

Si ahora las ecs (8.14) y (8.15) se sustituyen en la (8.12), se obtiene la forma final del modelo cinético de primer orden a ser ajustado a condiciones variables:

$$G_{t+\Delta t} = G_t \text{EXP} \left[- \text{EXP} \left(- \frac{E_{aq}}{R (T_m + 273.16)} + z_1 + z_2 W_m \right) \Delta t \right] \quad (8.16)$$

Para aplicar la ecuación (8.16) a los datos experimentales de la Tabla 8.2, los mismos se reordenaron en la forma, Δt , W_m , T_m , G_t y $G_{t+\Delta t}$. Los valores de T_m y W_m se consideraron medias aritméticas de los datos correspondientes a los tiempos t y $t + \Delta t$.

Secadoras continuas de trigo

8.3.6. Ajuste del modelo cinético a los datos experimentales

El ajuste de la ec. (8.16) a los datos mencionados fue realizado por medio del software estadístico SYSTAT (Wilkinson, 1990), minimizando la suma de los cuadrados de las desviaciones entre germinaciones predichas y observadas. El programa indicado emplea un método iterativo tipo Quasi-Newton para resolver un sistemas de ecuaciones no lineales

Los valores de los parámetros obtenidos fueron:

Tabla 8.3. Parámetros de ajuste del modelo de pérdida de viabilidad

Parámetro	Valor	Error estándar	r^2	s_y
E_{aq}	$116,4 \times 10^3$ cal/mol	$17,5 \times 10^3$ cal/mol	0,934	5,6%
z_1	$152,6$ min ⁻¹	$23,9$ min ⁻¹		
z_2	$80,1$ min ⁻¹ /(kg/kg)	$10,1$ min ⁻¹ /(kg/kg)		

El coeficiente de correlación no corregido fué de 0,996, siendo el corregido el que se muestra en la Tabla 8.3. La desviación típica de la estima (s_y), medida del error del modelo en unidades de G, es razonablemente baja: 5,6% de germinación. Teniendo en cuenta las oscilaciones de la propiedad biológica, que no fueron suavizadas, puede decirse entonces que la combinación del modelo de primer orden con la función de Arrhenius modificada para tener el cuenta el efecto de la humedad, ha sido apropiada.

Puede verse que la energía de activación es muy elevada, unas 15 veces mayor que el valor obtenido para la cinética de secado. Esto indica que la pérdida de germinación, por encima de un cierto umbral, depende de la temperatura en una forma mucho más pronunciada que la velocidad de secado. Se observa, asimismo, que la funcionalidad con la humedad también es considerable puesto que siendo el Ln Z una función lineal de W_m , la dependencia de Z con la humedad es una exponencial creciente. Por ejemplo, a $T_m = 70^\circ\text{C}$ y $W_m = 0,25$ dec., b.s., el grupo $E_{aq}/(R (T_m + 273,16))$ vale 170,2, mientras que $z_1 + z_2 W_m$ alcanza 172,6, lo que muestra que la importancia de T_m y W_m es comparable en esas condiciones.

Lupano y Añón (1986) obtuvieron una energía de activación (E_{aq}) de 98300 cal/mol durante el tratamiento térmico de germen de trigo por DSC e indicaron que las E_a correspondientes a la desnaturalización térmica de proteínas varía de 40800 (tripsina) a 129000 cal/mol (ovoalbúmina). En consecuencia, el valor de E_{aq} obtenido en la Tabla 8.3 (116400 cal/mol), es comparable al obtenido por los autores previos para proteínas de germen y cae dentro del rango citado para proteínas.

8.3.7. Método del tiempo fraccional

Además del modelo cinético desarrollado (ec. (8.16)), se utilizará otro método para predecir la severidad del tratamiento. El mismo fué descrito por Nellist (1978) y está basado en la ecuación de calentamiento hermético de Hutchinson (1944) (ec. (8.5)). Si en la versión de "comienzo del deterioro" de tal ecuación se despeja el tiempo y se lo expresa en minutos, se obtiene:

$$t_{cd} = 60 \text{ EXP} \left[\frac{a_{cd} - T - c \text{ Ln} \left(100 \left[\frac{W}{1 + W} \right] \right)}{b} \right] \quad (8.17)$$

donde ahora la humedad se expresa como decimal, b.s. El valor t_{cd} (min) sería el tiempo de exposición máximo permisible antes de que comience el deterioro de un grano que mantuvo la humedad en el valor W y la temperatura en el valor T durante ese tiempo.

Nellist (1978) ha indicado que la ec. (8.17) podría aplicarse a las condiciones cambiantes de humedad y temperatura que tienen lugar en el secado, considerando las curvas como una sucesión de escalones de anchura Δt , en cada uno de los cuales la humedad y temperatura presentan un valor medio constante W_m y T_m , respectivamente, esto es, un criterio similar al usado para integrar el modelo cinético (ec. (8.16)). Si en cada una de estas condiciones de W_m y T_m se aplicara la ecuación de Hutchinson (ec. (8.17)), se calcularía el tiempo máximo $t_{cd}(W_m, T_m)$ al que podría estar expuesto el grano a las condiciones de ese intervalo. Dividiendo el intervalo Δt por ese tiempo máximo, se estaría calculando la fracción

Secadoras continuas de trigo

del tiempo permisible. Repitiendo el procedimiento para todos los Δt y sumando las fracciones, el método indicará la posible existencia de daño cuando la sumatoria exceda la unidad. Dado que el método no calcula viabilidad, resultaría un indicador cualitativo de la presencia o ausencia de daño al poder germinativo de las semillas

La expresión matemática que representa este método sería:

$$\int_0^{t_{\max}} \frac{dt}{t_{cd}(W_m, T_m)} = 1 \quad (8.18)$$

que debe integrarse en forma aproximada como una sumatoria :

$$\sum_0^{t_{\max}} \left[\frac{\Delta t}{t_{cd}(W_m, T_m)} \right] = 1$$

Donde

(8.19)

$$t_{\max} = \sum_0^{t_{\max}} \Delta t$$

En consecuencia, t_{\max} es el tiempo máximo permisible de tratamiento, equivalente al t_{cd} pero aplicado en condiciones cambiantes de humedad y temperatura del grano. La técnica recién expuesta se denominará "método del tiempo fraccional", y el valor de la sumatoria será notada como "Ft".

8.3.8. Comparación de datos predichos y experimentales

Las Figuras siguientes muestran gráficos de G vs t para los datos experimentales y predicciones del modelo cinético y también, en un eje "y" secundario, las predicciones del "tiempo fraccional" Ft vs t (gráficos superiores). Los gráficos inferiores mostrarán los datos experimentales de las historias térmicas y de secado, T vs t y W vs t.

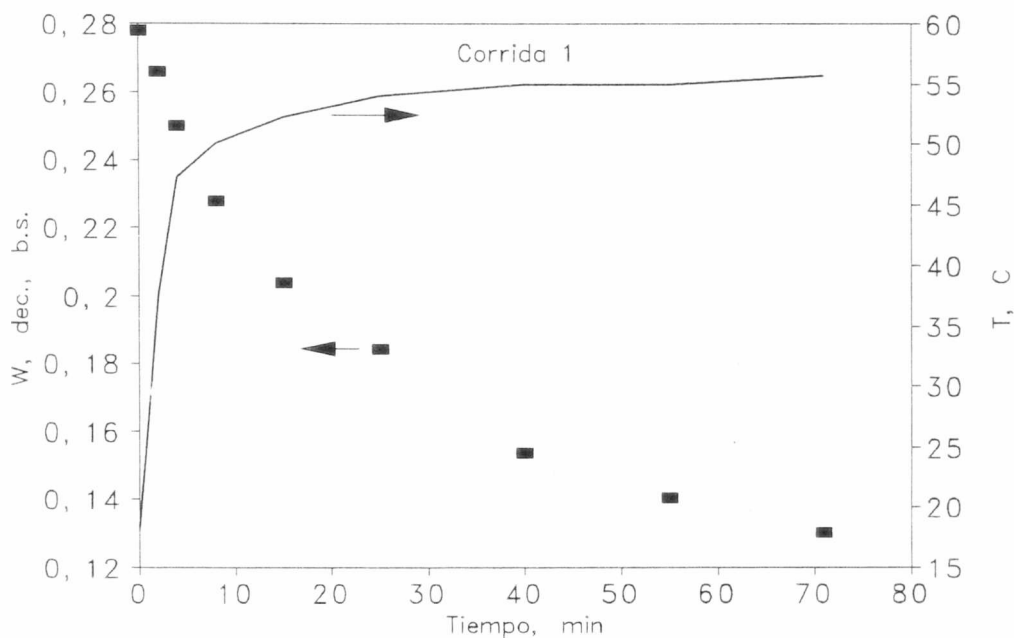
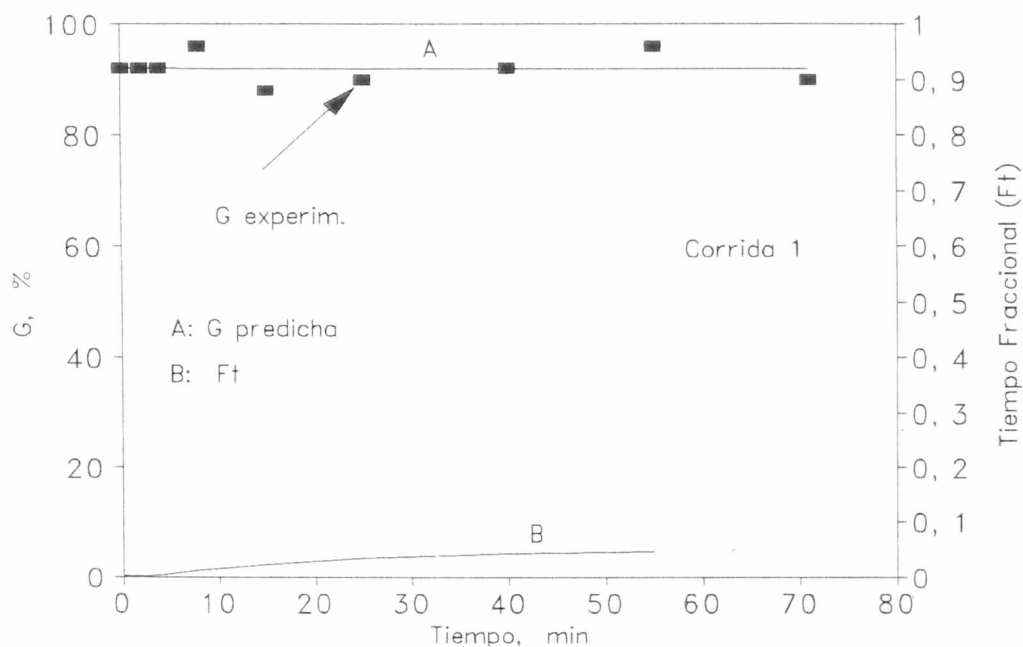


Figura 8.3. Corrida 1 de la Tabla 8.2. Datos experimentales de G y predicciones del modelo cinético (ec. (8.16)) y del método del tiempo fraccional (ec. (8.19)) (gráfico superior) en función del tiempo, para las historias térmicas y de secado experimentales (gráfico inferior)

Secadoras continuas de trigo

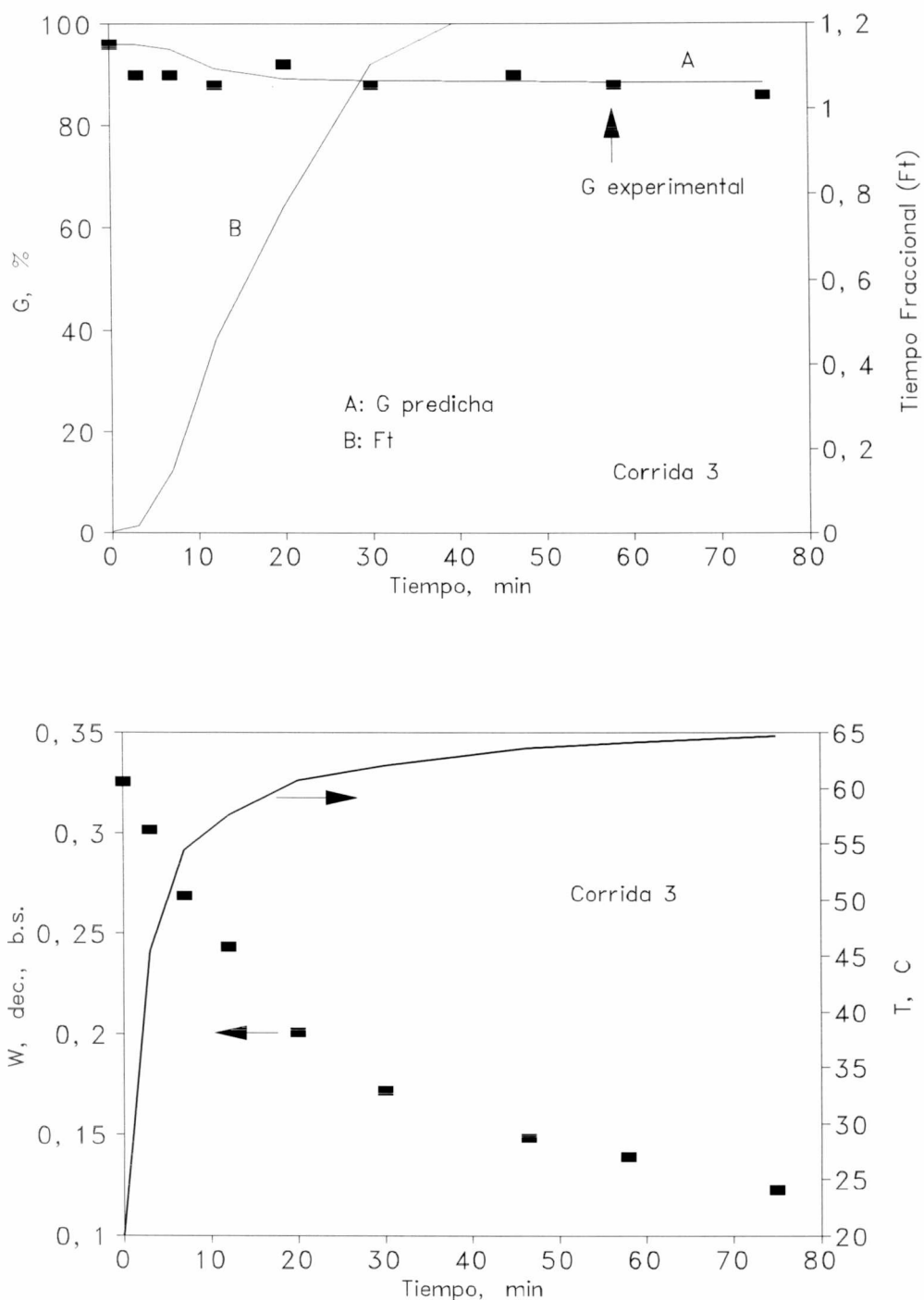


Figura 8.4. Corrida 3 de la Tabla 8.2. Datos experimentales de G y predicciones del modelo cinético (ec. (8.16)) y del método del tiempo fraccional (ec. (8.19)) (gráfico superior) en función del tiempo, para las historias térmicas y de secado experimentales (gráfico inferior)

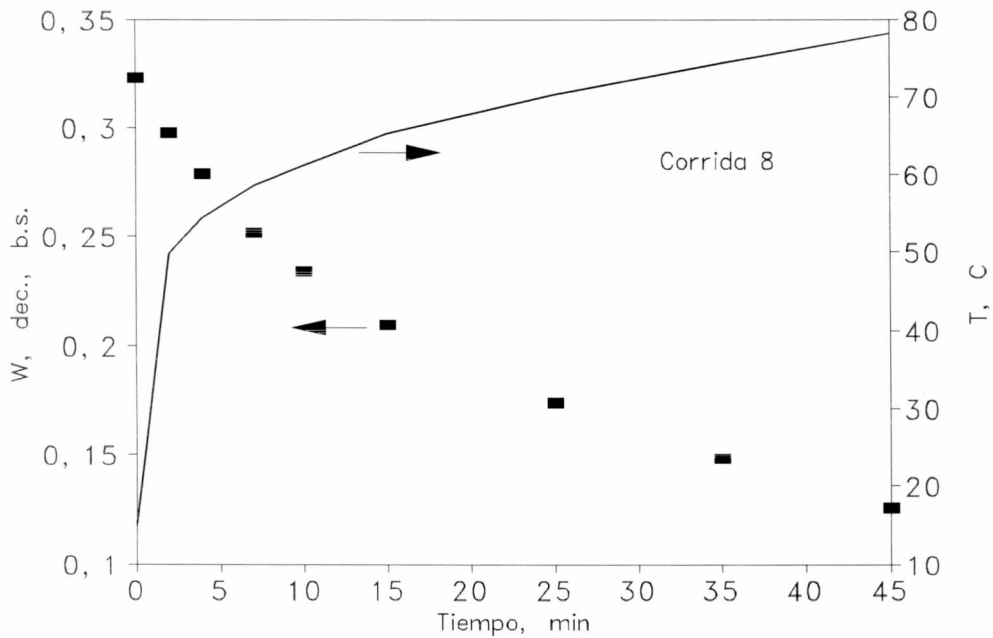
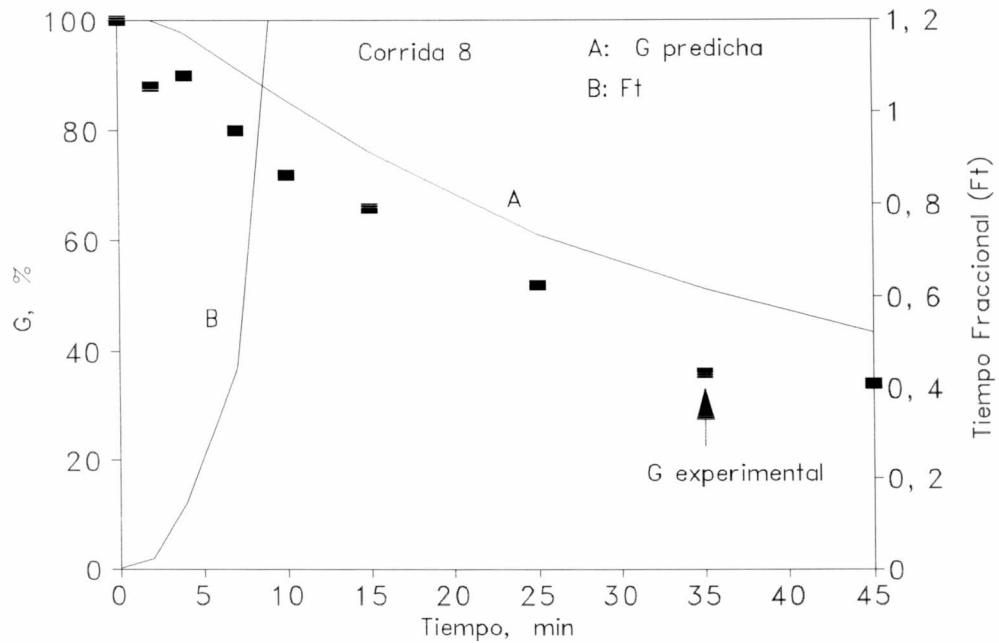


Figura 8.5. Corrida 8 de la Tabla 8.2. Datos experimentales de G y predicciones del modelo cinético (ec. (8.16)) y del método del tiempo fraccional (ec. (8.19)) (gráfico superior) en función del tiempo, para las historias térmicas y de secado experimentales (gráfico inferior)

Secadoras continuas de trigo

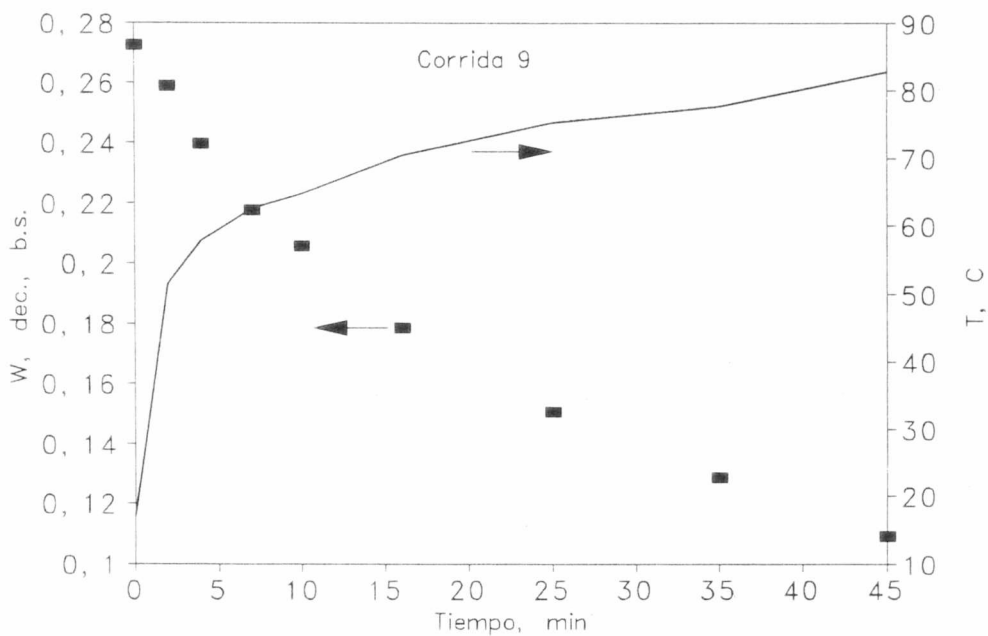
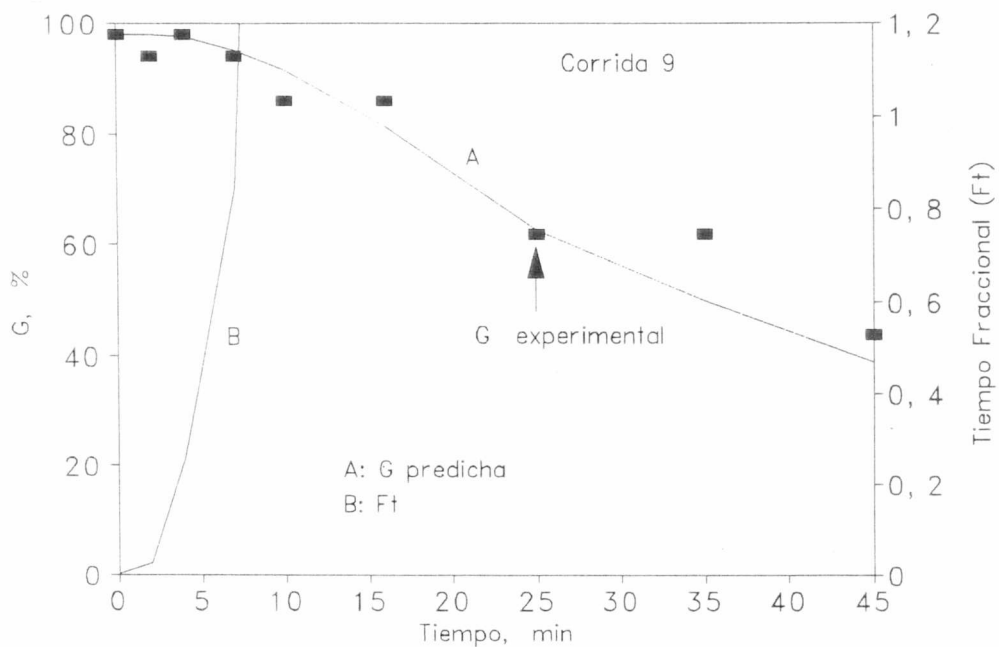


Figura 8.6. Corrida 9 de la Tabla 8.2. Datos experimentales de G y predicciones del modelo cinético (ec. (8.16)) y del método del tiempo fraccional (ec. (8.19)) (gráfico superior) en función del tiempo, para las historias térmicas y de secado experimentales (gráfico inferior)

Para la Corrida 1 (Figura 8.3), la germinación experimental no fué alterada y el modelo cinético no predice ninguna caída. En cuanto al tiempo fraccional, la sumatoria resultante alcanza valores bien por debajo de 1, lo cual no indica daño. Esta es una corrida donde, evidentemente, no se produjo la interacción tiempo-temperatura-humedad suficiente como para provocar daño a los granos. La temperatura final del grano fue de unos 55°C.

En cuanto a la Corrida 3, donde la germinación experimental decrece alrededor de un 10% de principio a fin, el modelo cinético predice muy bien esa caída, y el modelo de tiempo fraccional llega a una sumatoria de 1 a un tiempo de 30 min, donde la germinación ya había caído algunos puntos porcentuales. Obsérvese que la escasa caída de la germinación se produjo al principio del secado, por la coexistencia de temperaturas de más de 50°C con humedades de grano de más de 0,25 dec., b.s. El aumento posterior de temperatura de 6°C no tuvo efecto sobre el grano ya más seco. En consecuencia, el modelo desarrollado vuelve a dar una buena medida cuantitativa de la pérdida de viabilidad mientras el método del tiempo fraccional permite obtener una medida cualitativa satisfactoria.

Los resultados de germinación de la Corrida 8 muestran un tratamiento térmico severo de principio a fin: al inicio coexistieron temperaturas mayores de 50°C con humedades mayores que 0,27 dec., b.s., mientras que hacia el final, se tuvieron bajas humedades, pero con altas temperaturas de grano (valor máximo 78,2°C). El modelo cinético dió una medida muy buena de la rapidez de pérdida de viabilidad excepto en los primeros minutos, donde fué un poco menos sensible que los datos. De todas maneras, la predicción del valor final de germinación fue aceptable. Para esta corrida, el método del tiempo fraccional resultó, asimismo, un tanto menos sensible al comienzo, alcanzando la unidad cuando la germinación ya había caído de 100 a 85%.

Con respecto a la Corrida 9, se puede observar que la caída de germinación total es de un orden similar a la de la Corrida 8, pero con una diferencia: en la Corrida 9, la caída inicial de germinación es lenta pues las altas humedades iniciales no fueron acompañadas por temperaturas demasiado elevadas. Esto ocurrió en los primeros 10 minutos. Luego, la

Secadoras continuas de trigo

interacción comenzó a ser severa, pues la temperatura siguió aumentando hasta más de 80°C al final y la germinación comenzó a caer a un ritmo aproximadamente constante. La predicción cuantitativa del modelo cinético, teniendo en cuenta la variabilidad biológica, fue muy buena. También se considera aceptable la indicación cualitativa del tiempo máximo de exposición, donde la sumatoria del tiempo fraccional alcanzó la unidad para una reducción de germinación un poco mayor al 10%.

8.3.9. Predicciones del efecto de la humedad y la temperatura del grano en la constante cinética de primer orden

La Figura 8.7 muestra la influencia de la humedad y temperatura del grano en la constante cinética k del modelo de primer orden (ec. (8.12)), que representa la velocidad específica de pérdida de viabilidad. Debe destacarse que si bien este modelo fué ajustado por el método directo, a partir de curvas de temperatura y humedad no constante con el tiempo, el mismo, una vez ajustado, puede usarse como se ve en la Figura 8.7 para representar el efecto estimado de la temperatura y humedad en forma separada.

Para cada una de las curvas de humedad de grano constante, la velocidad de deterioro se incrementa abruptamente por encima de una cierta temperatura, lo que refleja el alto valor de la energía de activación (E_{aq}). Por otro lado, un incremento de la humedad del grano desplaza este efecto hacia temperaturas menores, mostrando que el trigo se vuelve mucho menos resistente a la pérdida de viabilidad conforme aumenta su contenido de agua.

Las temperaturas para las cuales el valor de k comienza a crecer drásticamente son indicativas de los valores que no deben sobrepasarse para cada contenido de humedad; sin embargo, no pueden recomendarse valores fijos puesto que se ha demostrado en este capítulo que la pérdida de viabilidad luego de un tratamiento térmico de duración "t", depende de las historias térmicas y de secado inmediatamente previas a ese tiempo. Más aún, las características de las curvas térmicas y de humedad dependerán del tipo de secadora.

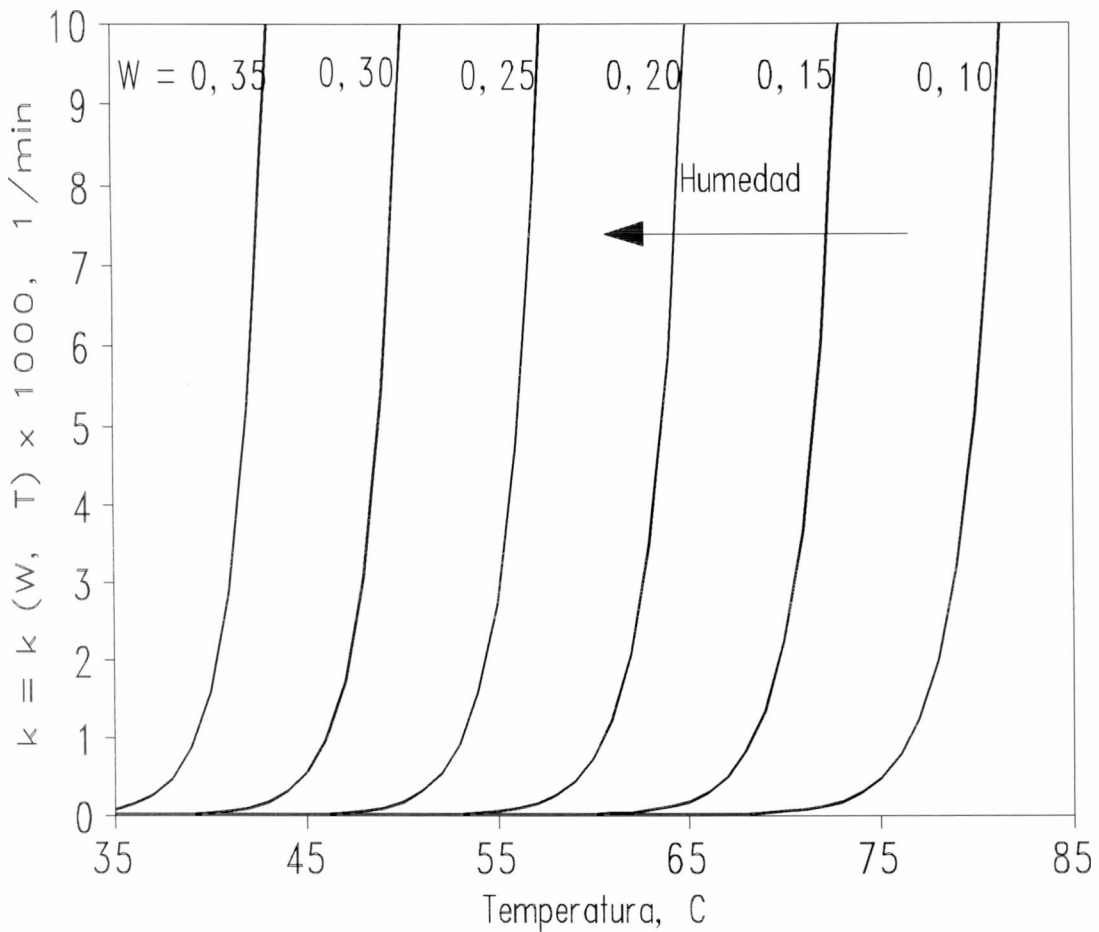


Figura 8.7. Constante cinética de primer orden para la pérdida de viabilidad de trigo en función de la temperatura del grano, a distintos valores de contenido de humedad

8.3.10. Posibles aplicaciones del modelo

El modelo (ec. (8.16)) podría ser aplicado, dentro del rango de tiempos, humedades y temperaturas utilizadas en este trabajo, para estimar la pérdida de viabilidad de trigo durante el secado. El mismo puede utilizarse en las siguientes situaciones:

Secadoras continuas de trigo

(1) Usando historias experimentales de humedad y temperatura, como las mostradas en las Figuras 8.1 a 8.6. Debe notarse que en este caso deberá contarse con numerosos datos experimentales en cada corrida.

(2) Utilizando humedades, temperaturas y tiempos predichos por un modelo de simulación de secadoras de trigo. Por ejemplo, el modelo de secado en lecho fijo desarrollado en el capítulo 7. Esta sería una de las aplicaciones más útiles del modelo cinético, dado que permitiría predecir condiciones operativas de seguridad para el secado de trigo de acuerdo al tipo de equipo de secado.

**CAPITULO 9. EXTENSION DEL MODELO PARA
SECADORAS CONTINUAS DE FLUJO CRUZADO.
CONVALIDACION EXPERIMENTAL**

CAPITULO 9: EXTENSION DEL MODELO PARA SECADORAS CONTINUAS DE FLUJO CRUZADO. CONVALIDACION EXPERIMENTAL

9.1.INTRODUCCION

9.1.1. Sistemas de secado en flujo cruzado

Las secadoras continuas de flujo cruzado consisten básicamente de un lecho o columna de granos ventilada con aire forzado en forma perpendicular al movimiento global del lecho. En consecuencia, caen dentro de esta categoría las secadoras de circulación horizontal de granos (de cinta transportadora perforada o similar) ventilada verticalmente, o bien la versión más común actualmente de columna de granos vertical con flujo descendente por gravedad. En este caso los granos pasan retenidos entre placas metálicas perforadas, siendo una de ellas atravesada por aire de entrada y la otra, por el aire de salida; el flujo de aire es horizontal (Nellist, 1986; IRADI, 1989; CEDAR S.A., 1994; GADAR S.R.L., 1994; ASHRAE, 1999). Por las razones dadas, las mismas se denominan "secadoras de columnas" en Argentina.

Para cualquiera de las versiones, generalmente los dos tercios iniciales de la longitud de la secadora se destinan a la parte de secado con aire caliente, mientras que el resto se reserva para el enfriamiento de los granos con aire ambiente (Rodríguez, 1982; Mayol, 1985; Marsans, 1985; De Dios, 1996). Los equipos que secan trigo utilizan habitualmente este esquema. En el caso de maíz y soja, granos grandes que sufren daño mecánico debido al cambio brusco de temperatura entre secado y enfriamiento, se recomienda emplear sólo aire caliente, trasladando el enfriamiento a otro equipo, donde se realiza en forma suave (Bakker-Arkema, 1993). El método es aún más efectivo si se esperan unas horas para permitir la uniformización del perfil de humedad en la semilla, denominándose en ese caso "Seca-Aireación" (Mc Kenzie y Foster, 1980; Lasserán, 1982; Marsans, 1985; De Dios, 1985).

Secadoras continuas de trigo

9.1.2. Antecedentes y trabajos previos

De los estudios realizados en secadoras de granos en Argentina, se desprende un marcado interés en dos aspectos básicos: minimización del consumo de energía y mantenimiento de la calidad de los granos. Gherbezza y colab. (1986) realizaron un trabajo experimental en una secadora de flujo cruzado de escala comercial y observaron la conveniencia de recircular aire de salida de la segunda mitad de la parte de secado y todo el de salida del enfriamiento, por medio de lo cual se encontraron mejoras del 34% en la eficiencia energética. Asimismo, otros autores (Belluti y colab., 1988) han evaluado el beneficio potencial obtenible al aislar térmicamente las paredes de una secadora comercial de flujo mixto ("de caballetes" en Argentina), sistema de secado que combina arreglos aire-grano a flujo paralelo y flujo cruzado (Bruce, 1984; Giner y Bruce, 1998).

Se han realizado otros estudios ingenieriles con el objetivo de uniformizar las condiciones de entrada en secadoras comerciales de flujo mixto dentro del Proyecto de Uso Racional de la Energía (Andrés y colab., 1988; Radován y colab., 1988), obteniéndose mejoras en el tratamiento térmico. Este proyecto ha dado lugar a la difusión de otros estudios en soja, maíz y trigo. Dreifuss y Gasset (1995) brindan sugerencias prácticas apropiadas para modificar secadoras. En los estudios mencionados, los cálculos realizados emplean mediciones obtenidas a escala comercial, balances totales de materia y energía, y evoluciones psicrométricas, pero no modelos matemáticos de transferencia de calor y materia.

El Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria de Argentina (INTA) presentó el programa PROGRANOS (INTA, 1993), donde se prefijaron importantes objetivos y se recomendaron métodos de manejo de granos para reducir las pérdidas post-cosecha, estimadas en un 7-10% de la producción. En este sentido, la publicación de Puzzi (1984) incluye observaciones de gran utilidad para el correcto manejo post-cosecha de granos.

En Argentina, se utilizan tanto las secadoras de flujo cruzado como las de flujo mixto sin que ninguna de ellas haya desplazado la otra del mercado (Giner, 1994). Las secadoras de flujo cruzado son preferidas en Norteamérica (Brooker y colab., 1992), mientras que en

Europa se emplean con mayor frecuencia las de flujo mixto (Olesen, 1987). Las secadoras de flujo mixto impartirían un tratamiento térmico algo más uniforme (Bruce, 1984) y presentarían un consumo de combustible algo más bajo; sin embargo su costo de inversión resultaría mayor y su mantenimiento es más demandante. Las secadoras de flujo cruzado son más simples, de menor costo de adquisición y presentan un importante potencial de mejoras (Nellist, 1982).

Con referencia a estudios experimentales de calidad en trigo en secadoras de flujo cruzado, Tosi y colab. (1986) encontraron una notable heterogeneidad en el tratamiento térmico, con diferencias de humedad y temperatura apreciables a través del lecho que causaron pérdidas de viabilidad elevadas en los granos próximos a la entrada de aire caliente y daño casi nulo en aquellos ubicados cerca de la salida del aire. Si bien esto se debe en buena medida a la naturaleza del secado en flujo cruzado (análogo al secado en lecho fijo), los autores hallaron una importante heterogeneidad de temperatura del aire a la entrada, producto de un diseño mecánico imperfecto, que agrava la falta de uniformidad inherente al sistema.

Se han realizado otros estudios experimentales sobre la relación secado de trigo-calidad, pero en secadoras de flujo mixto: Radován y colab. (1988) encontraron mermas en la calidad panadera atribuibles a condiciones de abuso térmico durante el secado, mientras que Tosi y colab. (1993) encontraron diferencias importantes de tratamiento térmico en el grano de salida.

En los modelos actuales de secadoras de flujo cruzado, el espesor de lecho (o de columna) es de aproximadamente 0,30 m tanto en secado como en enfriamiento, aunque se fabrican versiones con menor espesor en la primera parte de la secadora para permitir un precalentamiento más rápido de la masa de granos (GADAR S.R.L., 1994).

Para atenuar los perfiles de humedad y temperatura en el espesor del lecho, -problema principal del sistema del secado en flujo cruzado-, se han desarrollado secadoras con inversores de flujo de granos (Bakker-Arkema, 1993), que hacen pasar los granos por

Secadoras continuas de trigo

un sistema de dos tolvas cuyas salidas se cruzan sin tocarse, para transferir granos que circulaban cerca de la salida del aire hacia posiciones cercanas a la entrada del mismo y viceversa. Otra alternativa, es mantener la columna de granos sin modificaciones e invertir el sentido del flujo de aire una o más veces en la parte de secado y/o al comenzar el enfriamiento (Dávila y colab., 1983; IRADI, 1989).

Con la crisis energética de la década del 70, se intensificaron estudios para evaluar costos del secado en secadoras de flujo cruzado, principalmente para maíz (Morey y Cloud, 1973; Young y Dickens, 1975). Una de las alternativas que se encontró era, como se mencionó anteriormente, la recuperación de calor (Bakker-Arkema, 1982). Pero luego se determinó que la recirculación de aire de salida conducía a la acumulación de polvos dentro de la secadora, aumentando la resistencia del lecho al paso del aire y el riesgo de incendios. Para resolver el problema, se desarrolló un sistema colector de polvo, que actúa sobre los mismos ventiladores de la secadora (CIMBRIA Unigrain, 1990). Actualmente, se emplea un concepto similar en secadoras de fabricación argentina con recirculación de aire (CEDAR S.A., 1994).

Entre las Normas IRAM para secadoras de granos, se pueden citar la 8032 parte I (IRAM, 1987) que trata sobre nomenclatura de secadoras de granos, y la 8032 parte II (IRAM, 1989) que describe las partes constitutivas. Por su parte, la Norma 8027 (IRAM, 1990) define conceptos relacionados al secado de granos. Una de las Normas más interesantes es la 8028 (IRAM, 1983) que describe el procedimiento de ensayo de una secadora continua, por medio del cual se pueden obtener *parámetros de comportamiento* confiables en estado estacionario. Entre éstos, puede destacarse el caudal de granos ("rendimiento" en Argentina, expresado en t/h) que puede pasarse por la secadora, al secar granos desde una humedad de entrada a un valor medio de salida, adecuado para el almacenamiento. Asimismo, es muy importante conocer el consumo de energía por unidad de masa de agua evaporada. Esta norma reconoce como antecedente la BS 3986-1966 (British Standards Institution, 1966).

Sin contar la bibliografía en secado de trigo en lecho fijo, citada en el capítulo 7, las contribuciones en modelado y convalidación de modelos de transferencia de calor y materia para el secado de trigo en secadoras continuas de flujo cruzado son aún escasas. Así como en Estados Unidos y en Francia se ha dado mayor énfasis al maíz y, en menor medida aunque creciendo, a la soja (Lasserán, 1982; Brooker y Colab., 1992), los trabajos más numerosos en trigo han sido realizados por Nellist (1982, 1984, 1986, 1987, 1989) y Nellist y Bruce (1992) en Gran Bretaña. Este último trabajo describe una norma actualizada para ensayo de secadoras (Norma BS3986-1991, British Standard Institution, 1991). Existe bibliografía adicional en secadoras de trigo de origen danés, pero orientadas a equipos de flujo mixto (Olesen, 1987). Se puede destacar, asimismo, el trabajo en control automático de secadoras de trigo realizado en Suecia por Nybrant (1986).

9.1.3. Objetivos del capítulo

El primer objetivo de este capítulo es el de modificar el programa de simulación de secado en lecho fijo y extenderlo para su empleo en secadoras continuas de flujo cruzado, donde el grano es secado con aire caliente e inmediatamente enfriado con aire ambiente. Una de las modificaciones será la incorporación del modelo de pérdida de viabilidad desarrollado en el capítulo 8.

El segundo objetivo es realizar una convalidación conjunta de los parámetros de comportamiento siguientes: caudal de granos, temperatura media en el lecho a la salida del enfriamiento, consumo específico de energía, y pérdidas de germinación. Con este fin, se utilizarán resultados experimentales de ensayos en secadoras comerciales de trigo cuyo procedimiento sirvió de base para la redacción de la norma BS 3986-1966. Parte de los datos de estos ensayos fueron utilizados por O'Callaghan y colab. (1971) y, en forma más completa por Nellist (1987), quien proveyó los informes originales de los ensayos con motivo de este trabajo de tesis.

9.2. MODELADO DEL SECADO EN SECADORAS DE FLUJO CRUZADO

9.2.1. Características del secado continuo en flujo cruzado

En las secadoras de flujo cruzado, el flujo de granos puede considerarse como un lecho fijo que se mueve o desciende como un bloque, (Nellist, 1987), esto es, sin mezclado. Dado que se ingresa grano húmedo y se extrae grano seco, el caudal de salida será inferior al de entrada (\dot{m}_w), diferencia que, expresada porcentualmente, se conoce como "merma por secado" (De Dios, 1996).

Sin embargo existe un caudal de granos que, si se desprecia la mínima formación de polvo por abrasión entre granos, y entre grano y secadora, se puede considerar constante a través del paso por el equipo y puede denominarse "caudal de materia seca" (\dot{m}_d). El mismo se calcula en función de \dot{m}_w , de la forma siguiente:

$$\dot{m}_d = \frac{\dot{m}_w}{1 + W_0} \quad (9.1)$$

A los efectos del modelado, y teniendo en cuenta que el principal resultado del programa de simulación es el tiempo de residencia total (t_T), el caudal \dot{m}_d puede definirse como sigue:

$$\dot{m}_d = \frac{\rho_{s0}(1 - \epsilon_0)[S_s Z_{\max s} + S_e Z_{\max e}]}{t_T} \quad (9.2)$$

donde el tiempo total de residencia es la suma de los de las partes de secado y enfriamiento: $t_T = t_s + t_e$. El valor ρ_{s0} es la densidad de materia seca referida al volumen inicial de grano (capítulo 7). La ec. (9.2) contempla la sección de entrada de aire a la zona de secado S_s y de enfriamiento S_e , a la vez que posibilita el uso de distintos espesores para esas etapas ($Z_{\max s}$ y $Z_{\max e}$).

Dada la continuidad del caudal de materia seca, entre secado y enfriamiento, el valor de \dot{m}_d puede calcularse de las dos formas alternativas siguientes:

Modelo para secadoras de flujo cruzado. Convalidación

$$\dot{m}_d = \frac{\rho_{s0}(1 - \epsilon_0) S_s Z_{\max s}}{t_s} \quad (9.3)$$

$$\dot{m}_d = \frac{\rho_{s0}(1 - \epsilon_0) S_e Z_{\max e}}{t_e} \quad (9.4)$$

Igualando las ec. (9.3) y (9.4), se deduce la expresión del tiempo de enfriamiento en función del tiempo de secado:

$$t_e = \frac{S_e Z_{\max e}}{S_s Z_{\max s}} t_s \quad (9.5)$$

que, para el caso más corriente de $Z_{\max e} = Z_{\max s}$ se reduce a:

$$t_e = \frac{S_e}{S_s} t_s \quad (9.6)$$

Esta última forma permite ver claramente un aspecto distintivo del secado/enfriamiento continuo: que el tiempo disponible para enfriar los granos está vinculado al tiempo requerido para el secado. El valor de t_e es usualmente menor que t_s , lo que se ve reflejado en la secadora por el hecho de que $S_e < S_s$. A diferencia del secado continuo, los valores de t_s y t_e son independientes en secado discontinuo en lecho fijo, dado que una vez terminado el secado se desconecta el calentamiento del aire, y el enfriamiento puede extenderse todo lo necesario.

En consecuencia, para secado continuo, el t_e puede no ser suficiente para enfriar correctamente los granos. Esto suele ocurrir cuando se remueve poca agua de los granos (secados "cortos"), donde t_s es pequeño y por ende, t_e lo es aún más. La solución a este problema de diseño puede estudiarse con un modelo convalidado. Se ha indicado que un buen enfriamiento es aquel donde la temperatura media del lecho a la salida no supera en más de 5°C al valor ambiente, T_{amb} (Nellist, 1987).

Un resultado importante del programa de simulación es el tiempo de residencia en la

Secadoras continuas de trigo

zona de secado, t_s . Un valor asociado a éste es el caudal de materia seca por unidad de área de entrada de aire en la zona de secado (m_{ds}):

$$\dot{m}_{ds} = \frac{\dot{m}_d}{S_s} = \frac{\rho_{s0}(1 - e_0) Z_{\max s}}{t_s} \quad (9.7)$$

tanto t_s como m_{ds} son valores intensivos, no dependientes del tamaño de la secadora pero sí de las condiciones operativas, incluyendo el espesor de lecho en la zona de secado. En consecuencia, para un m_{ds} dado, el caudal de materia seca m_d dependerá solamente de S_s sin importar, al menos en teoría, la forma geométrica de esa sección. Así, se podrían construir secadoras mas altas que anchas, o viceversa. La opción más común es la primera (IRADI, 1989; CEDAR S.A., 1994, GADAR S.R.L., 1994), por ocupar menor área de piso y permitir una mejor regulación del caudal de granos, y por consiguiente, del tiempo de residencia (t_r).

Hay una manera de vincular el tiempo instantáneo de secado en lecho fijo (t), con el de la coordenada de avance del grano en la secadora continua (y_{st}) (Figura 9.1). Si se usara la ecuación de m_d en la zona de secado, pero planteada a nivel de tiempo instantáneo (t), la sección acumulativa "barrida" por el grano en su movimiento, S_{st} , puede expresarse como el producto entre una ancho A_s constante e y_{st} . La expresión de m_d resultaría entonces:

$$\dot{m}_d = \frac{\rho_{s0}(1 - e_0) A_s y_{st} Z_{\max s}}{t} \quad (9.8)$$

Si se expresa m_d por unidad de anchura: $m_{da} = m_d / A_s$ y se despeja la longitud variable en la zona de secado, se obtiene:

$$y_{st} = \frac{\dot{m}_{da} t}{\rho_{s0}(1 - e_0) Z_{\max s}} = K_s t \quad (9.9)$$

que, para una condición dada, muestra que la longitud que va recorriendo el grano en una secadora es directamente proporcional al tiempo transcurrido. Obsérvese que, en estas

condiciones, la secadora resultará más larga cuanto más lento resulte el secado. En el caso de una secadora de longitud fija, Y_{max} , el grano deberá avanzar más despacio cuanto mayor sea el tiempo de secado requerido; esto implica reducir K_s , lo cual sólo puede lograrse reduciendo el caudal, \dot{m}_d .

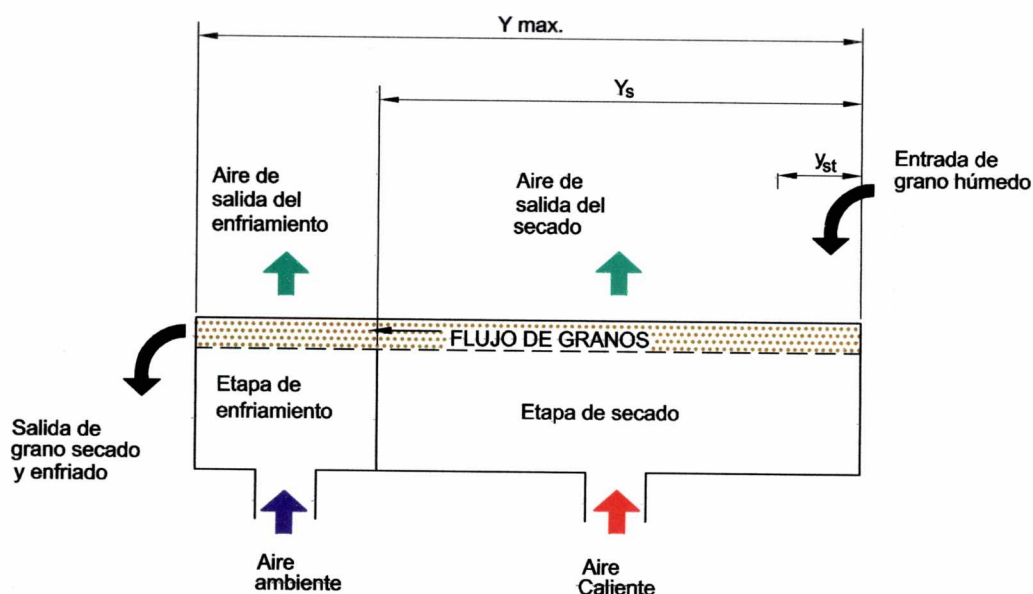


Figura 9.1. Esquema de una secadora continua de flujo cruzado en disposición con flujo de granos horizontal

9.2.2. Adaptación del programa de simulación de secado en lecho fijo al caso continuo de secado/enfriamiento

9.2.2.1. Inclusión de la etapa de enfriamiento

La inclusión de la etapa de enfriamiento a continuación de la de secado resulta ser la modificación más importante a realizar en el programa, dado que, para el nuevo caso, la humedad deseada está ubicada a la salida del enfriamiento. En secado en lecho fijo, se preestablecía una humedad final media deseada y el tiempo requerido en alcanzarla era el tiempo de secado, t_s . Esto podría hacerse también para secado continuo, pero el problema

Secadoras continuas de trigo

es que durante el enfriamiento, la humedad de los granos no se mantiene constante, y normalmente decrece un poco. Así, si se fijara el valor deseado a la salida de la zona de secado, no se tendría un control sobre la verdadera humedad de salida de los granos, de manera que el valor deseado de salida deberá estar ahora al final del enfriamiento. Por consiguiente, se requiere utilizar un método iterativo (Bruce, 1984; Nellist, 1987): se supone inicialmente un tiempo de residencia total, t_T , que se reparte en un t_s y t_e de acuerdo a las relaciones de secciones de entrada de aire y alturas de lecho vistas en las ec. (9.5) y (9.6).

Las condiciones del aire se inicializan con los valores del aire caliente para secado. Luego de un tiempo t_s , tales condiciones se reinician con las del aire ambiente para enfriamiento, las que se mantienen durante un t_e . Si al final de la última etapa la humedad media de salida no coincide con la deseada, se calcula la discrepancia entre ambas (DIS) y se llama a una rutina que contiene un algoritmo de búsqueda, que, en base al t_T anterior y DIS, propone un nuevo t_T para la segunda iteración de cálculo de la secadora completa. Las iteraciones prosiguen hasta que DIS cae por debajo de una tolerancia. El tiempo t_T obtenido en la última iteración será el tiempo de residencia predicho por el modelo.

9.2.2.2. Inclusión de la cinética de pérdida de germinación

Otra modificación al programa es la adición de la rutina para predecir pérdidas de calidad, por medio de la cinética de 1° orden desarrollada en el capítulo 8 para condiciones variables de humedad y temperatura de grano (ec. (8.16)). Ahora, en lugar de emplear historias térmicas y de secado experimentales, la cinética indicada utilizará las curvas provistas por el modelo matemático de transferencia de calor y materia. Esta combinación permitirá obtener las evoluciones temporales de poder germinativo de cada capa del lecho, a partir de las cuales puede estimarse el promedio en el lecho en cada tiempo, y, en especial, a la salida de la etapa de enfriamiento, para su comparación con valores experimentales. La Figura 9.2 muestra un diagrama de bloques simplificado para el programa de simulación de secadoras continuas de flujo cruzado.

Modelo para secadoras de flujo cruzado. Convalidación

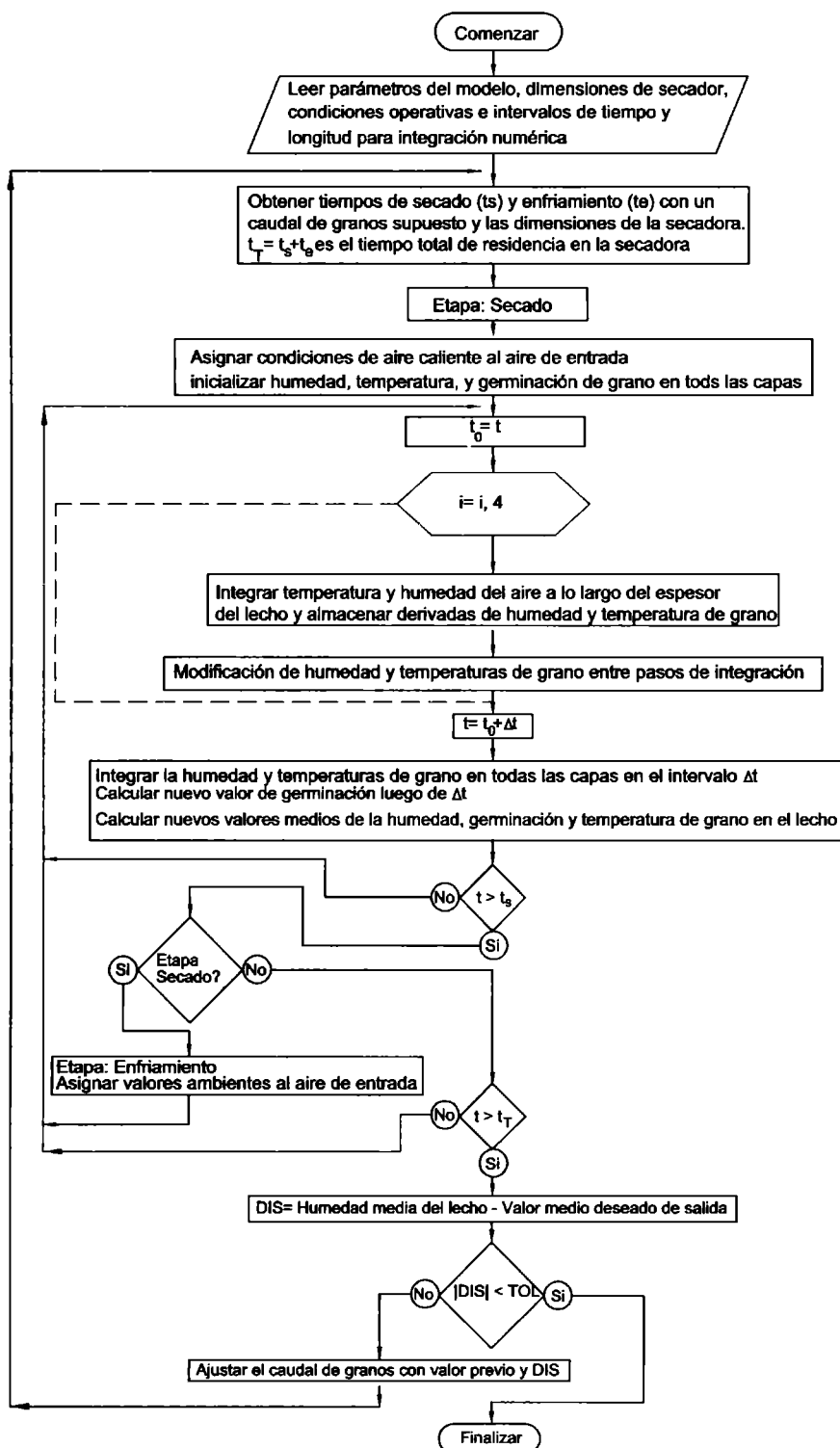


Figura 9.2. Diagrama de bloques simplificado del programa de simulación de secadoras continuas de flujo cruzado

9.3. RESULTADOS Y DISCUSION

9.3.1. Datos y resultados de los ensayos de secadoras de flujo cruzado

Las predicciones del modelo se compararon con los parámetros de comportamiento surgidos de 16 ensayos de tres secadoras comerciales operando en estado estacionario. Del total, 7 ensayos corresponden a la secadora "Airwoods 40", (NIAE, 1963) (Tabla 9.1a), 4 a la "Gascoigne 3/70", (NIAE, 1962) (Tabla 9.1b) y 5 a la "Allmet 50 cwt" (Tabla 9.1c) (NIAE, 1964). Los caudales de grano húmedo (\dot{m}_w) observados variaron entre 1 y 4 t/h. Cada una de las 3 tablas presenta, en el encabezamiento, el tamaño de la secadora representado por las secciones S_s y S_e .

El resto de la información se divide en *Condiciones operativas de la fase granos*: densidad de lecho referida al volumen inicial ($\rho_{s0} (1-\epsilon_0)$), humedad del grano a la entrada (W_0), humedad media del lecho a la salida del enfriamiento ($W_{\text{media de salida}}$), que, como se mencionó, es un dato para el programa de simulación, temperatura de entrada (T_0) y germinación a la entrada (G_0). Posteriormente, se presentan las *Condiciones operativas de la fase aire*: como temperatura del aire de secado a la entrada (T_{a1}) para las etapas de secado y enfriamiento, flujos máxicos (G_a) en ambas etapas y humedad absoluta ambiente (h_{amb}). Como *Condiciones operativas de la secadora* se indican las alturas o espesores medios de lecho en las zonas de secado ($Z_{\text{max s}}$) y enfriamiento ($Z_{\text{max e}}$). Todas las condiciones indicadas son datos para el programa de simulación. Finalmente, se indican los resultados de los ensayos, los cuatro *Parámetros de comportamiento*: caudal de granos húmedos (\dot{m}_w), temperatura y germinación media del lecho de granos a la salida del enfriamiento ($T_{\text{media de salida}}$ y $G_{\text{media de salida}}$, respectivamente) y consumo específico de energía térmica (C_{ee}).

Modelo para secadoras de flujo cruzado. Convalidación

Tabla 9.1a. Condiciones operativas y resultados observados de comportamiento de la secadora "Airwoods 40".

	AIRWOODS 40. $S_s = 5,57 \text{ m}^2$; $S_e = 1,86 \text{ m}^2$						
Ensayo N°	1	2	3	4	5	6	7
GRANO							
$\rho_{s0} (1-\epsilon_0)$, kg/m ³	650	650	650	650	650	650	650
W_0 , d.b	0,267	0,267	0,267	0,266	0,267	0,267	0,269
$W_{\text{media de salida}}$, d.b.	0,178	0,159	0,188	0,209	0,177	0,152	0,22
T_0 , °C	14,5	16,9	18,1	16,7	14,0	17,0	17,0
G_0 , %	84	83	84	87	84	83	84
AIRE							
T_{a1} (Secado), °C	65,6	65,3	65,3	63,3	72,8	82,5	82,2
T_{a1} (Enfriamiento), °C	14,5	16,9	18,1	16,7	14,0	17,0	17,0
G_a (Secado), kg/(m ² s)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
G_a (Enfriamiento), kg/(m ² s)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
h_{amb} , kg/kg	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008	0,008
SECADORA							
$Z_{\text{max } s}$, m	0,222	0,191	0,192	0,191	0,191	0,191	0,197
$Z_{\text{max } e}$, m	0,114	0,114	0,114	0,114	0,114	0,114	0,114
PARAMETROS DE COMPORTAMIENTO							
\dot{m}_w , t/h	1,33	0,98	1,58	2,35	1,56	1,39	3,38
$T_{\text{media de salida}}$, °C	18,1	20,3	22,5	24,7	18,3	21,7	33,9
$G_{\text{media de salida}}$, %	85	83	84	83	80	64	67
C_{pe} , MJ/kg	5,55	5,88	4,87	4,55	5,40	5,29	5,06

ˆ: $Z_{\text{max } s}$ valor medio. La altura de lecho aumentó unos 0,05 m de inicio a fin del secado.

Secadoras continuas de trigo

Tabla 9.1b. Condiciones operativas y resultados observados de comportamiento de la secadora "Gascoigne 3/70"

	GASCOIGNE 3/70. $S_s = 11,7 \text{ m}^2$; $S_e = 3,9 \text{ m}^2$			
Corrida N°	1	2	3	4
GRANO				
$\rho_{90} (1-\epsilon_0)$, kg/m ³	636	636	636	636
W_0 , d.b	0,263	0,260	0,271	0,272
$W_{\text{media de salida}}$, d.b.	0,185	0,166	0,199	0,215
T_0 , °C	10,0	10,0	10,0	10,0
G_0 , %	97	97	97	97
AIRE				
T_{a1} (Secado), °C	66,7	67,8	65,5	65,5
T_{a1} (Enfriamiento), °C	2,3	4,0	5,5	4,3
G_a (Secado), kg/(m ² s)	0,45	0,43	0,46	0,45
G_a (Enfriamiento), kg/(m ² s)	0,45	0,43	0,46	0,45
h_{amb} , kg/kg	0,0039	0,0040	0,0042	0,0039
SECADORA				
$Z_{\text{max } s}$, m	0,140	0,140	0,133	0,133
$Z_{\text{max } e}$, m	0,09	0,09	0,09	0,09
PARAMETROS DE COMPORTAMIENTO				
\dot{m}_w , t/h	2,42	1,64	2,91	3,73
$T_{\text{media de salida}}$, °C	3,8	5,1	7,2	8,5
$G_{\text{media de salida}}$, %	97	97	97	97
C_{ee} , MJ/kg	8,30	9,61	7,21	7,50

*: $Z_{\text{max } s}$ valor medio. La altura de lecho aumentó unos 0,025 m de inicio a fin del secado.

Modelo para secadoras de flujo cruzado. Convalidación

Tabla 9.1c. Condiciones operativas y resultados observados de comportamiento de la secadora "Allmet 50 cwt".

	ALLMET 50 cwt.		$S_s = 12,1 \text{ m}^2;$	$S_e = 4,04 \text{ m}^2$	
Corrida N°	1	2	3	4	5
GRANO					
$\rho_{s0} (1-\epsilon_0)$, kg/m ³	611	611	611	611	611
W_0 , d.b	0,263	0,263	0,259	0,263	0,259
$W_{\text{media de salida}}$, d.b.	0,171	0,152	0,182	0,208	0,171
T_0 , °C	13,3	14,2	14,4	13,6	15,6
G_0 , %	95	95	95	95	95
AIRE					
T_{a1} (Secado), °C	70,6	70,6	70,6	70,6	77,2
T_{a1} (Enfriamiento), °C	12,2	14,2	13,9	13,3	14,4
G_a (Secado), kg/(m ² s)	0,41	0,41	0,41	0,405	0,41
G_a (Enfriamiento),kg/(m ² s)	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41
h_{umb} , kg/kg	0,0072	0,0073	0,0069	0,0069	0,0075
SECADORA					
$Z_{\text{max s}}$, m	0,152	0,152	0,152	0,152	0,152
$Z_{\text{max e}}$, m	0,152	0,152	0,152	0,152	0,152
PARAMETROS DE COMPORTAMIENTO					
\dot{m}_v , t/h	2,17	1,50	2,61	3,89	2,45
$T_{\text{media de salida}}$, °C	15,0	15,6	17,8	21,7	16,1
$G_{\text{media de salida}}$, %	77	74	81	86	64
C_{ee} , MJ/kg	6,67	7,71	6,35	6,09	6,56

La convalidación consistirá en comparar los parámetros de comportamiento predichos con los experimentales, listados en las últimas cuatro filas de las Tablas 9.1a, 9.1b y 9.1c.

Secadoras continuas de trigo

9.3.2. Descripción de las secadoras usadas en los ensayos.

Las tres secadoras mencionadas consisten en lechos continuos a través de los cuales el aire pasa en forma vertical, y en donde la proporción de área de secado es mayor a la del enfriamiento.

Debe indicarse que ninguno de los informes originales indica la velocidad de aire usada en las zonas de secado y enfriamiento, pero sí el consumo de combustible empleado para el calentamiento del aire de secado por medio de combustión directa. Nellist (1987) asignó un poder calorífico inferior de 36 MJ/litro al fuel oil para calcular el calor suministrado por unidad de tiempo (\dot{Q}), asumiendo eficiencia perfecta del quemador. El flujo másico de aire en la zona de secado se evaluó entonces con la expresión siguiente:

$$G_{a \text{ secado}} = \frac{\dot{Q}}{S_s C_{pa} (T_{a1 \text{ secado}} - T_{amb})} \quad (9.10)$$

El flujo másico de aire en la zona de enfriamiento se asumió en todos los casos igual al de secado. La Figura 9.3 (a, b y c), muestra esquemas de las secadoras.

9.3.3. Aspectos específicos de la simulación de cada secadora

Secadora Airwoods 40

Para esta secadora (Fig 9.3(a)), el movimiento de los granos se lograba mediante una ligera inclinación del lecho de granos debida a la acción de un mecanismo alternativo ubicado debajo del plenum del aire de entrada (NIAE, 1963).

Debido a que el lecho no estaba confinado, la inclinación causó, según el informe original, un incremento del espesor de lecho de aproximadamente 5 cm, entre el comienzo y el fin de la etapa de secado. A partir de este dato, se asumió una variación lineal creciente de la altura de lecho que se incorporó al programa de simulación.

Modelo para secadoras de flujo cruzado. Convalidación

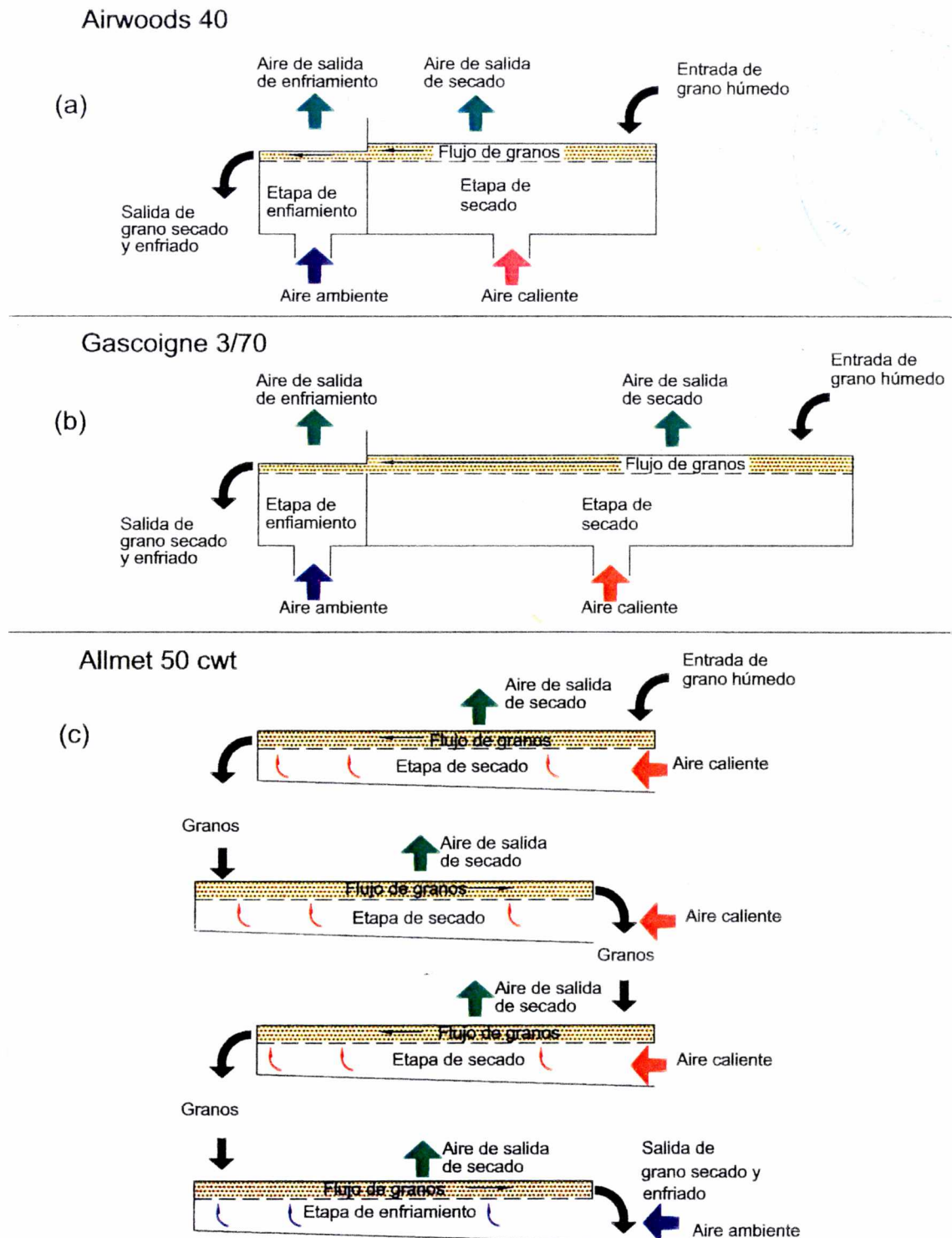


Figura 9.3. Esquemas de las secadoras utilizadas en los ensayos secadoras: (a) Airwoods 40, (b) Gascoigne 3/70, (c) Allmet 50 cwt

Secadoras continuas de trigo

Además, la secadora tenía una compuerta en el pasaje del secado al enfriamiento, que reducía la altura de lecho (ver Tabla 9.1a). Este último aspecto se simuló manteniendo el número de "capas delgadas numéricas" en el lecho (N_z), pero reduciendo su espesor (Δz) de acuerdo a la relación de espesores medios en secado y enfriamiento ($\Delta z_e = \Delta z_s Z_{\max e} / Z_{\max s}$). No se intentó simular posibles mezclados entre capas durante el pasaje de secado a enfriamiento. El rango cubierto de temperaturas de entrada del aire a la zona de secado (T_{a1} secado) fue de 63,3 a 82,2°C para las 7 corridas. Las corridas 6 y 7, ambas con T_{a1} en secado $> 80^\circ\text{C}$ causaron pérdidas del poder germinativo de alrededor de 20%.

Secadora Gascoigne 3/70

La secadora Gascoigne 3/70 (Figura 9.3.(b)), de mayor tamaño que la Airwoods 40, era muy similar tanto en la forma de lograr el flujo de granos, en el aumento de espesor de lecho en la zona de secado (aunque el valor informado de la variación fué menor: 2,5 cm) y en que la etapa de enfriamiento presentaba un lecho más delgado que en secado (NIAE, 1962). Todos estos aspectos fueron simulados análogamente al caso anterior. Si bien los valores usados de T_{a1} en secado (ver Tabla 9.1b) fueron prácticamente los mismos en los 4 ensayos (rango: 65,5 - 67,8°C), las humedades medias de salida presentaron importantes diferencias. Los resultados de los ensayos no indican daño de la viabilidad.

Secadora Allmet 50 cwt

La Allmet 50 cwt (NIAE, 1964) (Figure 9.3 (c)) es una secadora multilecho donde, a diferencia de las anteriores, el flujo de granos se mantiene por medio de un sistema de cinta transportadora, perforada para permitir el paso del aire. Los tres primeros lechos se usaron para secado con aire caliente, todos con aire proveniente del quemador, mientras que el cuarto lecho se reservó para enfriamiento con aire ambiente. La distribución vertical de los mismos, pensada para ahorrar área de piso, provoca el mezclado de los granos entre un lecho y el siguiente (Nellist, 1987). Todos los lechos tuvieron el mismo Z_{\max} (NIAE, 1964).

Interpretación matemática del mezclado en Allmet 50 cwt

En este trabajo de tesis, el mezclado fue interpretado como una operación aleatoria. Antes del mezclado, cada capa ocupaba una determinada posición z (entre 0 y Z_{\max}) y luego del mismo, esa capa pudo haber pasado a cualquier otra posición z en el lecho siguiente, incluyendo la posibilidad de que el valor de z sea el mismo. Los mezclados ocurren en la secadora Allmet a $0,25 t_T$, $0,50 t_T$ y $0,75 t_T$ (el último en el pasaje de secado a enfriamiento).

El reposicionamiento de las capas fue programado en una subrutina que genera números al azar entre 0 y N_z , donde N_z es el número de capas establecido para la integración numérica. No se consideraron los números repetidos, puesto que no es posible transferir dos o más capas a la misma posición luego del mezclado. En caso de números repetidos, la subrutina generaba nuevos números al azar hasta obtener un número no repetido.

De esta manera, el lecho resultaba "mezclado" en una forma realista, dado que cada capa reposicionada conservaba su humedad, temperatura y porcentaje de germinación.

Debido al carácter aleatorio asignado al mezclado, se tuvo en cuenta que al simular varias veces una corrida, podrían obtenerse resultados diferentes. Sin embargo, excepto para la germinación media de salida, cuya variación máxima fué de 5%, las diferencias en los otros tres parámetros de comportamiento fueron despreciables. Se considera que las variaciones inesperadamente pequeñas obtenidas en los resultados finales, a pesar de la existencia de etapas aleatorias, se debieron a que el lecho resultaba altamente mezclado en todos los casos, determinando un comportamiento similar del modelo de transferencia de calor y materia. La germinación varió un poco más debido a la extrema sensibilidad del modelo cinético a las condiciones de temperatura-humedad (energía de activación = 116000 cal/mol) para el rango de condiciones operativas de los ensayos de la secadora Allmet. Para atenuar la variación del valor de germinación de salida, se tomó un promedio de los resultados de tres simulaciones de cada corrida.

Secadoras continuas de trigo

9.3.4. Comparacion de parámetros de comportamiento predichos y observados

En las figuras siguientes se comparan los parámetros de comportamiento predichos por el modelo con los valores observados de las Tablas 9.1a, 9.1b y 9.1c. En los casos donde aparecen errores relativos porcentuales, los mismos se calcularon como $100 \cdot [(p - o)/o]$, siendo "p" el valor predicho y "o" el observado. Donde aparecen errores absolutos, la fórmula usada fué "p - o".

Caudal de granos húmedos

Como se había mencionado anteriormente, el programa calcula el tiempo de residencia total (t_T) para obtener la humedad media del lecho a la salida del enfriamiento; ese valor lo convierte en un caudal de materia seca (\dot{m}_d) en kg/s por medio de la ecuación (9.2) y luego lo traslada a caudal de grano húmedo en t/h:

$$\dot{m}_w [t/h] = 3,6 (1 + W_0) \dot{m}_d [kg/s] \quad (9.11)$$

La Figura 9.4 muestra los errores relativos porcentuales para el caudal de granos húmedos, en función de los valores observados. La misma muestra que los caudales de grano fueron subestimados por cierto margen en Airwoods 40, y muy bien predichos en las otras dos secadoras. El promedio de los módulos del error porcentual fué de 8,24% para las 16 corridas, lo que se considera una muy buena predicción, habida cuenta que los ensayos en secadoras grandes son complejos en su realización, donde aparecen ciertos factores de variación no sujetos a control como, por ejemplo, las condiciones ambientales. Asimismo, no resulta sencillo mantener las secadoras en perfecto estado estacionario (Nellist y Bruce, 1992). No parece haber una causa clara para explicar la subestimación del caudal de granos en la secadora Airwoods, puesto que la Gascoigne es similar (sólo de mayor tamaño) y se predijo con un error muy bajo. A su vez, debe remarcarse la muy buena predicción obtenida para los ensayos de la secadora Allmet, que incluye 3 etapas de mezclado simuladas como proceso aleatorio.

Modelo para secadoras de flujo cruzado. Convalidación

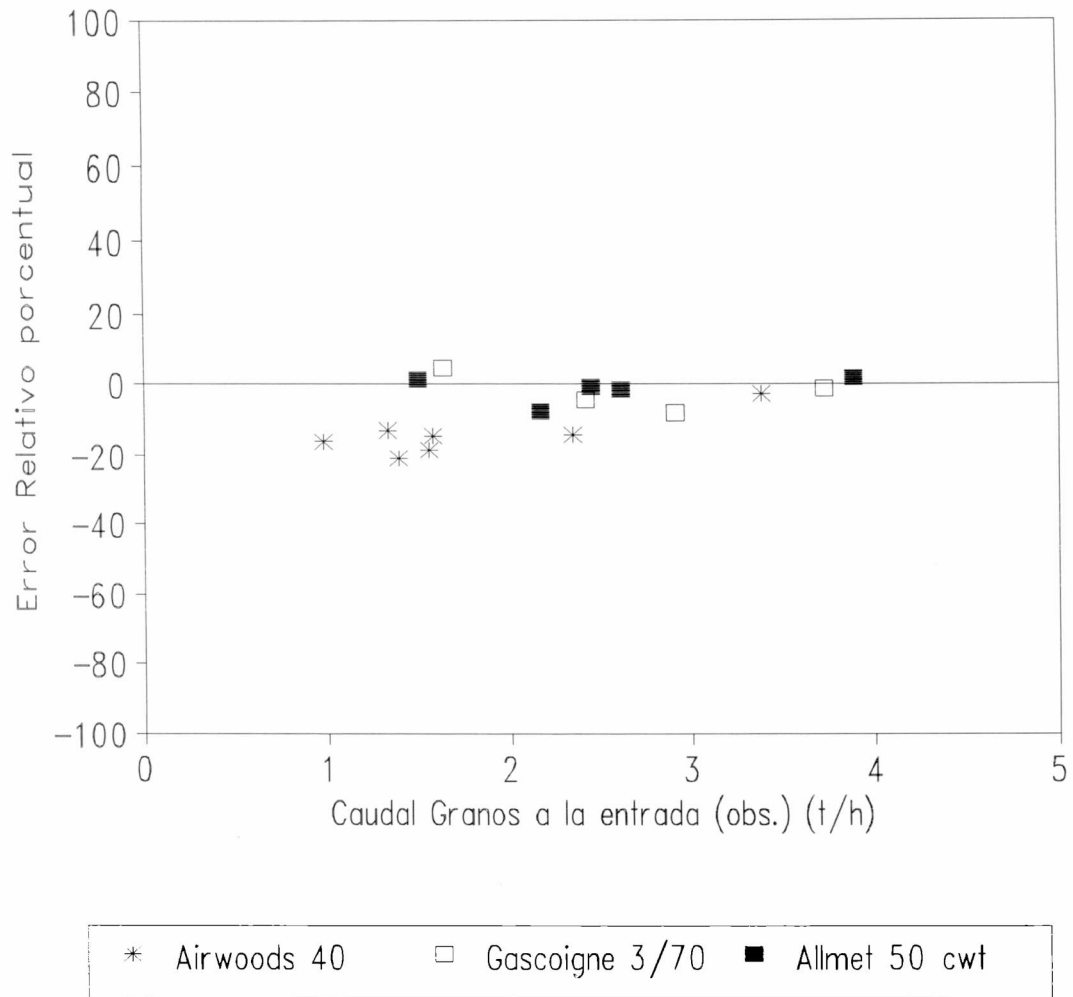


Figura 9.4: Error relativo porcentual en el caudal de granos húmedos versus los valores observados

Los tiempos de residencia guardan una correspondencia inversa con \dot{m}_w (ver ec. (9.2)), así que los mismos fueron sobreestimados en Airwoods y muy bien predichos en Gascoigne y Allmet.

En consecuencia, se considera que se ha alcanzado el primer objetivo del programa de simulación de secadoras, que es la obtención de una estimación correcta del caudal de granos, ante condiciones operativas dadas.

Secadoras continuas de trigo

Temperatura de los granos a la salida de la secadora

La Figura 9.5 muestra el error absoluto en la temperatura media del lecho de granos a la salida del enfriamiento. El valor predicho se calcula como una temperatura de mezclado adiabático de las capas del lecho. En este caso se prefirieron calcular errores absolutos, puesto que los relativos dependen de la escala (hubieran sido menores en K que en °C).

En primer lugar, debe indicarse que el promedio de los módulos de los errores absolutos fué de 2,6°C, un valor bajo. En general, las temperaturas predichas de salida fueron algo menores que las observadas, especialmente en las secadoras Airwoods y Allmet. Sin embargo, en la única corrida donde el grano salió de la secadora a una temperatura peligrosa (33.9°C) para el almacenamiento posterior no ventilado (por el riesgo de crecimiento de insectos), la predicción del modelo fué muy cercana, e incluso algo superior, revirtiendo la tendencia que se venía presentando. Hubiera sido útil comparar la temperatura media de lecho predicha al final de la etapa de secado, con un valor experimental, pero esto no fue posible porque los informes no incluían valores medidos en ese punto del equipo.

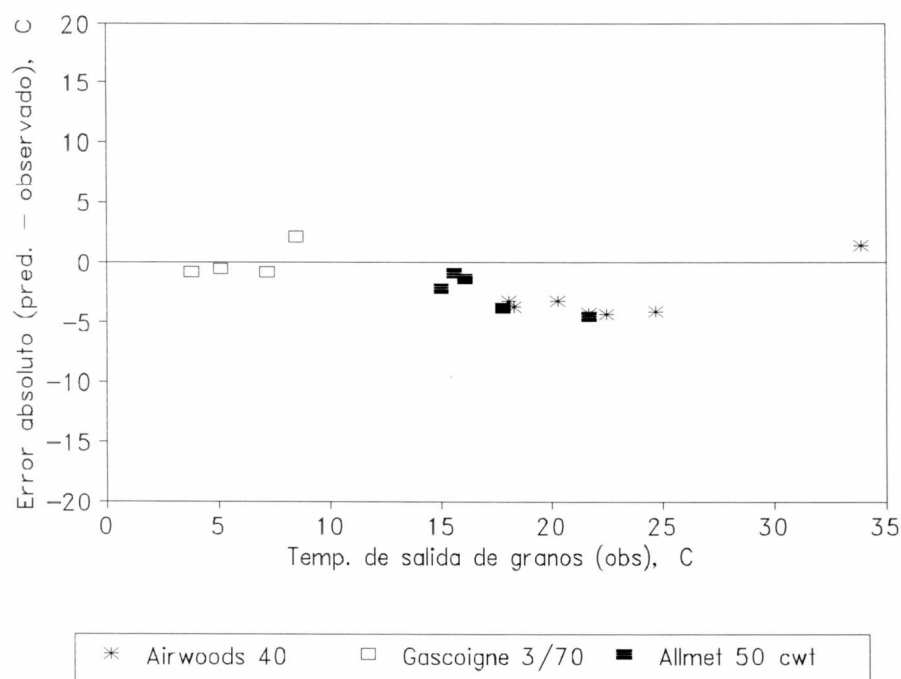


Figura 9.5: Error absoluto de la temp.media de salida de granos vs valores observados

Consumo específico de energía térmica

Para una secadora continua operando en estado estacionario, este parámetro de comportamiento (C_{ee}) se define como el cociente entre el calor recibido por unidad de tiempo por el aire de secado (MJ/s) y la velocidad de evaporación de agua que tiene lugar en la secadora (kg/s). No se incluye la potencia de los ventiladores, ni en secado ni en enfriamiento, pero sí se contempla la etapa de enfriamiento. La velocidad de evaporación depende de la diferencia entre la humedad de entrada a la secadora y el valor medio a la salida del enfriamiento, etapa donde se puede producir cierta evaporación adicional (usualmente de 0,5% b.s., o 0,005 decimal, b.s.), a expensas del calor sensible que había acumulado el grano en la etapa de secado. El Consumo específico de energía térmica (MJ/(kg agua evaporada)) se calcula con la expresión siguiente:

$$C_{ee} = 1 \times 10^{-6} \frac{G_{a \text{ secado}} S_s [C_{pad} + C_{pv} h_{a1 \text{ secado}}] (T_{a1 \text{ secado}} - T_{amb})}{\dot{m}_d \frac{1000}{3600} (W_0 - W_{media \text{ de salida}})}$$

Ecuación (9.12)

El factor de conversión 1×10^{-6} pasa los Joules a MJ, mientras que el cociente $1000/3600$ convierte el caudal de materia seca \dot{m}_d en t/h, a kg/s. El valor ideal mínimo es el calor de desorción medio del agua en la secadora, unos 2,5 MJ/kg. Las secadoras sin recirculación que usen un caudal de aire no mayor que el necesario, presentan consumos de 5 a 6 MJ/kg (1300-1400 kcal/kg), en tanto que recirculando parte del aire de salida del secado y el de salida del enfriamiento pueden lograrse valores de C_{ee} de alrededor de 3,5 MJ/kg (850 kcal/kg) (Nellist, 1982).

Como se observa en la ec. (9.13), los valores predichos de C_{ee} deberían desviarse inversamente al caudal de granos (Figura 9.4), dado que éste último aparece en el denominador de la fórmula. La Figura 9.6 muestra el error relativo porcentual de las predicciones de C_{ee} vs los valores observados.

Secadoras continuas de trigo

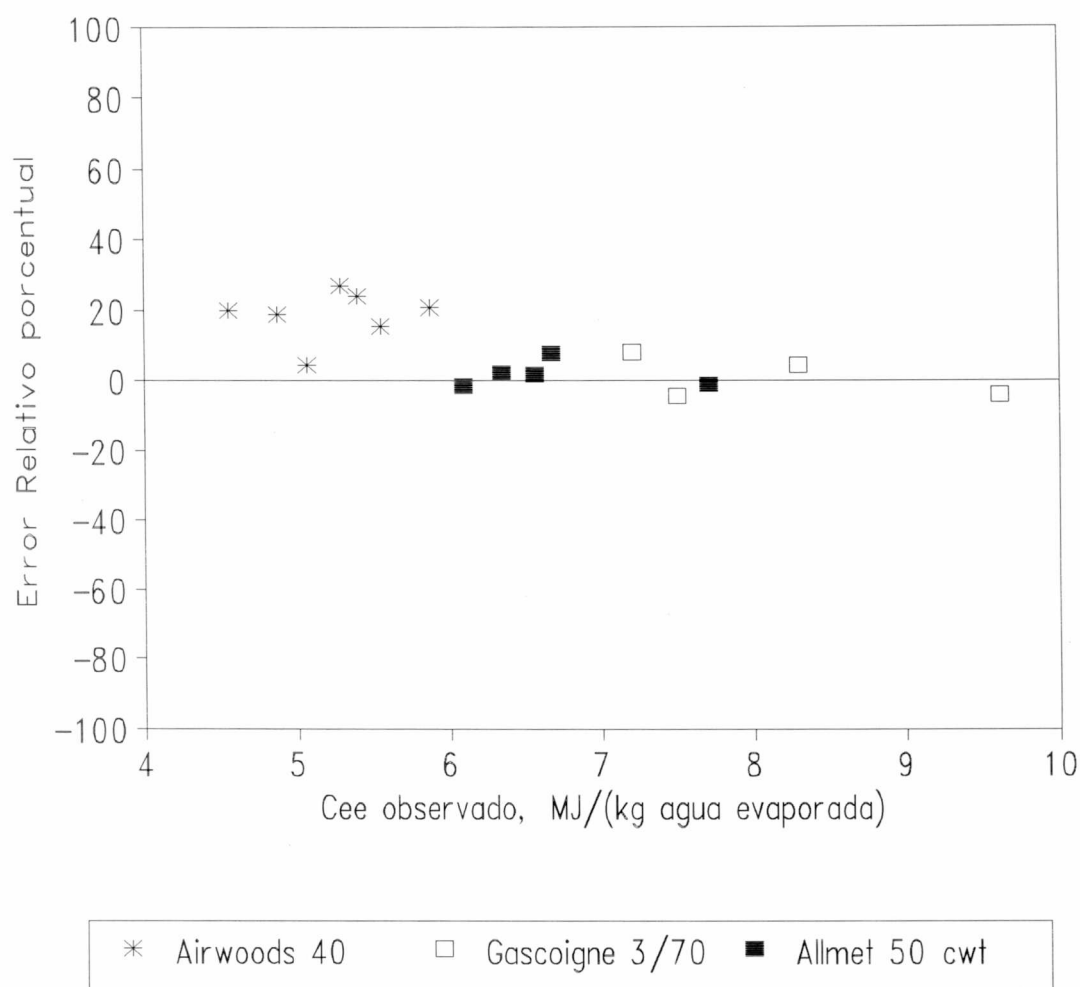


Figura 9.6: Errores porcentuales de predicciones de C_{ee} vs valores observados

Se observa que, en efecto, los C_{ee} de la secadora Airwoods, salvo en un ensayo, son sobrestimados por el modelo, consecuencia de la subestimación del caudal de granos. Los consumos de las secadoras Gascoigne y Allmet se predijeron muy acertadamente sin presentar una tendencia, lo que no permitiría explicar la falta de ajuste en la primera secadora. El error porcentual medio de las predicciones de C_{ee} fue de 10,3%, que se considera muy aceptable.

Modelo para secadoras de flujo cruzado. Convalidación

Germinación media de los granos a la salida

Se presenta un gráfico de barras con las germinaciones medias de salida predichas y experimentales para los 16 ensayos totales.

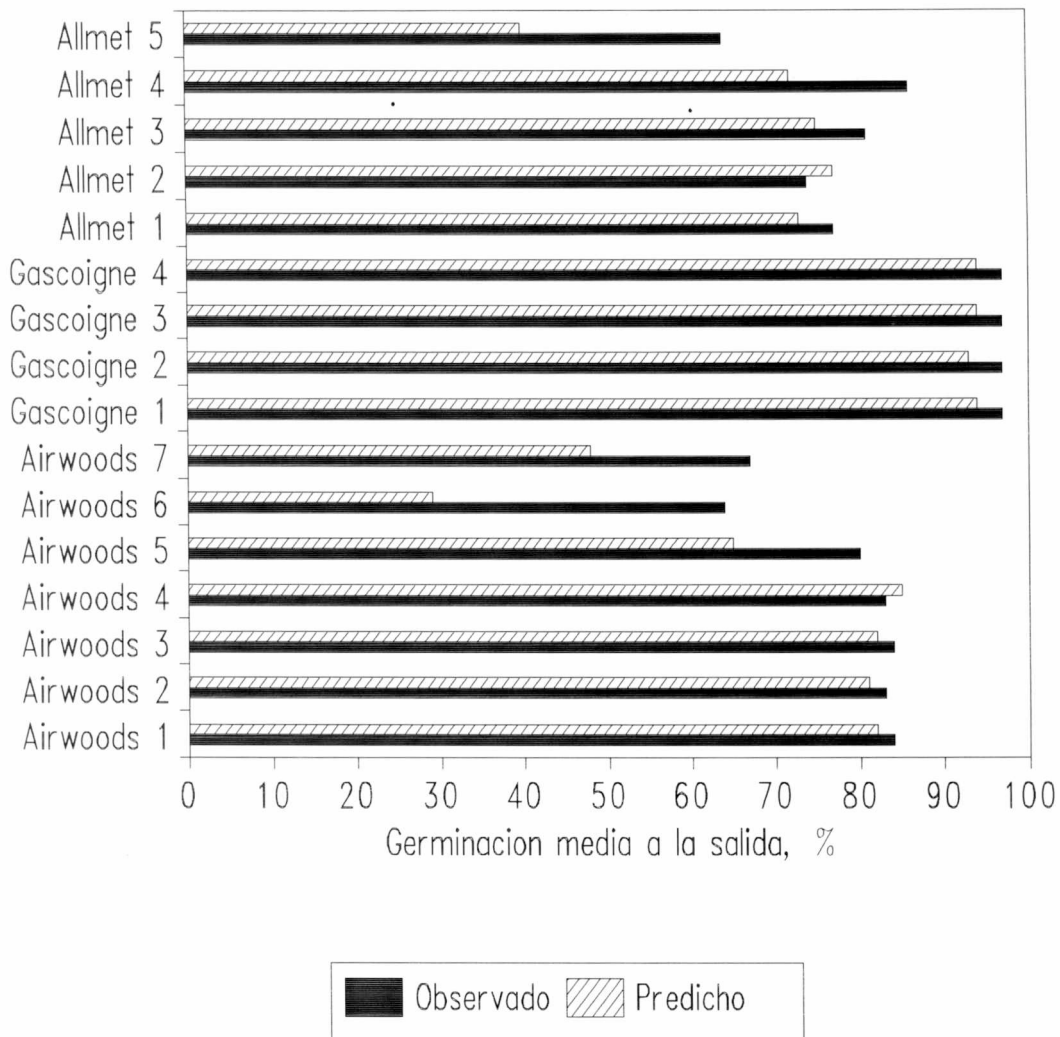


Figura 9.7: Germinaciones medias de salida observadas y predichas

Analizando el gráfico por secadora, puede verse que en Airwoods, los ensayos 1 a 4 ($T_{a1 \text{ secado}}$ de alrededor de 65°C), no causaron una pérdida de germinación apreciable, y fueron bien interpretados con el modelo combinado de transferencia de calor y materia y cinética de primer orden para condiciones variables. En el ensayo 5 de Airwoods ($T_{a1 \text{ secado}}$

Secadoras continuas de trigo

= 73°C), hubo una pequeña pérdida de viabilidad experimental, que el modelo combinado predijo en forma más marcada. Para los ensayos 6 y 7 (Temperatura de aire de secado \approx 82°C), donde las pérdidas de germinación observadas fueron de alrededor de 20%, con germinaciones medias de salida de 65% aproximadamente, el modelo se mostró más sensible, especialmente en el ensayo 6. En los cuatro ensayos de la secadora Gascoigne ($T_{a1 \text{ secado}} = 65\text{-}67^\circ\text{C}$), no hubo pérdidas de germinación observadas y el modelo reflejó la situación correctamente, siendo apenas más sensible. Es evidente que tanto en Airwoods como Gascoigne, valores de T_{a1s} menores que 68°C no produjeron pérdidas de germinación.

Con respecto a la secadora Allmet, la germinación de entrada en esta secadora fué de 95% (Tabla 9.1 c), y todos los ensayos mostraron daños térmicos parciales, bajo en algunos y moderado a importante en otros. Los resultados de la germinación de salida fueron muy bien predichos en los ensayos 1 a 3 ($T_{a1 \text{ secado}} \approx 71^\circ\text{C}$), donde las pérdidas fueron moderadas. En el ensayo 4 (también a 71°C) la pérdida de germinación observada de alrededor del 10%, fué sobreestimada un tanto por el modelo. El ensayo 5 muestra una condición de tratamiento severa (temperatura de entrada de aire $\approx 77^\circ\text{C}$), con una germinación final media de 64%, esto es 31 puntos porcentuales de germinación más baja que el valor de entrada, que el modelo predice en forma más sensible, con un valor de salida predicho de 40%. Debe observarse que las pérdidas en Allmet 50 cwt son mayores a la misma $T_{a1 \text{ secado}}$ e igual W_0 que en Airwoods, debido a que el mezclado en Allmet expone mayor proporción de granos húmedos a temperaturas elevadas.

En general, el modelo predijo correctamente los daños parciales pequeños, lo que es especialmente importante para diseñar condiciones de seguridad. El modelo fué más sensible que los datos para daños parciales considerables, pero estas condiciones no resultan propicias para una adecuada predicción debido a que, como se indicó en el capítulo 8, la desviación típica del poder germinativo es máxima para $G \approx 50\%$, lo cual dificulta su predicción cuantitativa (Nellist, 1978). El error absoluto promedio de germinación media de salida fue de 8,81% en unidades de poder germinativo, que resulta aceptable teniendo en cuenta la

Modelo para secadoras de flujo cruzado. Convalidación

naturaleza biológica de la propiedad.

Otra manera de mostrar los datos de germinación final media consiste en representarlos en función de la temperatura del aire en la zona de secado ($T_{a1 \text{ secado}}$) (Figura 9.8). Si bien esta variable no constituye la única causa de las pérdidas de calidad, la graficación conjunta de las germinaciones medias finales de 16 ensayos realizados en distintas condiciones de temperatura de aire, humedades finales, tiempos de residencia, caudales de aire, etc, podrán dar una medida de la temperatura límite aconsejable para usar en secadoras de flujo cruzado con humedad inicial de grano de alrededor de 0,26 dec., b.s. y espesor de lecho menor que 0,20 m. A efectos de mostrar el umbral de daño térmico, los resultados se expresaron como cocientes entre la germinación media de salida y la de entrada

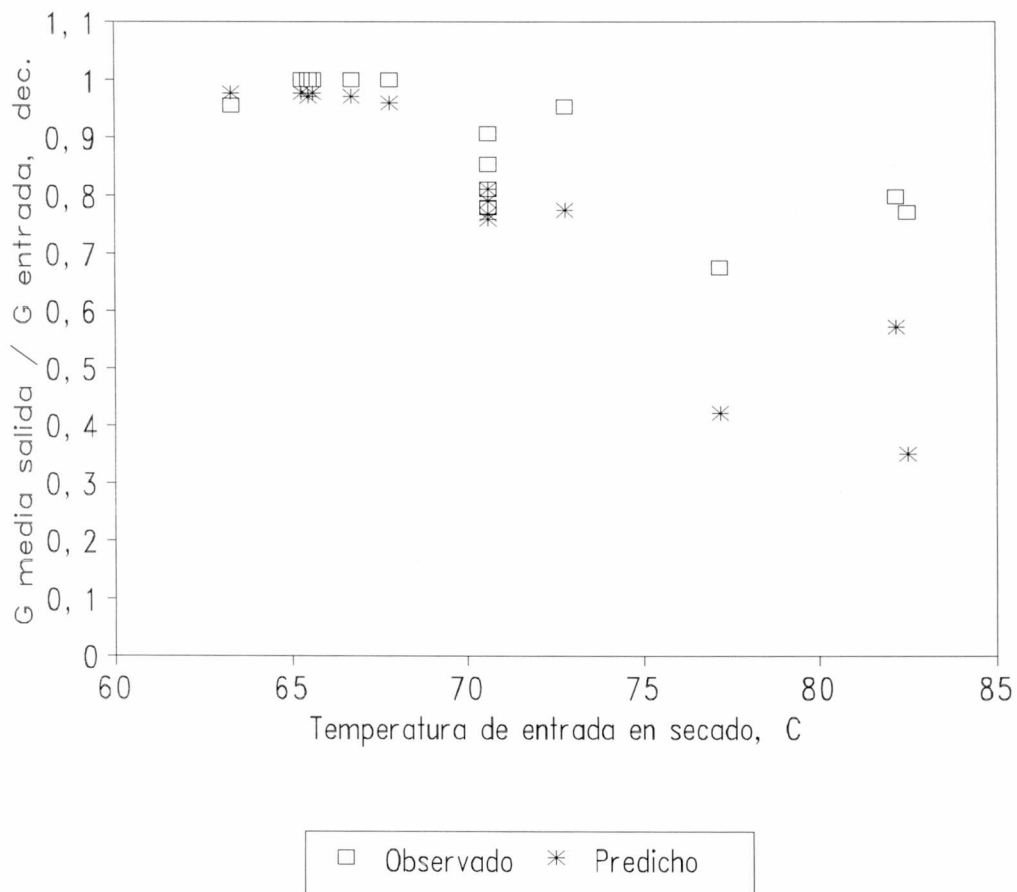


Figura 9.8: Valores observados y predichos de la germinación media de salida, referida al valor de entrada, en función de la temperatura del aire de secado

Secadoras continuas de trigo

El gráfico muestra que el modelo estima muy bien el nivel de temperaturas para el cual comienza a caer la germinación, e indica correctamente, como se había mencionado, los pequeños daños parciales. En las condiciones de los ensayos, se comienza a observar daño del poder germinativo para temperaturas de aire de secado de $\approx 70^{\circ}\text{C}$. Las secadoras actuales operan, normalmente, con mayores espesores de lecho (0,30 m) y, en Argentina, con menores humedades iniciales (0,19 - 0,21 dec., b.s.), lo que permitiría la utilización de temperaturas algo mayores que 70°C (suponiendo condiciones uniformes) para el secado de trigo pan. Bruce (1992) encontró una correlación aproximada donde el daño a la calidad panadera comenzaría para una pérdida de viabilidad de 10-15%, que es la zona donde el modelo desarrollado predice correctamente.

En consecuencia, se considera que este modelo de simulación de secadoras de flujo cruzado, combinado con la cinética de pérdida de germinación, permitirá diseñar condiciones operativas seguras para el secado de trigo con aire caliente.

**CAPITULO 10. SIMULACION DE SECADORAS CONTINUAS
DE FLUJO CRUZADO. EFECTO DE CONDICIONES
OPERATIVAS Y ESTUDIO DE DIVERSOS MODOS DE
FUNCIONAMIENTO**

CAPITULO 10. SIMULACION Y DISEÑO BASICO DE SECADORAS CONTINUAS DE FLUJO CRUZADO. EFECTO DE CONDICIONES OPERATIVAS Y ANALISIS DE DISTINTOS MODOS DE FUNCIONAMIENTO

10.1 INTRODUCCION

El propósito del diseño de secadoras es la obtención de granos de alta calidad, secados con tratamiento lo más uniforme posible, con consumo de energía limitado, y manteniendo bajo el tiempo de residencia. La obtención de óptimos en todos los factores mencionados no es posible simultáneamente: por ejemplo, si bien el uso de temperaturas elevadas reduce el tiempo de residencia en secado, también aumenta la heterogeneidad del tratamiento térmico y acelera las pérdidas de calidad. Por consiguiente, se tratará de encontrar una condición satisfactoria de diseño, a través de la búsqueda de situaciones de compromiso adecuadas.

Se empleará el modelo convalidado con dos propósitos: (1) Estudiar el efecto de condiciones operativas como espesor de lecho, temperatura de entrada del aire y humedad inicial de los granos en parámetros de comportamiento seleccionados. Con este fin, se considerará sólo la etapa de secado. (2) Utilizar el programa desarrollado para secado/enfriamiento a fines de explorar el comportamiento del equipo ante distintas condiciones operativas y diversos modos de funcionamiento (variantes operacionales), de manera de obtener prestaciones globales satisfactorias. El punto (2) constituye la etapa de "diseño" del equipo (Cunningham y Lombardi, 1978). Nellist (1987 y 1995) y Nellist y Bruce (1995) han mostrado que la simulación de la operación de secadoras presenta varios aspectos positivos: mejora el entendimiento del secado en un equipo determinado, permite encontrar condiciones más eficientes para la operación de secadoras existentes y resulta apropiada para crear nuevos prototipos. La exploración del funcionamiento de equipos mediante programas de simulación *convalidados* se denomina actualmente "desarrollo computacional de prototipos" ("computer prototyping").

10.2. RESULTADOS Y DISCUSION

10.2.1 Etapa de secado solamente

10.2.1.1. Efecto de las variables principales en parámetros de comportamiento seleccionados.

Para la etapa de secado, donde tanto la transferencia de materia como la de calor son importantes, se investigó el efecto de distintas condiciones operativas. En primer lugar, se evaluará la influencia del espesor del lecho (Z_{\max}) sobre varios parámetros de comportamiento.

10.2.1.1.1. Efecto del espesor de lecho

Se realizaron simulaciones para observar el efecto de Z_{\max} en el tiempo de secado (t_s) y capacidad de secado de granos húmedos (\dot{m}_{ws}), definida como \dot{m}_w/S_s , o bien:

$$\dot{m}_{ws} = \frac{\rho_{s0} (1 + W_0)(1 - e_0) Z_{\max}}{t_s} \quad (10.1)$$

y, asimismo, sobre el consumo específico de energía térmica (C_{ee}), temperatura final media del lecho, germinación final media del lecho y en un índice de heterogeneidad del secado (S_w). Este índice se calcula como la desviación típica de las humedades en N_z "capas numéricas" en las que se divide el lecho. El subíndice $i=1$ representa la capa en contacto con el aire de entrada ($z=0$), e $i = N_z$ a la capa en contacto con el aire de salida ($z=Z_{\max}$). La fórmula empleada para S_w es la que sigue:

$$S_w = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=N_z} (W_i - W_{fm})^2}{N_z}} \quad (10.2)$$

Las condiciones fijas utilizadas para la simulación fueron las siguientes:

Grano

-Humedad inicial : 17% b.h. ---> $W_0 = 0,205$ dec., b.s.

-Humedad final media : 14% b.h. ---> $W_{fm} = 0,163$ dec., b.s.

-Temperatura inicial: $T_0 = 25^\circ\text{C}$ (Grano cosechado en diciembre/enero)

-Germinación inicial: $G_0 = 100\%$

Aire

- $G_{a \text{ secado}} = 0,3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$

- $T_{a1 \text{ secado}} = 70^\circ\text{C}$; $T_{\text{amb}} = 25^\circ\text{C}$; Humedad relativa ambiente: $h_{r \text{ amb}} = 70\%$

Se observará como influye Z_{max} en el tiempo de secado.

Tiempo de secado

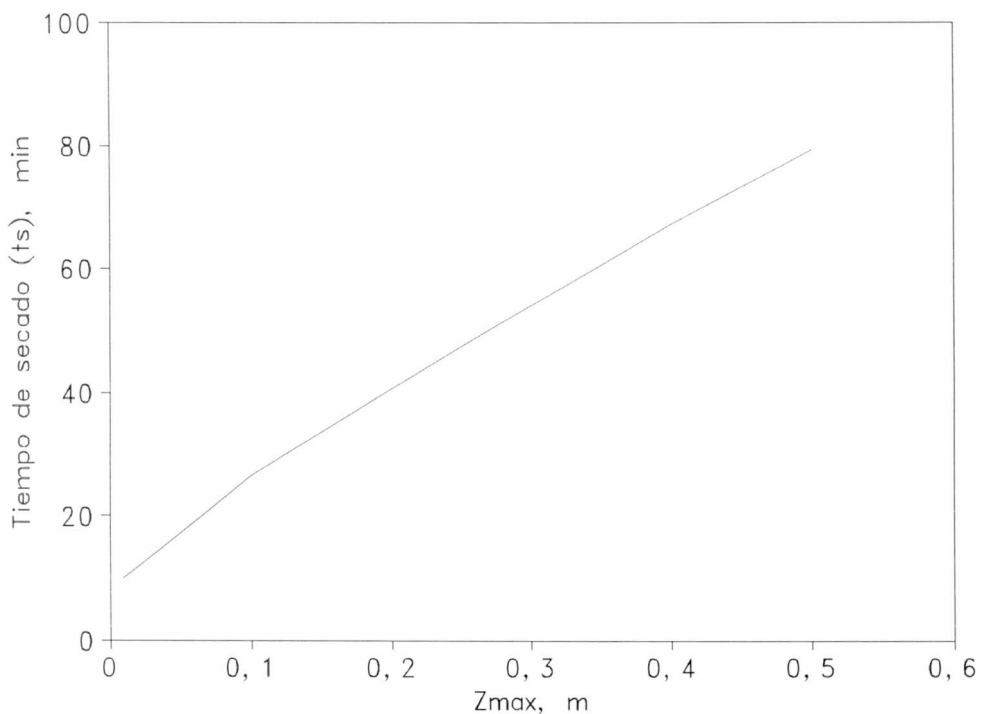


Figura 10.1. Efecto del espesor de lecho en el tiempo de secado

Secadoras continuas de trigo

La Figura 10.1 indica que el tiempo de secado, como era esperable, se incrementa con el espesor del lecho, aunque no lo hace en la misma proporción que éste. Obsérvese que al quintuplicar Z_{\max} (0,1 a 0,5 m), el t_s apenas se triplica. El efecto de esta conveniencia aparente de aumentar Z_{\max} se observa más claramente en el gráfico siguiente (Figura 10.2) de capacidad de secado.

Capacidad de secado (m_{ws})

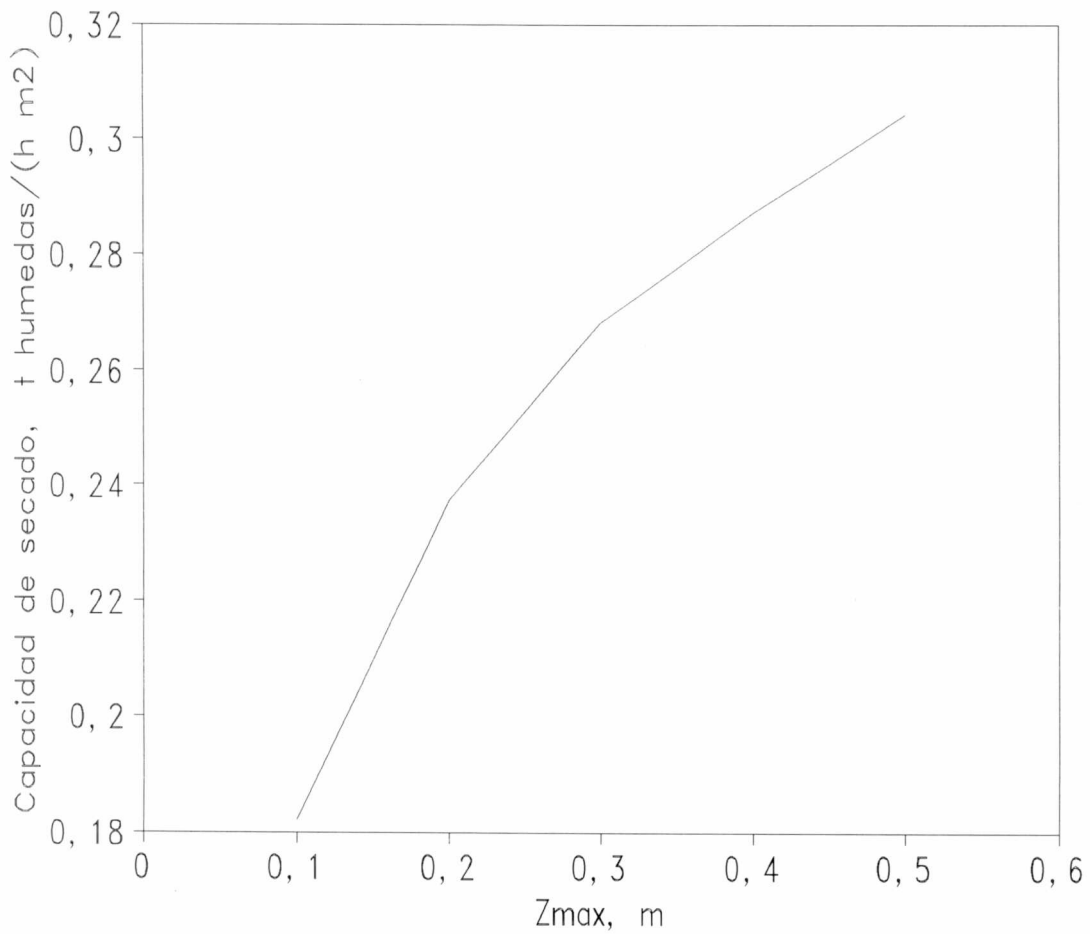


Figura 10.2. Efecto del espesor de lecho en la capacidad de secado

La cantidad de grano que puede secarse crece con Z_{\max} puesto que t_s no aumenta tanto con el espesor. Sin embargo, el incremento es más suave por encima de 0,30 m. Por otra parte, deben tenerse en cuenta otros efectos no convenientes que aparecen al utilizar espesores de lecho demasiado elevados, como por ejemplo el crecimiento de la pérdida de carga y de la potencia de ventilación que, a igual flujo másico G_a , es proporcional al aumento de espesor de lecho.

Temperatura final media del lecho

Se observará ahora el efecto predicho de Z_{\max} sobre la temperatura media entálpica del lecho de granos

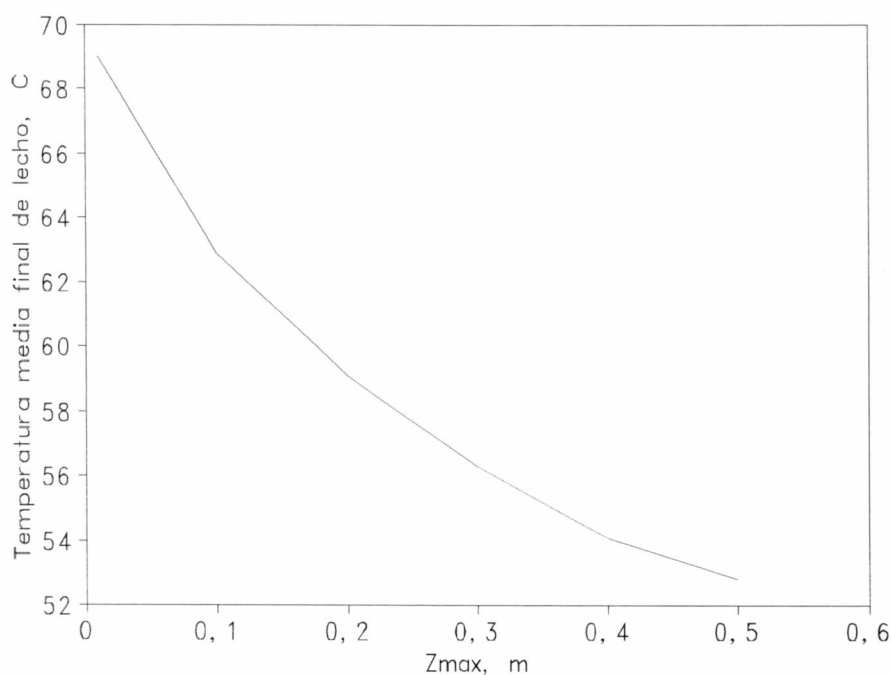


Figura 10.3. Efecto del espesor Z_{\max} en la temperatura media final del lecho de granos (sin enfriamiento)

Como se observa en la Figura 10.3, la temperatura media del lecho al final del secado decrece al aumentar el espesor. Para z tendiendo a 0 (condiciones de capa delgada), la

Secadoras continuas de trigo

temperatura tiende a coincidir con la del aire, pero a medida que crece Z_{\max} , los perfiles de temperatura y humedad se hacen más pronunciados en el lecho (granos secos y calientes cerca de $z = 0$ y fríos y húmedos cerca de $z = Z_{\max}$), con menor calentamiento promedio. Así, es esperable que el uso de mayores espesores de lecho conduzca a obtener menor deterioro térmico de los granos. De todas maneras, esto debe limitarse por la mayor heterogeneidad del tratamiento y por involucrar una mayor potencia de ventilación.

Con respecto a la influencia de Z_{\max} en el consumo específico, los resultados se muestran en la Figura 10.4.

Consumo específico de energía térmica (C_{ee})

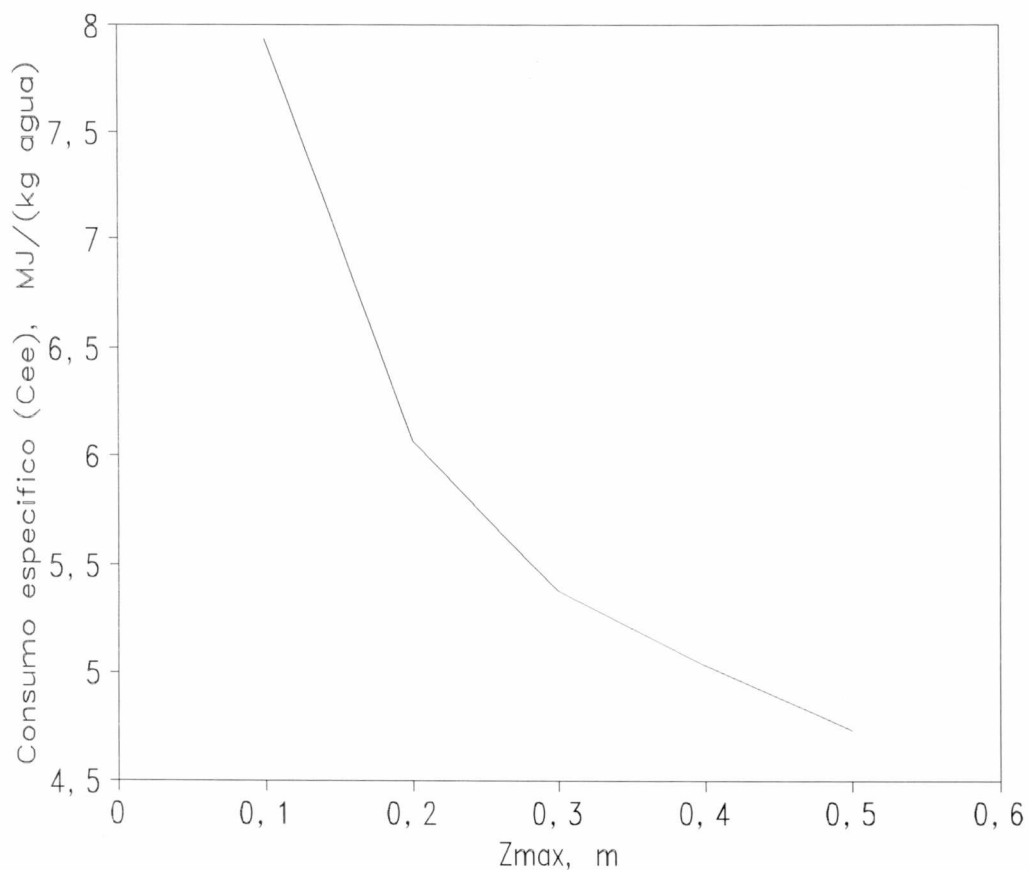


Figura 10.4: Efecto del espesor del lecho en el consumo específico de energía térmica

Se observa que el consumo de energía térmica por unidad de masa de agua evaporada decrece muy fuertemente al aumentar Z_{\max} en el rango de bajos espesores (0,1 a 0,3 m). En espesores mayores, el decrecimiento de C_{e_e} es más suave y no parecería justificarse la utilización de valores superiores a 0,30 m, si esto implicara elevar la potencia de ventilación y la heterogeneidad de tratamiento (S_w).

Heterogeneidad de tratamiento (S_w)

La variación de este parámetro con el espesor se muestra en la Figura 10.5.

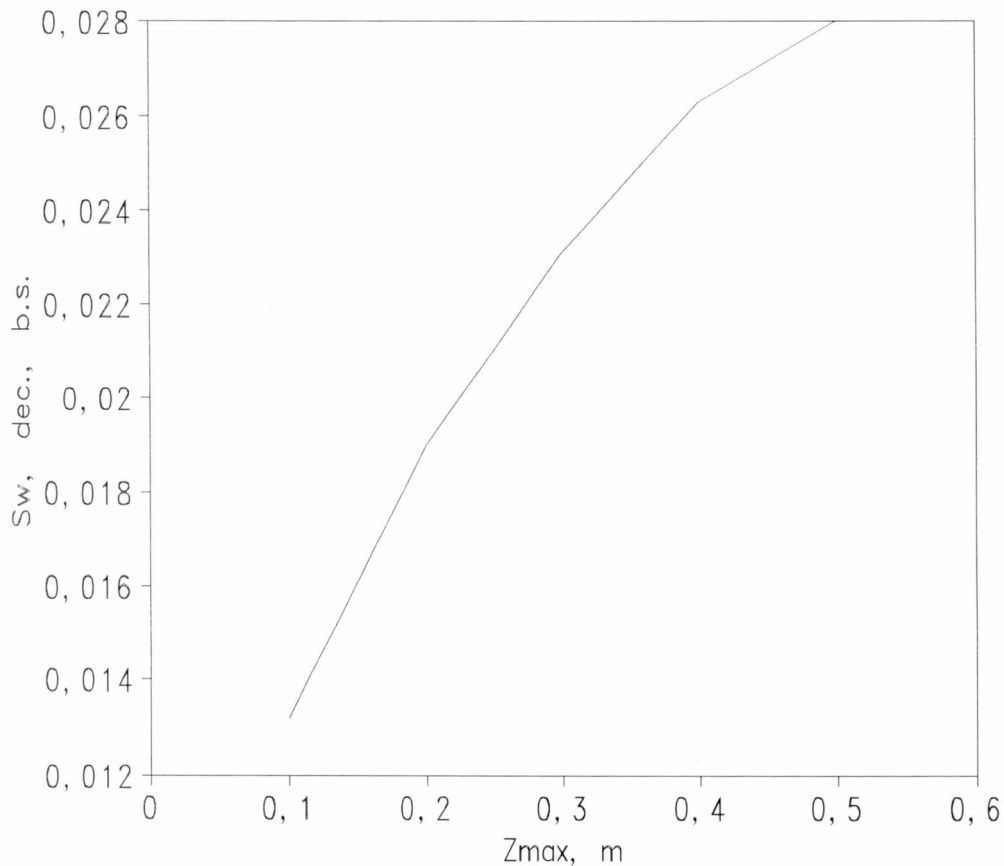


Figura 10.5: Efecto del espesor del lecho en S_w , parámetro que mide la heterogeneidad del secado en flujo cruzado

Secadoras continuas de trigo

Se observa que, efectivamente, S_w crece con Z_{max} . Debe tenerse en cuenta que, más allá que la heterogeneidad crezca un poco más suavemente para espesores por encima de 0,3-0,4 m, esto no justifica la utilización de mayores Z_{max} pues los valores alcanzables resultarían inaceptables. S_w es un parámetro cuyo crecimiento indica peor calidad de secado. La "población de humedades de grano" en el lecho, al finalizar el secado, puede ser caracterizada por su valor medio y la dispersión: $W_{fm} \pm S_w$. En este capítulo, el valor final de humedad es siempre 0,163 dec., b.s.

Un valor demasiado alto de S_w , será sinónimo de la coexistencia post-secado de granos muy húmedos (con riesgo de crecimiento microbiano posterior) con granos sobresecados (que como mínimo representan un desperdicio de energía y dinero). Estos granos se almacenan luego en silos, donde la transferencia de materia grano a grano es muy lenta. Si S_w es elevado, se perjudicará entonces la uniformización de humedad en el granel (Burrell y colab., 1982). Debe considerarse que S_w es un indicador "no alarmista" puesto que representa la desviación típica, y no la diferencia máxima posible, que se establece entre las humedades de los extremos del lecho $W_{z=zmax} - W_{z=0}$. Se tomará un valor límite de heterogeneidad $S_{w\ max} = 0,025$ dec., b.s. (2,5% b.s.), el cual no debería sobrepasarse durante el secado. Dicho límite está fijado por la experiencia, y representa un parámetro de calidad adicional a la pérdida de viabilidad. En uno de los puntos de la sección que sigue, se evaluará la variación de S_w con la temperatura de secado (T_{a1}), la humedad inicial del grano (W_0), y el flujo de aire. De aquí en más, y salvo indicación en contrario, las simulaciones se realizarán para un espesor $Z_{max} = 0,30$ m.

10.1.1.1.2. Efecto de la temperatura del aire de secado a distintas humedades iniciales del grano

Para observar el efecto conjunto de la temperatura del aire de secado (T_{a1}) y la humedad inicial de los granos (W_0), se graficarán los valores de los parámetros de comportamiento frente a T_{a1} , representando cada curva un valor constante de W_0 .

Tiempo de secado

La Figura 10.6 muestra el efecto de las variables mencionadas sobre t_s ,

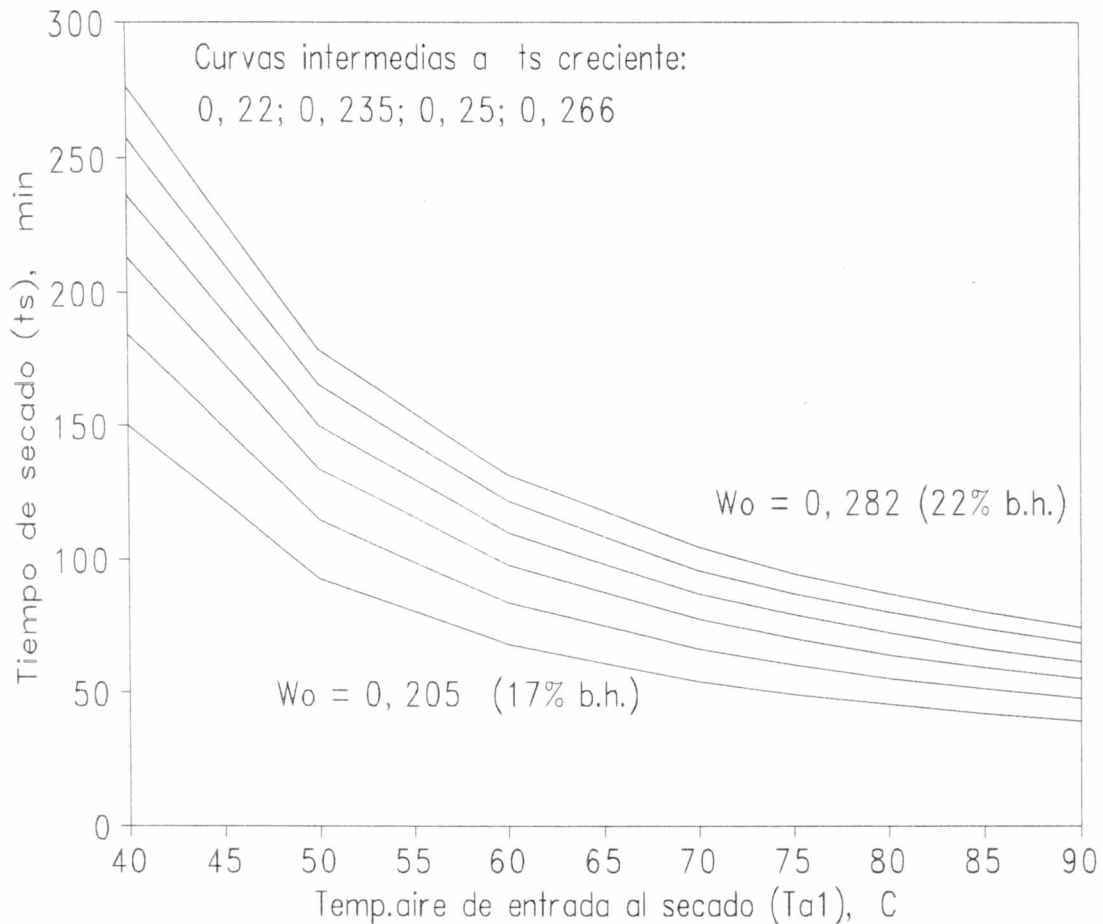


Figura 10.6. Efecto de la temperatura del aire a la entrada sobre el tiempo de secado, a distintas humedades iniciales

La Figura 10.6 permite apreciar, para cada W_0 , que el tiempo de secado decrece notablemente al aumentar la temperatura del aire, aunque la influencia se va atenuando para valores muy elevados. Esto es debido a una combinación de la funcionalidad tipo Arrhenius del coeficiente de difusión de agua de trigo con la temperatura y de los perfiles de temperatura y humedad en el lecho, que se vuelven más pronunciados con el aumento de T_{a1} , limitando el incremento de la velocidad media de secado en el lecho con la temperatura.

Secadoras continuas de trigo

Con respecto a la influencia de W_0 a T_{a1} constante, puede verse que mayores valores de la humedad inicial involucran mayores tiempos de secado, puesto que la operación debe evaporar una mayor cantidad de agua. Sin embargo, este efecto esperable de W_0 tiende a atenuarse por dos causas: en primer lugar, a mayor W_0 , la fuerza impulsora de transferencia de materia es mayor y el secado resulta proporcionalmente más rápido en términos dimensionales; en segundo lugar, se ha observado en este trabajo que el coeficiente de difusión aumenta con W_0 , lo cual refuerza el efecto compensatorio. Se puede decir entonces que si bien t_s crece con W_0 , lo hace en menor medida de lo que podría esperarse.

Capacidad de secado de granos húmedos

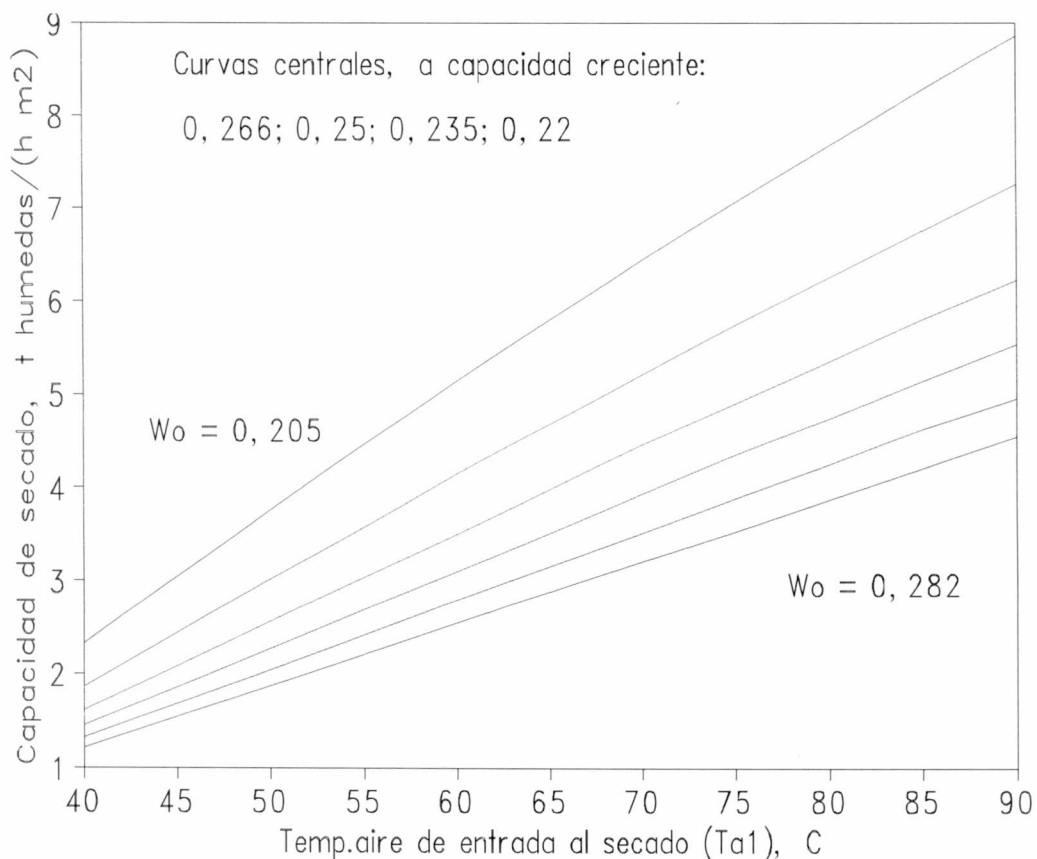


Figura 10.7. Efecto de la temperatura del aire sobre la capacidad de secado (sin enfriamiento) a distintas humedades iniciales

Si en lugar de graficar t_s , se grafica la capacidad de secado (\dot{m}_{ws}) frente T_{a1} y W_0 , se tendrá una medida más práctica del efecto de estas variables en un equipo. Para cada W_0 , la Figura 10.7 permite ver que se podrá secar una mayor cantidad de granos a temperaturas más elevadas, pero esto estará limitado por la calidad del grano resultante.

Por otro lado, a T_{a1} constante, la capacidad de secado aumenta al bajar la humedad inicial, debido a la reducción del tiempo de secado. El valor de W_0 está relacionado con la humedad de cosecha, la que depende de diversos factores: económicos, climáticos, agronómicos, etc. En Argentina, son escasas las partidas de trigo con humedades iniciales mayores de 0,22 dec., b.s., excepto que los granos hayan sido cosechados en días muy húmedos o bajo lluvia, o que la cosecha haya tenido que adelantarse por motivos excepcionales (IASCAV, 1993).

Consumo específico de energía térmica (C_{ee})

La Figura 10.8 presenta las predicciones de C_{ee} en función de T_{a1} . Se observa, a W_0 constante, que los valores de C_{ee} no experimentan cambios importantes al variar la temperatura del aire. Esto se explica sobre la base de que el consumo específico de energía térmica es el cociente entre dos cantidades que aumentan en forma comparable con la temperatura: la energía consumida en calentar el aire por unidad de tiempo y la velocidad de evaporación de agua.

El valor de la pendiente de la evolución de C_{ee} con T_{a1} está establecido fundamentalmente por la energía de activación (E_a) de la correlación tipo-Arrhenius entre el coeficiente de difusión efectivo y T_a (capítulo 6). Como se ha indicado, se obtuvo en este trabajo una $E_a \approx 27000$ J/mol (≈ 6500 cal/mol), para el cual el C_{ee} aumenta levemente con T_{a1} , pues la reducción en el tiempo de secado predicho (o el aumento de la velocidad de evaporación de agua) no compensa totalmente el aumento en la velocidad de consumo de energía.

Secadoras continuas de trigo

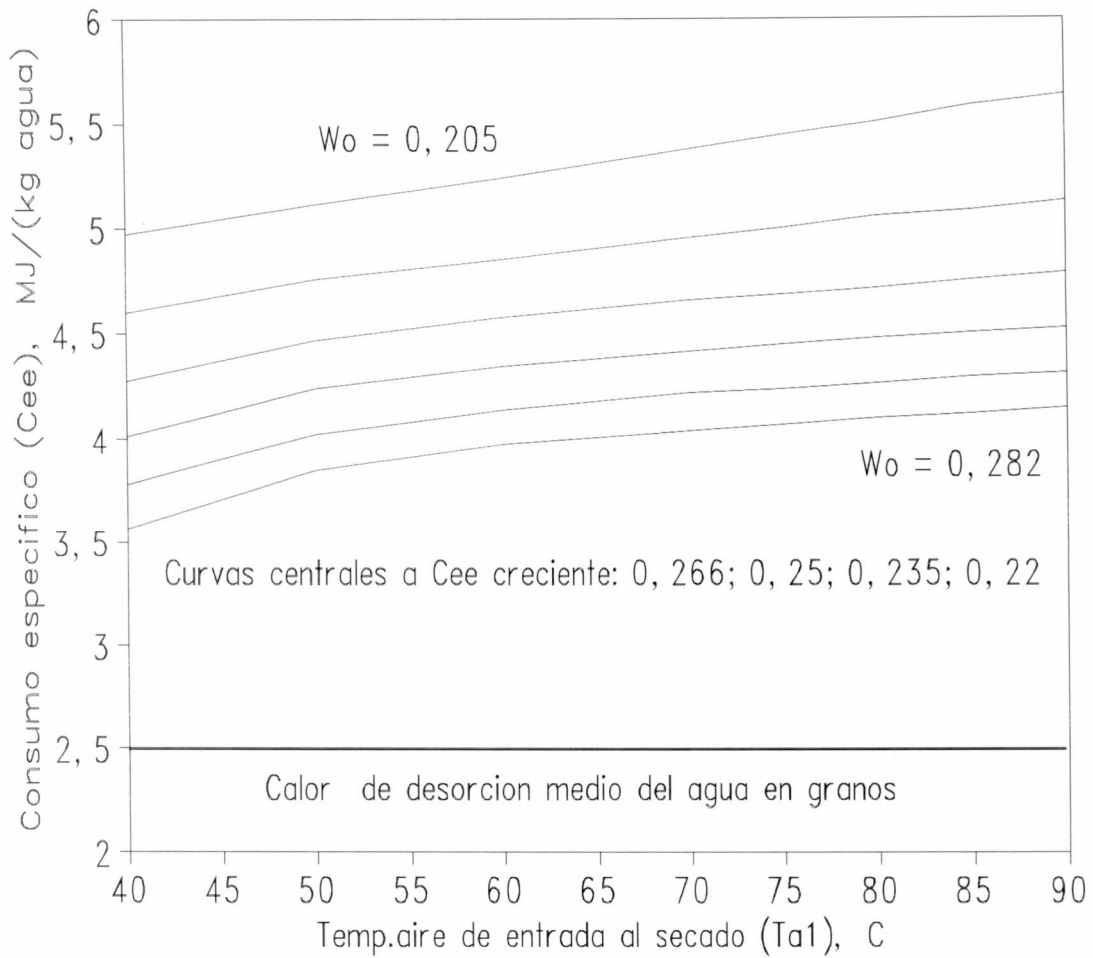


Figura 10.8. Efecto de la temperatura de aire sobre el consumo específico de energía térmica a distintas humedades iniciales

Para valores de E_a mayores, como por ejemplo 8800 cal/mol (Nellist, 1987), la reducción del tiempo de secado con la temperatura es más fuerte, revirtiendo la evolución de C_{cc} con T_{a1} que pasa a decrecer, siempre levemente, con la temperatura. De todas formas, leves aumentos o reducciones en el C_{ee} no cambian el resultado práctico principal de elevar la temperatura del aire: un aumento importante de la capacidad de secado del equipo.

Por otro lado, a T_{a1} constante, puede observarse que C_{ee} se reduce considerablemente al aumentar W_0 . El comportamiento se puede explicar en base a que buena parte del agua se

evapora a mayor velocidad, por contar con mayor fuerza impulsora, y por demandar un calor de desorción algo menor que a humedades de grano más bajas; asimismo, a mayores W_0 , el agua dispone de un mayor coeficiente de difusión efectivo. Secando a 75°C , el C_{ee} disminuye de un valor cercano a $5,5 \text{ MJ/kg}$ a $W_0 = 0,205$, a menos de 4 MJ/kg para una W_0 de $0,282$. Así, el secado resulta más eficiente cuando el agua desorbida de los granos se comporta en forma más parecida al agua pura.

Se observará ahora el efecto predicho de T_{a1} y W_0 en la temperatura media final del lecho (Figura 10.9)

Temperatura final media del lecho

La Figura 10.9 muestra que la diferencia entre la temperatura de entrada del aire y el valor medio final del lecho se amplía a medida que T_{a1} aumenta, debido a la reducción del tiempo de secado, que impide un mayor calentamiento del lecho.

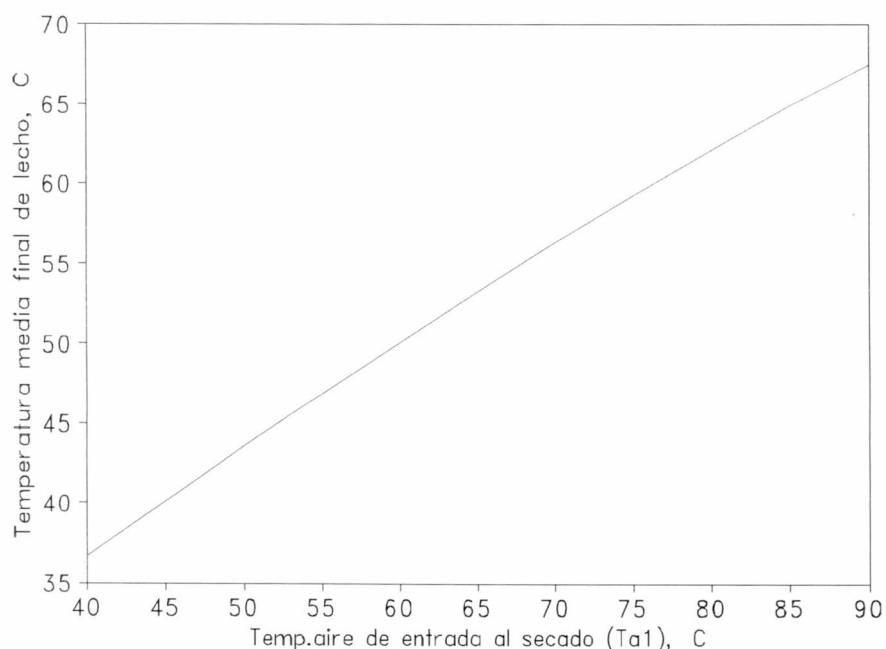


Figura 10.9. Efecto de la temperatura del aire sobre la temperatura final media del lecho (sin enfriamiento)

Secadoras continuas de trigo

La particularidad de la Figura 10.9 es que contiene una sola curva, que se promedió entre las correspondientes a las distintas humedades iniciales debido a que las diferencias eran mínimas. Debe observarse que si bien a mayores humedades iniciales se produce una evaporación proporcionalmente más rápida y por ende se tiene un menor calentamiento inicial del grano (el secado se parece más al de agua pura), los mayores tiempos de secado requeridos para remover esa elevada cantidad de agua hacen que el lecho termine alcanzando temperaturas similares a las de secados más cortos. Estos últimos parten de W_0 menores, y son más ineficientes térmicamente (ver Figura 10.8), con calentamientos más rápidos de la masa de granos.

A continuación, se observarán las predicciones del modelo combinado de transferencia de calor, materia y calidad (Figura 10.10). Se graficará la germinación media final del lecho vs la temperatura de entrada del aire a distintas W_0 y se analizará el efecto de ambas variables, buscándose zonas operativas que permitan disponer de una buena capacidad de secado sin causar deterioro térmico apreciable del grano.

Germinación Final media de los Granos

Puede observarse que, para un lecho de $Z_{\max} = 0,30$ m, la viabilidad de los granos comienza a ser afectada por temperaturas de aire mayores a 60°C para los granos de $W_0 = 0,282$ dec., b.s. y mayores de 70°C cuando la humedad inicial es más baja ($W_0 = 0,205$), lo cual muestra la mayor resistencia de los granos más secos al tratamiento térmico. Si bien previamente se ha recomendado una temperatura de 66°C para secado en flujo cruzado (Nellist, 1986), la Figura 10.10 indica, para este valor típico de Z_{\max} , que podrían utilizarse valores más altos para trigo pan. Si se fijara un criterio de pérdida de calidad admisible de un 10% de descenso de poder germinativo, resultaría posible emplear temperaturas de aire entre 75°C ($W_0 = 0,282$) y 83°C ($W_0 = 0,205$), siempre que se trate de valores uniformes en la sección de entrada a la secadora.

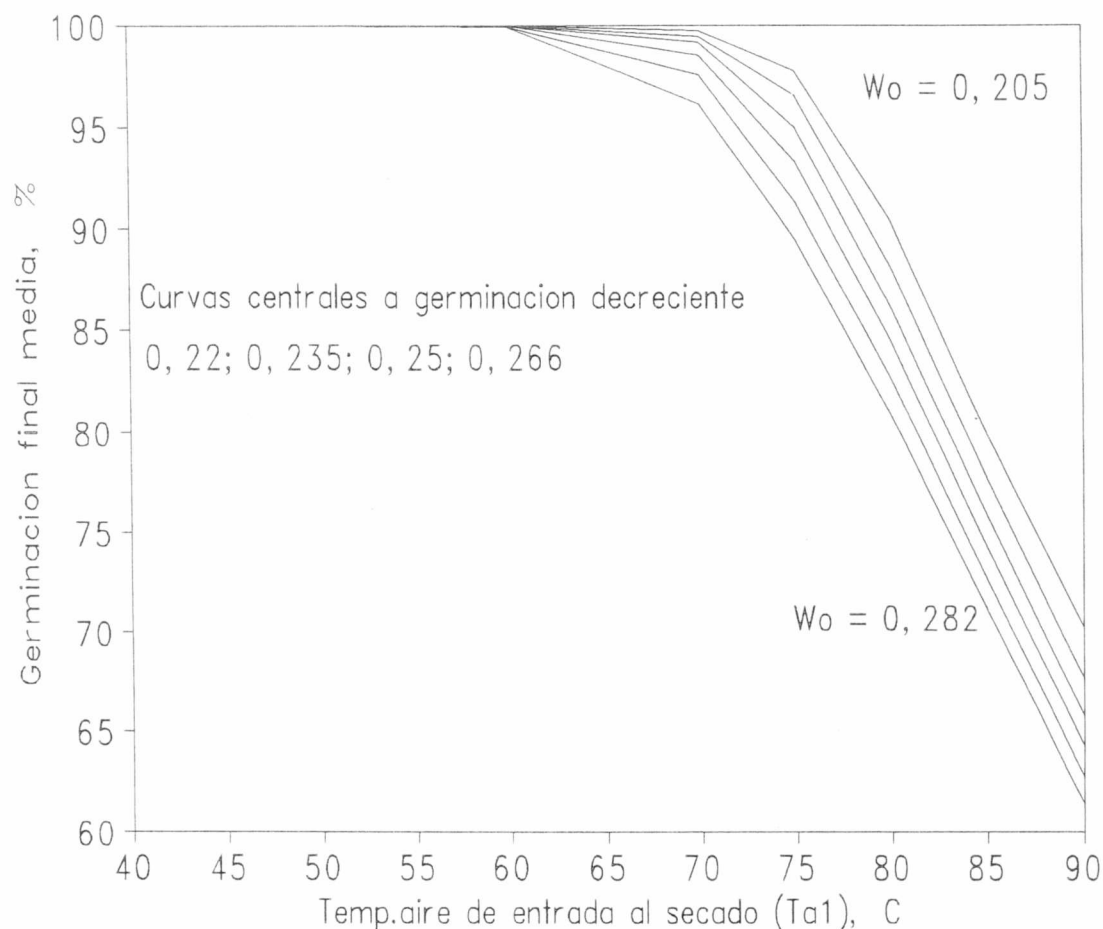


Figura 10.10. Efecto de la temperatura del aire sobre la germinación media del lecho al final del secado, a distintas humedades iniciales de grano

Bruce (1992) ha estudiado el efecto del secado en capa delgada sobre la viabilidad y la calidad panadera, expresada como volumen de pan relativo al control, y, al cabo de numerosas determinaciones experimentales, obtuvo una correlación entre ambos indicadores de calidad. La misma indica que una reducción de germinación del 25% corresponde, aproximadamente, a una disminución del volumen de pan del 5%. Así, el criterio de un 10% de pérdida de germinación se considera prudente y recomendable para estimar condiciones de seguridad en secadoras de trigo pan. Los aspectos bioquímicos del deterioro

Secadoras continuas de trigo

de trigo durante el secado fueron estudiados por Lupano (1986).

En relación a trigo semilla, no se recomendaría utilizar las temperaturas indicadas de 75 a 83°C, debido a que este tipo de grano no se seca habitualmente en secadoras de aire caliente con espesores de lecho elevados. En este sentido, corridas del programa para lechos delgados (0,05 m), como los usados eventualmente en secado de semillas, muestran que la germinación no sufriría daños con temperaturas de hasta 60°C, aún a $W_0 = 0,282$. Sin embargo, no parecería posible trasladar estas recomendaciones al secado de trigo destinado a semillas: en compañías semilleras o instituciones de investigación estatales se prefiere utilizar secado natural en campo, secado con aire forzado natural, o apenas calentado a 35°C (De Dios, 1988; Rodríguez, 1994), dado que el empleo de temperaturas más altas, afectaría medidas del vigor germinativo, como la masa de plántula y/o longitud de plúmula (Ghaly y van der Touw, 1982).

De todas maneras, como se ha mencionado, el objetivo central de la combinación del modelo de secado y del de calidad consiste en pronosticar tendencias de pérdida de germinación como índice vinculado a la calidad panadera. Se estudiará a continuación otro parámetro relacionado con la calidad potencial del grano: la heterogeneidad del tratamiento térmico en el secado en lecho fijo/flujo cruzado.

Heterogeneidad de tratamiento

La Figura 10.11 muestra la variación de S_w con T_{at} y W_0 . Este gráfico permite apreciar que la desviación típica de las humedades de las distintas capas del lecho aumenta con la temperatura de entrada del aire y con la humedad inicial, como consecuencia de la acentuación de los los perfiles de humedad de granos a través del lecho (los perfiles de temperatura también se acentúan). Obsérvese que, para granos con $W_0 > 0,22$, el valor máximo de $S_w = 0,025$ dec., b.s., resultaría ser un índice de calidad aún más sensible que la germinación media.

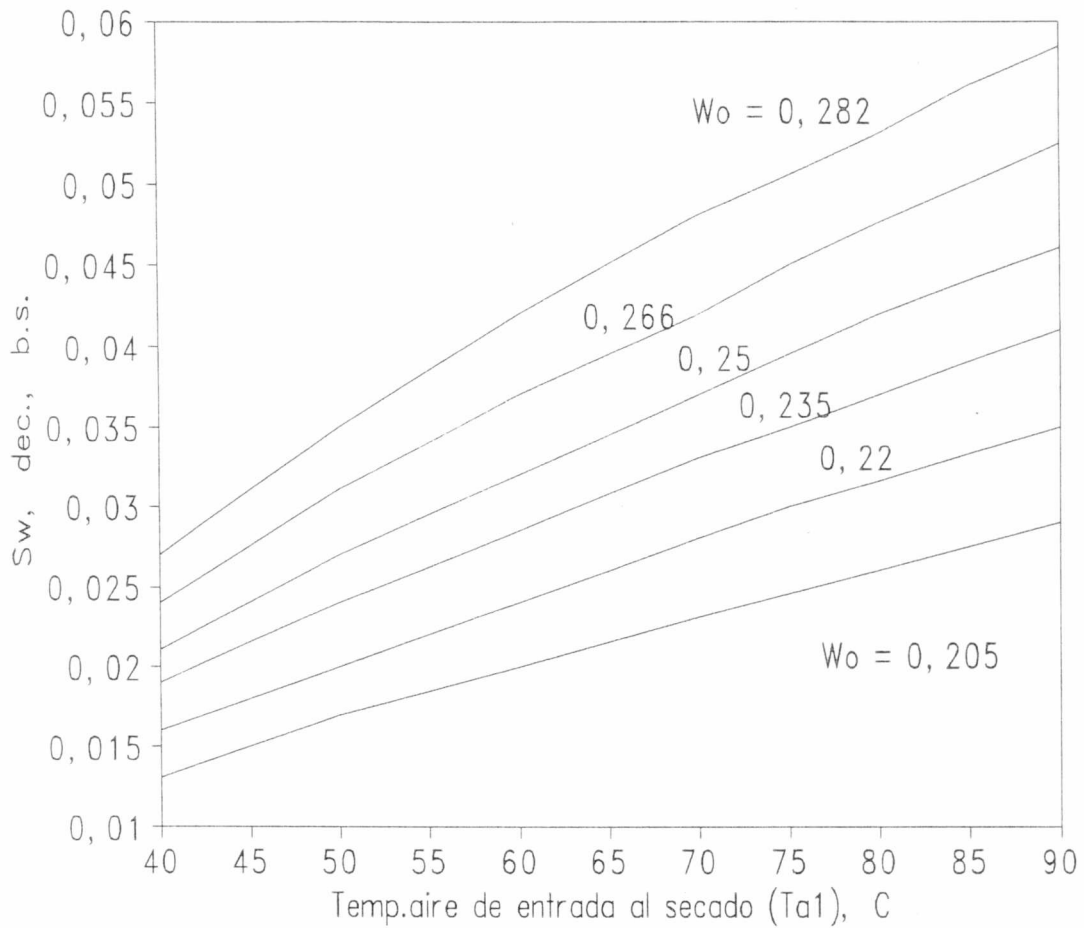


Figura 10.11. Efecto de la temperatura del aire sobre la heterogeneidad final del lecho, a distintas humedades iniciales del grano

Dada la alta heterogeneidad provocada por el tratamiento convencional, se evaluará en secciones posteriores, la influencia de cambiar el sentido del flujo de aire durante la etapa de secado, de manera de atenuar los perfiles a través del lecho. A continuación, se observará el desarrollo de tales perfiles.

Secadoras continuas de trigo

10.2. Secadora continua con secado y enfriamiento

10.2.1 Predicción de curvas de humedad y temperatura de grano en secadora convencional.

Un aspecto importante de la utilización del programa de simulación es la de predecir las curvas de humedad y temperatura del grano a distintas posiciones dentro del espesor del lecho o columna, para condiciones de secado y enfriamiento consecutivos. Con este fin, se eligieron las condiciones operativas siguientes:

Grano

-Humedad inicial : 17% b.h. ---> $W_0 = 0,205$ dec., b.s.

-Humedad salida: 14% b.h. ---> $W_{\text{media de salida}} = 0,163$ dec., b.s.

-Temperatura inicial: $T_0 = 25^\circ\text{C}$

-Germinación inicial: $G_0 = 100\%$

Aire

$-G_{\text{a secado}} = G_{\text{a enfriamiento}} = 0,3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$

$-T_{\text{al secado}} = 75^\circ\text{C}; T_{\text{al enfriamiento}} = T_{\text{amb}} = 25^\circ\text{C}$

- Humedad relativa ambiente: $h_{r \text{ amb}} = 70\%$

Secadora

-Se considera una columna de 8 m de alto por 4 m de ancho, donde el área de secado es 3 veces mayor a la de enfriamiento. ---> $S_s = 24 \text{ m}^2; S_e = 8 \text{ m}^2$

- Se tomó el espesor de lecho habitual de 0,30 m igual en secado y enfriamiento.

Las evoluciones de humedad y temperatura del grano se muestran en la Figura 10.12.

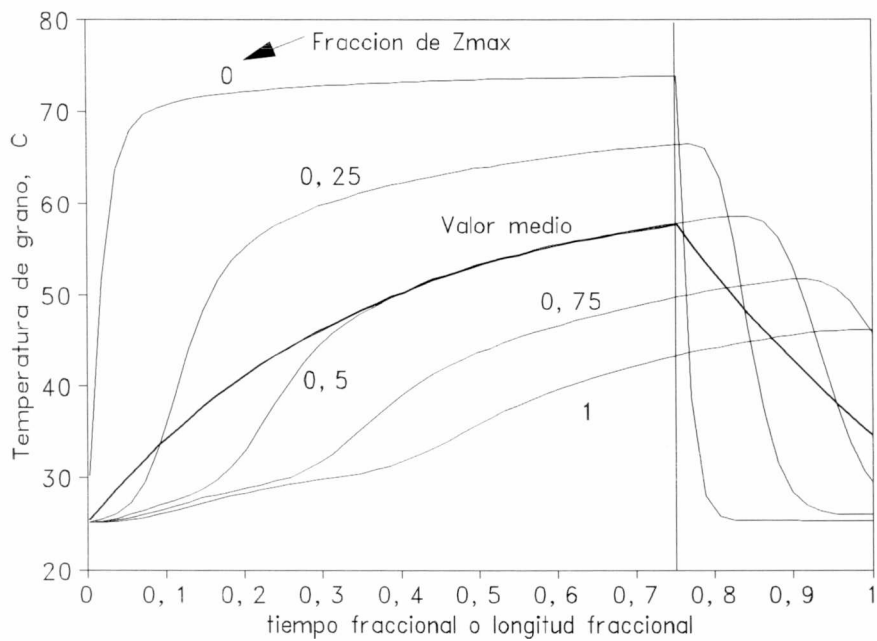
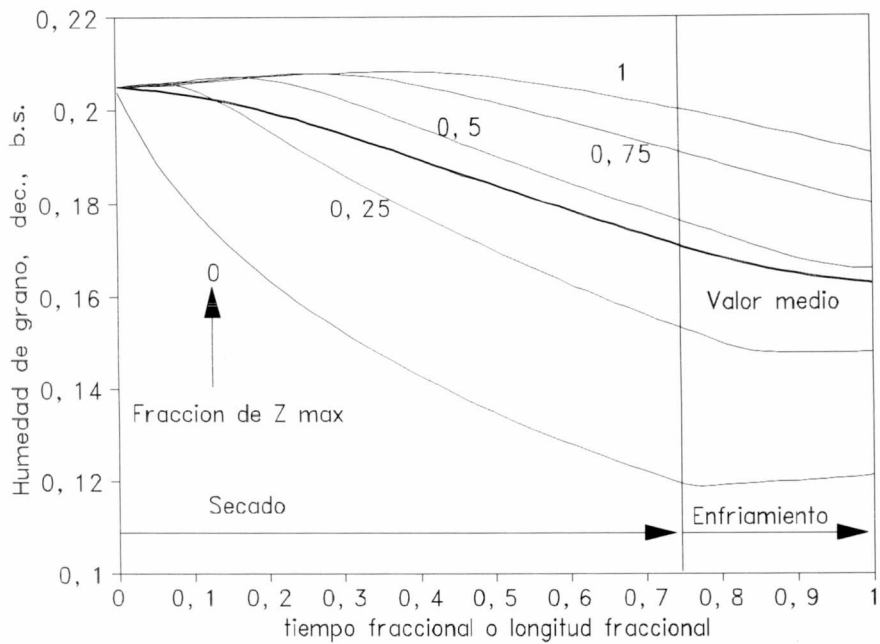


Figura 10.12. Humedades (gráfico superior) y temperaturas (gráfico inferior) de los granos en función del tiempo fraccional de la operación de secado/enfriamiento

Secadoras continuas de trigo

Análisis de las predicciones en relación a la Figura 10.12.

Para las condiciones de la Figura 10.12, los parámetros de comportamiento predichos fueron: tiempo de residencia, $t_T = 54,5$ min, que por la relación de S_s a S_e da un $t_s = 40,8$ min y $t_e = 13,6$ min. El caudal de materia seca por unidad de área de secado (\dot{m}_d/S_s) fué de 294 kg/(m² h). El caudal de granos húmedos (\dot{m}_w) que puede alimentarse a la secadora en estas condiciones fué de $8,5$ t/h, por columna, por lo que si la máquina trabajara con 4 columnas en paralelo, como es habitual (CEDAR, 1994), el caudal total procesable sería de 34 t/h.

La temperatura media de salida de los granos fué de $34,7^\circ\text{C}$, es decir unos 10°C por encima del valor ambiente, el C_{cc} alcanzó $4,52$ MJ/kg (1080 kcal/kg), mientras que la germinación media de salida fué de 98% . Así, en estas condiciones ($T_{a1} = 75^\circ\text{C}$, $W_0 = 0,205$) prácticamente no se afecta la germinación del grano.

La gráfica de humedades (Figura 10.12, gráfico superior) permite ver que, a partir de $z = 0,25 Z_{max}$ se predice una rehidratación inicial mínima del grano (capítulo 7). Se observa, asimismo, que la humedad media del lecho no coincide con la de la capa situada a $z = 0,5 Z_{max}$, y que el enfriamiento, en estas condiciones, produciría una deshidratación adicional de alrededor de $0,5\%$ b.s. ($0,005$ dec., b.s.), permitiendo un cierto ahorro de energía a expensas del calor sensible acumulado por el grano. Obsérvese que la capa de granos próxima a la entrada del aire de enfriamiento ($z=0$) se rehidrata durante esta etapa por presentar una humedad muy baja.

La gráfica de temperaturas (Figura 10.12, gráfico inferior) indica que los granos ubicados cerca de $z \approx 0$ son los únicos cuya temperatura tiende a la del aire de entrada; ya para $z = 0,25 Z_{max}$, el calentamiento no es demasiado brusco, lo que explica la ausencia de daño a la germinación. Esto resulta de no haberse verificado la coexistencia de temperaturas altas y humedades elevadas en la mayor parte del lecho. Obsérvese, en $z = Z_{max}$, que la inestabilidad inicial de la curva de temperatura es debida a la liberación de calor producida por la condensación de agua en los granos (capítulo 7).

Otra característica es que la capa más caliente de los granos se vuelve rápidamente la más fría a poco de comenzar el enfriamiento, y que las otras zonas de la columna demoran en enfriarse, a tal punto que la capa ubicada en $z = Z_{\max}$ "no alcanza a enterarse" de la existencia del enfriamiento. El valor medio final de la temperatura del lecho ($34,7^{\circ}\text{C}$) muestra que el enfriamiento es insuficiente, lo cual es común cuando se remueve poca humedad durante el secado previo con aire caliente. La solución a este problema podría ser la modificación del diseño de la secadora para aumentar el tiempo de enfriamiento t_e , esto es, aumentar la relación S_e/S_s (Nellist, 1987), o bien utilizar un G_a en enfriamiento mayor que en secado. El consumo específico fué relativamente bajo ($4,52 \text{ MJ/kg}$ de agua evaporada) en comparación con los de la mayoría de los 16 ensayos de secadoras descriptos en el capítulo 9. Esto resulta de emplear lechos de mayor espesor ($0,30 \text{ m}$) con un flujo de aire más bajo ($0,3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$), lo que permite un mayor aprovechamiento de la energía térmica.

Así, para condiciones homogéneas de flujo y temperatura del aire a la entrada de la zona de secado, el uso de lechos de $0,30 \text{ m}$ y temperaturas de 75°C permiten secar trigo de 17% a 14% b.h sin daño a la viabilidad, pero se observa, sin embargo, que el enfriamiento es insuficiente.

Se observará a continuación el efecto del flujo de aire en el comportamiento de la secadora.

10.2.2. Efecto del flujo de aire en la operación de secadoras de flujo cruzado con secado y enfriamiento

Las simulaciones realizadas hasta ahora han utilizado un flujo de aire en la zona de secado G_{as} de $0,3 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$, como valor promedio típico. Asimismo, hasta aquí el enfriamiento fué modelado usando el mismo flujo de aire que en secado ($G_{ae} = G_{as}$), que se ha visto puede ser insuficiente para enfriar granos luego de secados cortos. Se considera

Secadoras continuas de trigo

necesario estudiar, en principio, el efecto de G_{as} en parámetros de comportamiento de la secadora, y, asimismo, en otro parámetro, la potencia de ventilación involucrada. Se observarán resultados para las condiciones operativas de la Figura 10.12, excepto que el flujo de aire ($G_{as} = G_{ae}$), se varía ahora entre 0,25 y 0,4 $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$, y que los estudios incluyen dos niveles de humedad inicial de grano: 0,205 y 0,250 dec., b.s.

Efecto del flujo de aire en la capacidad de secado

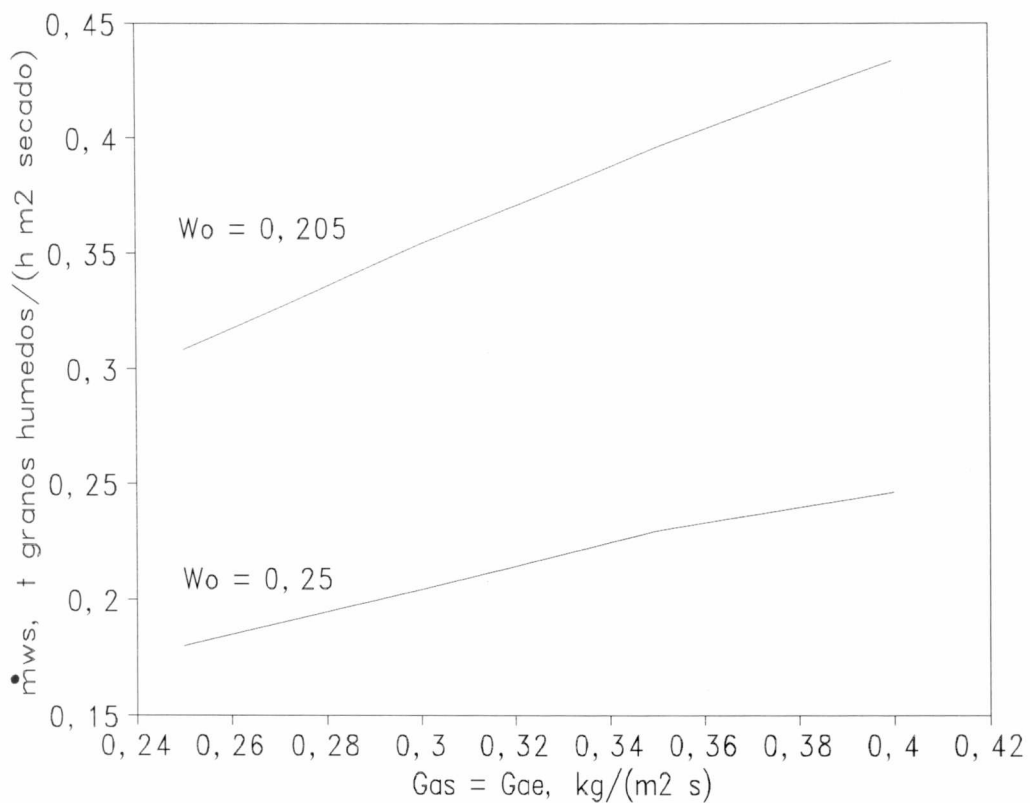


Figura 10.13: Efecto del flujo del aire en la capacidad de secado de granos húmedos.

Para ambas W_0 , la Figura 10.13 muestra que mayores valores del flujo de aire permiten secar una mayor cantidad de granos como consecuencia de la reducción del tiempo de secado. La capacidad de secado de trigo depende aproximadamente de $Ga^{0.7}$, de forma tal

que al duplicar el caudal de aire no se alcanza a duplicar la capacidad de secado.

En la Figura 10.14, se observará el efecto de G_a en la humedad relativa media del aire de salida de la parte de secado.

Humedad media de salida del aire de secado

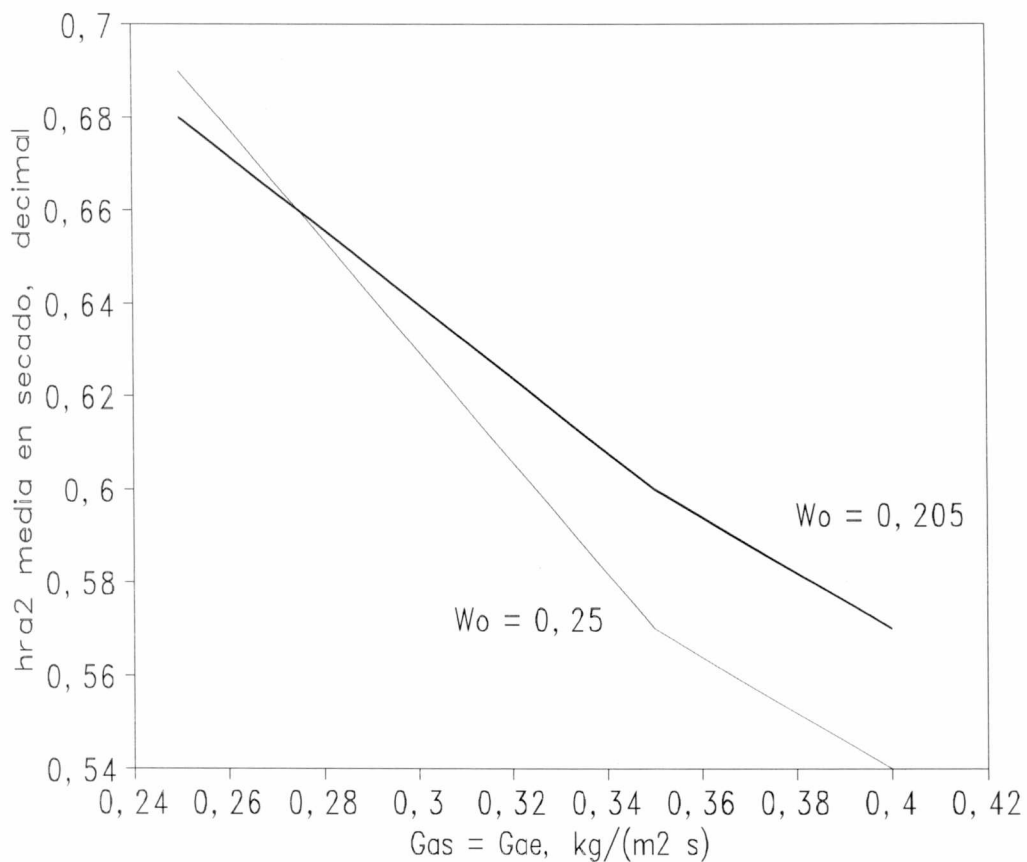


Figura 10.14: Efecto del flujo del aire sobre la humedad relativa media del aire de salida de la parte de secado, para dos humedades iniciales de grano.

Dado que se ha demostrado que el flujo de aire (en convección forzada) no afecta realmente la velocidad de secado de granos individuales (alto Biot de materia, capítulo 6), el aumento de G_a no puede reducir el tiempo de secado a través de un efecto fluidodinámico, sino por el hecho de que mayores flujos de aire se enfrían menos en su paso por el lecho,

Secadoras continuas de trigo

y se saturan menos, manteniendo más altas las fuerzas impulsoras de transferencia de calor y materia. Esta es la interpretación que se da a la reducción predicha de h_{ra2} con el aumento de G_a .

El hecho de que la curva de mayor humedad inicial de granos conduzca a una menor humedad relativa media del aire de salida (en la mayor parte del rango de G_a) puede explicarse sobre la base de que involucra mayores tiempos de secado, en la última parte de los cuales el aire sale muy poco saturado por la muy reducida velocidad de secado de granos con altos gradientes intrapartícula.

El cruce de las curvas se debe a que, a bajos caudales de aire, el efecto de una mayor velocidad inicial de secado causada por la mayor humedad inicial del grano prevalece sobre la disminución de la saturación final, comparado con el caso de menor W_0 .

Un criterio que suele adoptarse en el diseño práctico de secadoras es que el aire salga del secado con una humedad relativa media del 50% (0,5) (Mayol, 1985), de manera de tener una buena capacidad de secado con un consumo específico no muy alto. Según este criterio, sería necesario utilizar valores de G_a de aproximadamente $0,4 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$ o mayores. Sin embargo, la potencia de ventilación depende aproximadamente de $G_a^{2,5}$, lo que limita la posibilidad de usar flujos elevados de aire. Se verá a continuación el gráfico de potencia.

Potencias de ventilación

La Figura 10.15 indica que aumentos de G_a de $0,25$ a $0,4 \text{ kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$, un 60% de incremento, provocan aumentos de potencia de ventilación de alrededor del 240%, tanto para secado como para enfriamiento. Así, el caudal debe mantenerse al límite mínimo compatible con un funcionamiento correcto de la secadora.

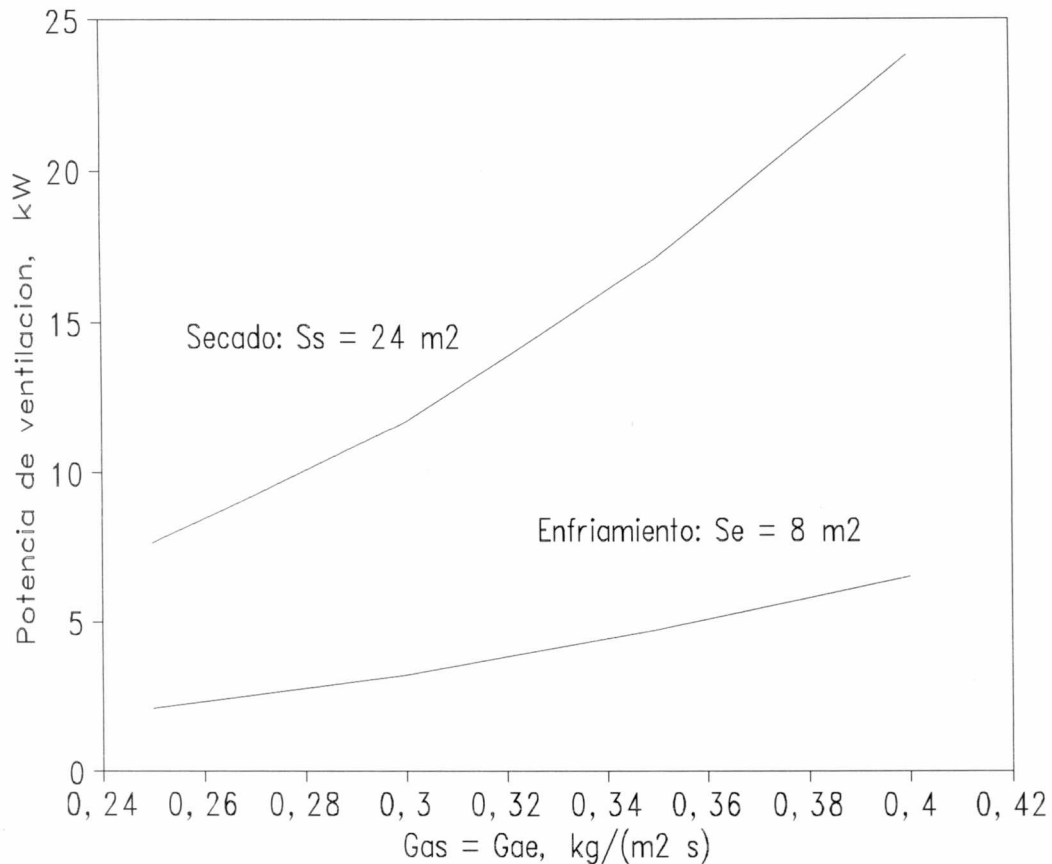


Figura 10.15: Potencia de ventilación en zonas de secado ($S_s = 24 \text{ m}^2$) y enfriamiento ($S_e = 8 \text{ m}^2$; $G_{ac} = G_{as}$), en función del flujo de aire.

Para complementar el análisis, se estudiará el efecto del flujo de aire sobre el consumo específico de energía (C_{ee}) (Figura 10.16)

Para ambas humedades iniciales del grano, se observa que el C_{ee} crece un 14% con un 60% de aumento en G_a . Esto es debido a que G_a hace aumentar el consumo de energía en mayor medida de lo que reduce el tiempo de secado de trigo en lecho fijo. En consecuencia, ello se traduce en otra restricción al uso de caudales elevados, aparte del muy importante incremento de potencia de ventilación. Se considera que un flujo de $0,3 \text{ kg}/(\text{m}^2\text{s})$ sería un valor razonable, al menos en la parte de secado.

Secadoras continuas de trigo

Consumo específico de energía térmica

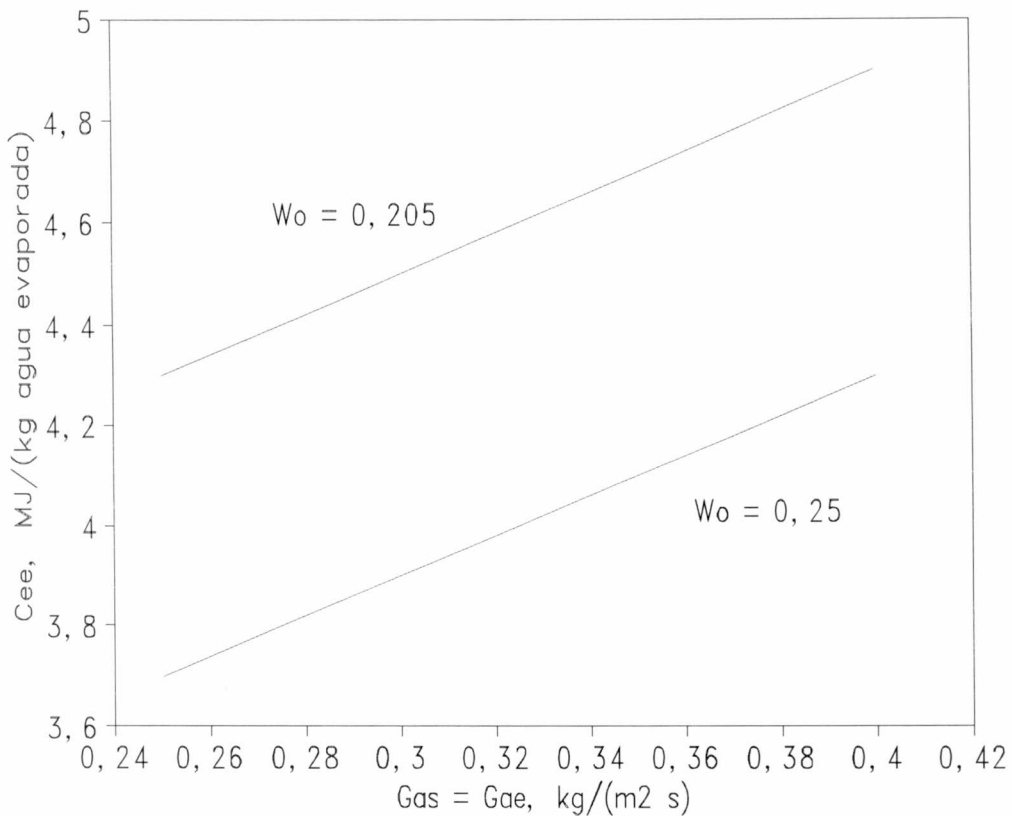


Figura 10.16: Consumo específico de energía térmica en función del flujo de aire en la secadora

Enfriamiento de los granos

Con respecto a la capacidad de enfriamiento, se ha visto en la Figura 10.12, que para secados cortos (por ejemplo, de $W_0 = 0,205$ a un valor final medio de 0,163), la temperatura de salida media era de 34,7°C, peligrosa para el almacenamiento posterior. Como se ha indicado, el enfriamiento debe proveer un grano cuya temperatura de salida no supere en más de 5°C el valor ambiente. Para esto, se realizaron simulaciones en las mismas condiciones que las de la Figura 10.12, pero ahora con un G_{ae} distinto al de la parte de secado. La Tabla 10.1 muestra los cambios observados en los parámetros de comportamiento:

Tabla 10.1. Capacidad de enfriamiento de una secadora de trigo. Comparación de los parámetros de comportamiento predichos para el secado/enfriamiento de trigo entre las condiciones de la Figura 10.12 y otra con mayor flujo de aire en enfriamiento

Condiciones operativas	Caso Figura 10.12	Caso con enfriamiento reforzado
$S_s = 24 \text{ m}^2$ $S_e = 8 \text{ m}^2$	$G_{as} = G_{ae} = 0,3$ $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$	$G_{as} = 0,3 ; G_{ae} = 0,4$ $\text{kg}/(\text{m}^2 \text{ s})$
$t_T, \text{ min}$	54,5	55,5
$\dot{m}_w, \text{ t/h}$	8,50	8,34
$T_{\text{media de salida}}, \text{ }^\circ\text{C}$	34,7	29,6
$C_{ec}, \text{ MJ/kg}$	4,51	4,61
$G_{\text{media de salida}}, \%$	97,8	97,8
$S_w, \text{ dec.}, \text{ b.s.}$	0,0201	0,0197
$P_{el} \text{ secado}, \text{ kW}$	11,7	11,7
$P_{el} \text{ enfriamiento}, \text{ kW}$	3,2	6,5
$P_{el} \text{ total}, \text{ kW}$	14,9	18,2

La Tabla indica que, para una $T_{amb} = 25^\circ\text{C}$, ha sido necesario aumentar el G_{ae} un 33% respecto del valor de G_{as} , para obtener granos con una temperatura de salida que no supere en más que 5°C el valor ambiente. Dada la relación S_s a S_e , el aumento del flujo de aire en el enfriamiento conduce a un aumento de la potencia eléctrica total del 22%, que se traslada a costos de inversión y, en menor medida, a los costos operativos. Se puede observar, asimismo, un ligero aumento del tiempo de residencia total y, por consiguiente, una leve reducción del caudal de granos húmedos.

Secadoras continuas de trigo

Relacion de consumos de energía para calentamiento del aire y ventilación

A efectos de relacionar la magnitud del consumo de energía en los ventiladores con aquel necesario para el calentamiento del aire de secado, se utilizarán los datos de la Tabla 10.1. Para calcular el consumo de energía térmica por unidad de tiempo (C_e), se debe multiplicar el C_{ee} por la velocidad de evaporación (\dot{m}_{ev}).

El valor de $\dot{m}_{ev} = \dot{m}_d (W_0 - W_{media\ de\ salida})$, donde $\dot{m}_d = \dot{m}_w / (1 + W_0)$. Así, en el primer caso de la Tabla 10.1, \dot{m}_{ev} resulta de 0,0823 kg agua/s, dando un $C_e = 0,371$ MJ/s, equivalente a 371 kW. La relación de potencia eléctrica total a potencia térmica resulta entonces de $14,9/371 = 0,04$, es decir un 4%. En el caso de enfriamiento reforzado, tal relación da 4,9%. Si bien las relaciones parecen bajas, debe notarse que el kW eléctrico es más costoso que el térmico, por lo que la proporción de costo es mayor. Por otra parte, una proporción mayor que el 5% del costo de energía no constituye un costo despreciable, sino un valor que debe limitarse. De todas formas, el impacto mas evidente de una mayor potencia de ventilación se nota en el aumento del costo de adquisición de la secadora.

10.2.3. Mejoras en la homogeneidad del tratamiento: simulación de secadoras de flujo cruzado con cambio de dirección del flujo de aire

En esta sección se estudiará el efecto del cambio de dirección del aire, a efectos de reducir la heterogeneidad del tratamiento. Esto requerirá modificar el programa de simulación. Por el momento, se trabajará con condiciones de igual flujo de aire en secado y enfriamiento (0,3 kg/(m² s)).

Dávila y colab. (1983) estudiaron experimentalmente y por simulación el secado discontinuo de arroz cáscara en lecho fijo, cambiando periódicamente el sentido del flujo de aire, a fines de reducir la falta de homogeneidad característica de estos sistemas de secado.

La adaptación de esta idea a las secadoras de flujo cruzado fué realizada en Argentina

por IRADI (1989), para sus máquinas de construcción modular, las que, pensadas para maíz (cuyo secado es "largo"), eran fabricadas con varios cambios de dirección en la zona de secado y al comenzar el enfriamiento.

Interpretación del cambio de dirección del aire en el programa

Para simular cada cambio de dirección del flujo de aire, el programa principal llama a una subrutina que reordena las capas en las que está imaginariamente dividido el lecho: las capas ubicadas en $z = 0$ y $z = Z_{\max}$ trocan posiciones, lo mismo que las ubicadas en $z = \Delta z$ y $Z_{\max} - \Delta z$; el método es similar para las restantes capas, y se lo emplea para las tres variables del grano en las capas: humedad, temperatura y germinación.

Número de cambios de dirección utilizados

En trabajos realizados con anterioridad a esta tesis, se ha simulado el secado de maíz en flujo cruzado con diversos esquemas de cambio de dirección del aire y se concluyó que con un sólo cambio en la zona de secado ($t = 0,5 t_s$) y otro al comenzar el enfriamiento ($t = t_s$) era suficiente, dado que más cambios no produjeron mejoras ulteriores. No se encontraron estudios para trigo sobre el efecto de los cambios de dirección del aire, pero se siguió aquí esta conclusión de la investigación previa, esquematizada en la Figura 10.17.

A su vez, la Figura 10.18 muestra la necesidad de construir la secadora por módulos, a efectos de obtener los cambios de dirección del aire (IRADI, 1989). Se observa una sólo columna de secado por claridad, pero las máquinas reales incluyen de 4 a 6 trabajando en paralelo, como se mostró en el capítulo 1.

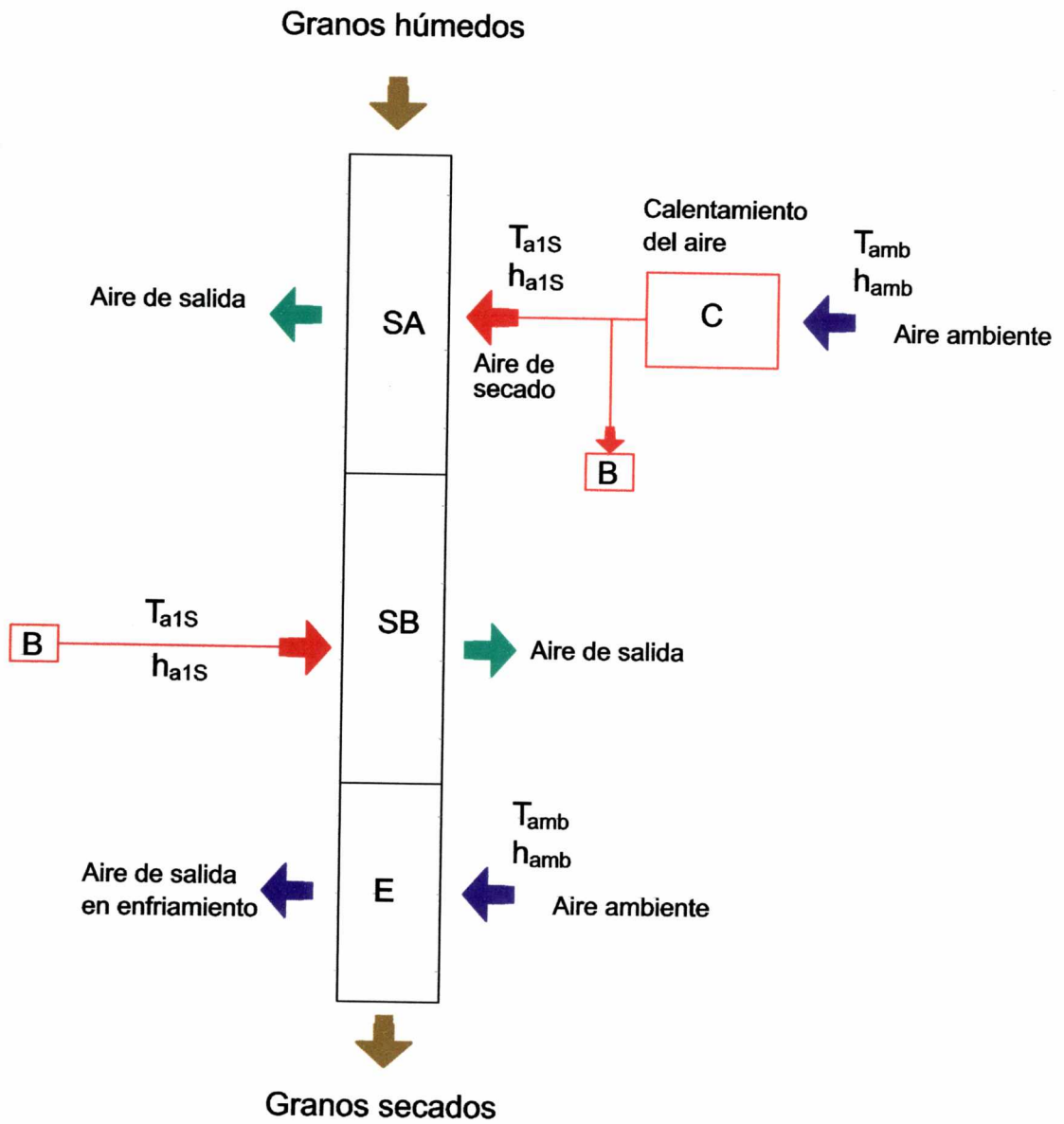


Figura 10.17: Esquema de una secadora de flujo cruzado con un cambio de dirección de flujo de aire en secado y otro al comenzar el enfriamiento

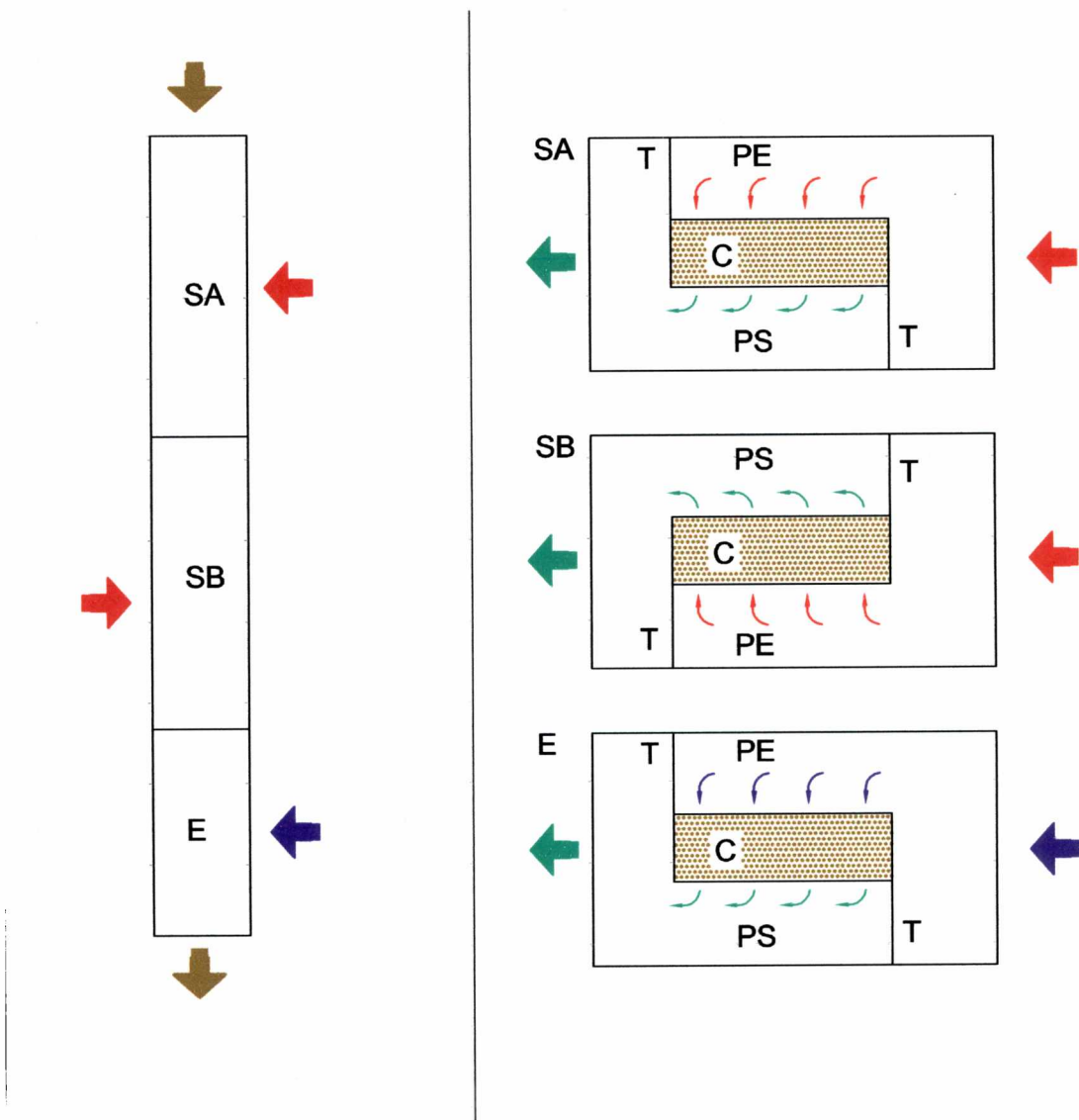


Figura 10.18: Parte izquierda: esquema de la misma secadora de la Figura 10.17. Parte derecha: Vista en planta de los módulos SA, SB y E, similares a los empleados en secadoras reales para lograr los cambios de dirección del aire. Flechas: flujo de aire. C: columna de granos. PE: Plenum de entrada de aire. PS: Plenum de salida de aire. T: Tabiques utilizados, que, al reubicarse, permiten cambiar el sentido del flujo del aire

Los resultados comparativos de los perfiles de humedad y temperatura en el lecho, a la salida de la zona de enfriamiento, para los casos convencional y con un cambio de dirección, se observan a continuación en la Figura 10.19.

Secadoras continuas de trigo

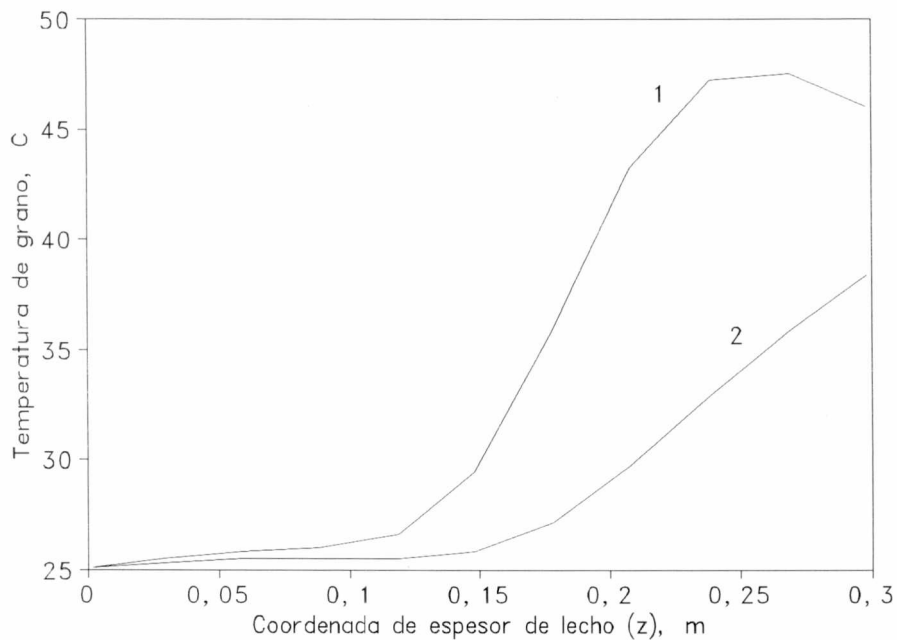
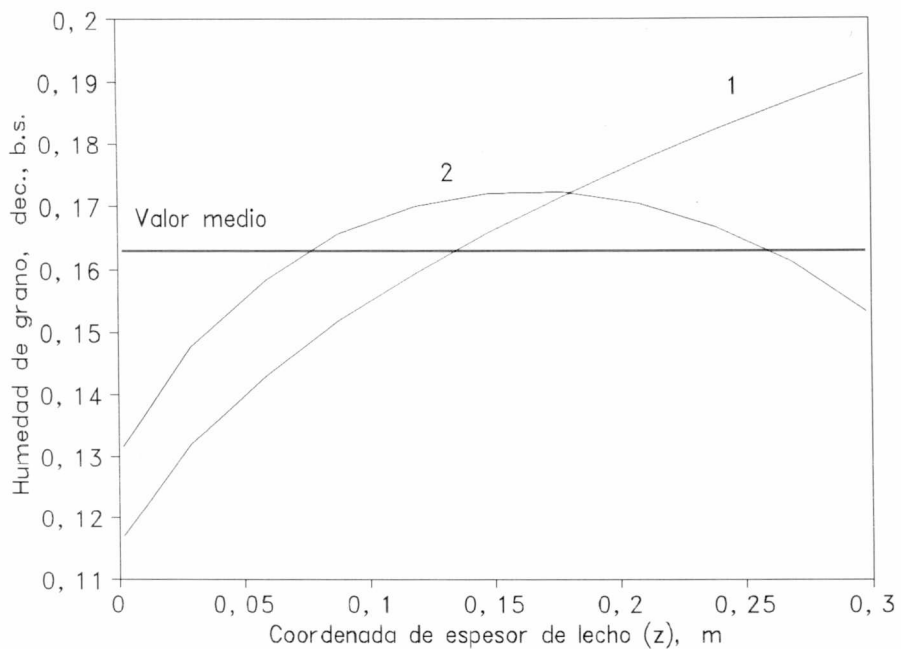


Figura 10.19: Resultados comparativos de perfiles de humedad (gráfico superior) y temperatura de grano (grafico inferior) en el lecho para los casos convencional (1) y con cambios de dirección del aire en la mitad de la zona de secado y al comenzar el enfriamiento (2)

Simulación y diseño de secadoras continuas

Puede observarse que el caso convencional presenta pronunciados gradientes predichos de humedad (de 0,118 en $z = 0$ a prácticamente 0,19 en $z = Z_{max}$) y de temperatura, los cuales son notoriamente reducidos, según el modelo de simulación, usando cambios de dirección del aire. Para el nuevo caso, las diferencias máximas de humedad van de 0,13 en $z = 0$ y 0,17 en $z = Z_{max}/2$. La Figura 10.20 muestra las diferencias de los parámetros de comportamiento para los casos convencional y con cambios de dirección de aire.

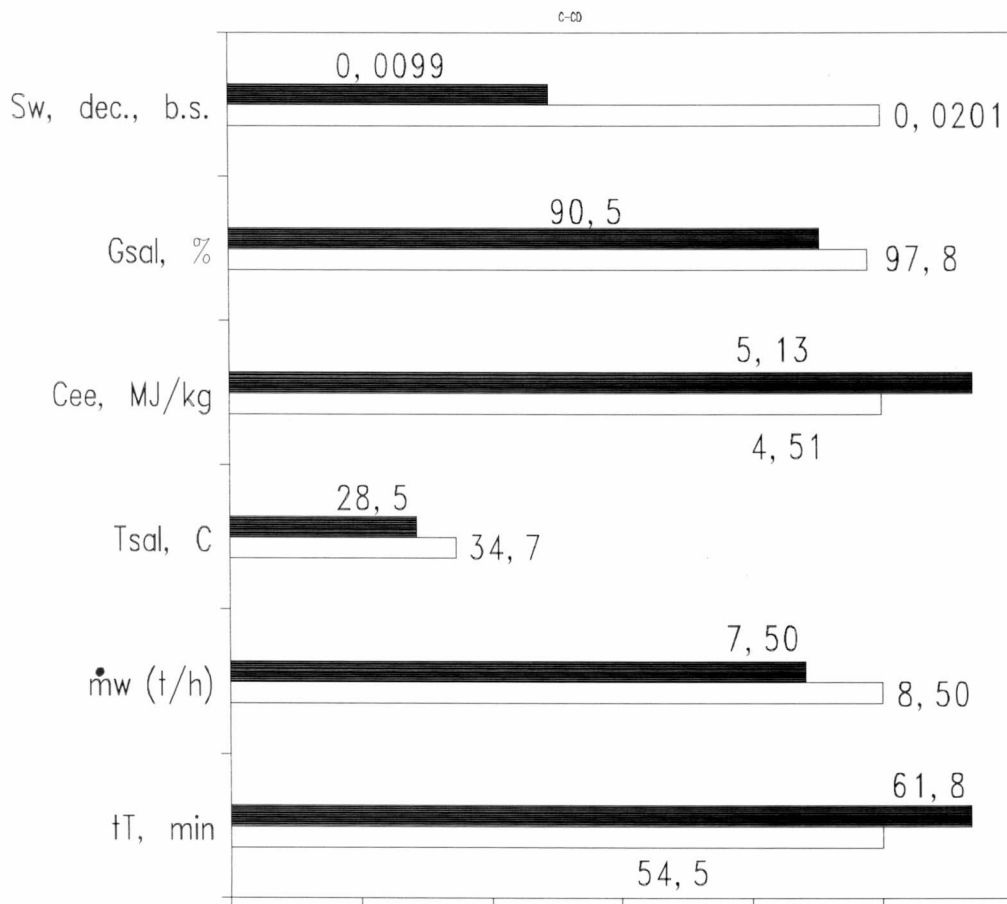


Figura 10.20. Parámetros de comportamiento de la secadora convencional (barras vacías) y de la versión con cambios en la dirección del aire (barras llenas).

Secadoras continuas de trigo

La Figura 10.20 permite observar que la heterogeneidad del lecho, medida por S_w , se reduce en más de un 50% del valor que presentaba en el secado convencional. También se observa, al igual que en trabajos previos en maíz, que el tiempo de residencia aumenta un poco más del 10%, determinando una disminución similar en \dot{m}_w , y un ligero aumento del consumo específico. Sin embargo, dado que el grano está más tiempo en la secadora, y por ende en la etapa de enfriamiento, la temperatura de salida es menor y aceptable, aún para este caso donde el flujo de aire en enfriamiento es igual que en secado. Por otra parte, se observa que el tratamiento con cambios de dirección del aire produce una pérdida de calidad algo mayor que el secado convencional: en el nuevo caso, la germinación de salida es de 90,5%, valor todavía aceptable, pero 7% menor que en el secado convencional. Es evidente que la inversión del flujo de aire expone una mayor proporción del lecho a condiciones simultáneas de alta humedad-alta temperatura. Por consiguiente, si bien para este secado desde $W_0 = 0,205$, el índice de calidad final sería todavía aceptable, debería considerarse una reducción de la temperatura de entrada del aire de 75°C a 70°C para casos donde el trigo ingrese más húmedo.

La conclusión del cambio de dirección del aire es que reduce mucho la heterogeneidad del secado, y mejora sustancialmente la capacidad de enfriamiento sin potencia adicional de ventilación; presenta la pequeña desventaja de disminuir ligeramente el caudal de granos y el poder germinativo final, y de aumentar levemente el consumo específico.

El consumo específico, no obstante, puede reducirse por medio de la recirculación de aire. En la próxima sección se estudian diversos casos de recirculación.

10.2.4. Simulación de secadoras de flujo cruzado con recirculación de aire

La Figura 10.21 muestra un esquema de una columna de secadora de flujo cruzado en secado/enfriamiento, con recirculación de aire.

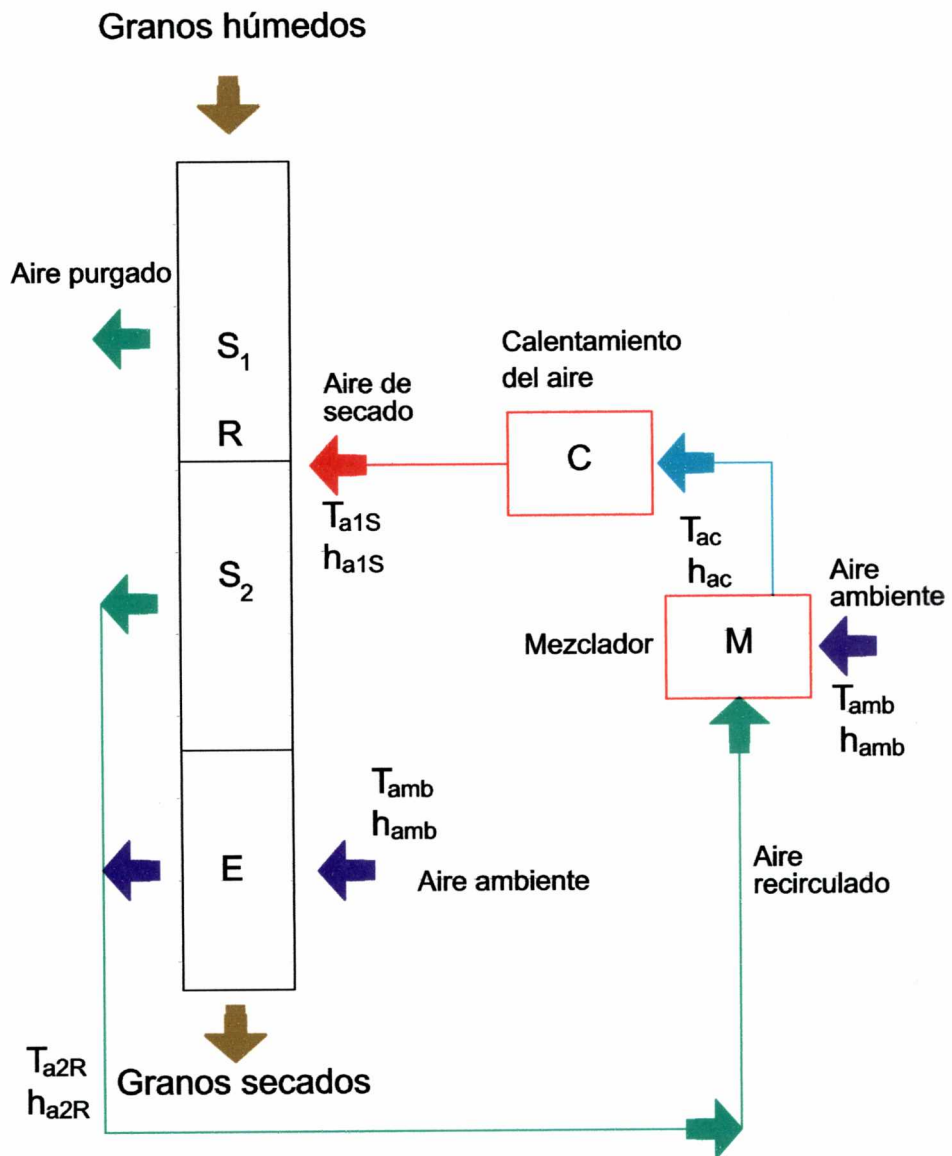


Figura 10.21: Esquema de columna de flujo cruzado con recirculación de la parte inferior del aire de salida del secado mas el aire de salida del enfriamiento.

Secadoras continuas de trigo

Aspectos de la operación con recirculación de aire

Dado que el aire que sale de la zona del tope de la secadora es húmedo y de baja temperatura, el mismo no resulta conveniente para recirculación. Por consiguiente, se considerará la recirculación de la una fracción inferior del aire de salida del secado más todo el de salida del enfriamiento. Este tipo de sistema de recuperación de calor involucrará, como se podrá observar, un agregado de potencia de ventilación para compensar la pérdida de carga adicional de los conductos de recirculación, pero se estima que la misma no puede ser importante, de estar correctamente construida y en buen estado de mantenimiento.

A efectos de calcular la secadora con recirculación en estado estacionario, el programa de simulación debe agregar un lazo exterior adicional iterativo: el cálculo comienza con aire fresco ambiente calentado a T_{a1s} como si no tuviera recirculación, ajustándose el tiempo de residencia para obtener la humedad de salida deseada (capítulo 9). Ahora, sin embargo, se requiere que se establezca el lazo del aire recirculado. Deben calcularse la humedad absoluta media y la temperatura media de la mezcla de corrientes de aire de salida de una fracción inferior del secado (fracción f_{ts} de la sección S_s) más el aire de salida del enfriamiento. Ese aire, de temperatura T_{a2R} y humedad absoluta h_{a2R} , se recircula (asumiendo que no pierde calor) y, eventualmente, se lo mezcla (mezclador M, Figura 10.21) con la proporción de aire "fresco" ambiente necesario para completar el caudal de aire ($G_{as} S_s$) que debe ser reintroducido en la parte de secado. El aire de enfriamiento sigue siendo tomado del ambiente. La temperatura del aire resultante del mezclado (T_{ac}) será más alta que T_{amb} , lo cual se traduce en un ahorro de energía; sin embargo, la humedad de ese aire (h_{ac}) será también más elevada, lo que en principio haría más lento el secado; si el segundo efecto es pequeño, se podrá reducir el consumo específico.

Método de cálculo de secadora con recirculación

Cálculo de humedad absoluta y temperatura del aire recirculado

Se realizarán balances en la parte de la secadora correspondiente a aire de salida recirculado (partes SB y E, Figura 10.21)

La humedad absoluta del aire recirculado, se obtiene con la ecuación siguiente:

$$h_{a2R} = \frac{\dot{m}_d(W_R - W_{sal}) + G_{as} S_s f_{rs} h_{a1s} + G_{ae} S_e h_{amb}}{G_{as} S_s f_{rs} + G_{ae} S_e} \quad (10.3)$$

donde W_R es la humedad media del lecho en el punto "R" (Figura 10.21) donde comienza a recircularse el aire. El subíndice "sal" indica valores medios del lecho de granos a la salida de la secadora. Debe indicarse que h_{a2R} depende de h_{a1s} , la humedad de entrada del aire a la parte de secado, que no es dato en la operación de recirculación, debiendo ser estimado iterativamente. Para calcular la temperatura media del aire recirculado (T_{a2R}), el balance en la misma parte de la secadora resulta análogo, reemplazando las humedades medias del lecho de granos y las humedades absolutas de aire por las entalpías correspondientes:

$$H_{a2R} = \frac{\dot{m}_d(H_R - H_{sal}) + G_{as} S_s f_{rs} H_{a1s} + G_{ae} S_e H_{amb}}{G_{as} S_s f_{rs} + G_{ae} S_e} \quad (10.4)$$

$$T_{a2R} = \frac{H_{a2R} - L_{w0} h_{a2R}}{C_{pa} + C_{pv} h_{a2R}}$$

donde la entalpía de los granos en el punto "R" y a la salida se calcula con:

$$H_R = (C_{ps} + C_{pw} W_R) T_R \quad (10.5)$$

$$H_{sal} = (C_{ps} + C_{pw} W_{sal}) T_{sal}$$

El aire recirculado se envía al mezclador M (Figura 10.21). Si su caudal es mayor que el necesario para la zona de secado, debe desecharse parte del aire recirculado. Si es menor, como lo será en los cálculos a realizar aquí, debe mezclárselo con una porción de aire ambiente ("aire fresco") de reposición. El balance de aire seco en el mezclador resulta:

Secadoras continuas de trigo

$$\dot{m}_{af} = G_{as} S_s - [G_{as} S_s f_{rs} + G_{ae} S_e]$$

$$\text{o bien} \quad (10.6)$$

$$\dot{m}_{af} = G_{as} S_s (1 - f_{rs}) - G_{ae} S_e$$

que indica la necesidad de reponer parte de aire fresco si $\dot{m}_{af} > 0$.

Calculo de la humedad y temperatura del aire a la salida del mezclador

Definiendo $\dot{m}_{as} = G_{as} S_s$ como el caudal (masa/tiempo) del aire total ingresado a la zona de secado con aire caliente y $\dot{m}_{aR} = G_{as} S_s f_{rs} + G_{ae} S_e$ como el caudal recirculado, los siguientes balances en el mezclador "M" permitirán completar el conjunto de ecuaciones necesarias para resolver iterativamente el sistema de recirculación en estado estacionario:

Cálculo de la humedad absoluta del aire a la salida del mezclador, h_{ac}

Por medio del balance de agua en "M" (Figura 10.21), se obtiene:

$$h_{ac} = \frac{\dot{m}_{aR} h_{a2R} + \dot{m}_{af} h_{amb}}{\dot{m}_{as}} \quad (10.7)$$

Cálculo de la temperatura del aire a la salida del mezclador, T_{ac}

$$H_{ac} = \frac{\dot{m}_{aR} H_{a2R} + \dot{m}_{af} H_{amb}}{\dot{m}_{as}} \quad (10.8)$$

$$T_{ac} = \frac{H_{ac} - L_{w0} h_{ac}}{C_{pa} + C_{pv} h_{ac}}$$

El resumen del procedimiento iterativo de cálculo de la secadora con recirculación, operando con aire de secado a temperatura T_{a1s} es el siguiente. Debe indicarse que, en todos los casos, se consideró $h_{a1s} = h_{ac}$.

Simulación y diseño de secadoras continuas

- a) Se fija la fracción del caudal de aire de secado que se recircula, f_{rs} , contada desde el final de la etapa (ejemplo: si $f_{rs} = 0,333$, se purgan los primeros dos tercios del aire de secado y se recircula el tercio inferior).
- b) Se inicializa un contador de iteraciones de recirculación, $i_R = 1$.
- c) Se supone que h_{ac} y T_{ac} en $i_R = 1$ son iguales a h_{amb} y T_{amb} , respectivamente.
- d) Se corre el programa hasta ajustar el tiempo de residencia que dé la humedad de grano deseada a la salida, W_{sal} , y se calculan las humedades y temperaturas medias del aire recirculado, h_{a2R} y T_{a2R} (ecuaciones (10.3), (10.4) y (10.5)).
- e) Se incrementa el contador de iteraciones de recirculación $i_R = i_R + 1$.
- f) Se calculan las nuevas humedades, h_{ac} y temperaturas, T_{ac} del aire a la salida del mezclador (ecuaciones (10.7) y (10.8)).
- g) Se comparan los nuevos valores de h_{ac} y T_{ac} con los de la iteración anterior. Si ambos están debajo de la cota (0,0001 kg vapor/kg aire seco y 0,1°C, respectivamente), se termina la simulación, si no, se vuelve al paso d).

Distintas variantes operacionales con recirculación

Las simulaciones se realizaron para varios casos, siempre manteniendo las condiciones de la Figura 10.12, excepto en lo que hace a la humedad absoluta del aire de entrada al secado. Las situaciones simuladas fueron las siguientes:

Secadoras continuas de trigo

1- caso de referencia, sin reciclo, condiciones de la Figura 10.12 ("s/r")

2- Recirculación de la mitad inferior de aire de salida del secado más todo el de salida del enfriamiento ($f_{rs} = 0,5$) ("r 1/2 + e")

3- Recirculación del tercio inferior del aire de salida de secado más todo el de salida del enfriamiento ($f_{rs} = 0,3333$) ("r 1/3 + e")

4- Recirculación de todo el aire de salida de enfriamiento, sin recircular aire de salida del secado ($f_{rs}=0$), ("r0+e")

Los parámetros de comportamiento t_T , \dot{m}_w y C_{ee} de los 4 casos se incluyen en la tabla siguiente:

Tabla 10.2: Parámetros de comportamiento seleccionados para tres casos de operación de secadora de flujo cruzado con recirculación de aire, comparado con el caso convencional sin recirculación

Caso	h_{a1s} kg/kg	T_{ac} °C	t_T min	\dot{m}_w t/h	C_{ee} MJ/kg
1 (s/r)	0,0139 (ambiente)	25,0 (ambiente)	54,5	8,50	4,51
2 (r1/2 + e)	0,0280	44,2	64,2	7,21	3,37
3 (r 1/3 + e)	0,0220	40,2	60,1	7,71	3,53
4 (r 0 + e)	0,0160	32,6	55,9	8,28	3,95

Los resultados de la Tabla 10.2 permiten observar que el ahorro de consumo específico del caso 2 es del 25,3%, mientras que el del caso 3, del 21,7% ambos respecto del caso 1, convencional. El caso 4, donde se recircula solamente el aire de salida del enfriamiento, permite un ahorro menor: 12,4%.

La columna de T_{ac} , temperatura de entrada a la etapa de calentamiento del aire, permite observar que cuando su valor se incrementa, se obtiene menor consumo específico por ser menor el salto de temperatura ($T_{ais} - T_{ac}$) requerido. Sin embargo, la reducción de consumo específico no es directamente proporcional a la disminución de este salto de temperaturas por el hecho de que la humedad absoluta h_{ais} también aumenta, provocando un cierto aumento del tiempo de residencia (t_r) y, en consecuencia, una caída del caudal de granos procesable (\dot{m}_w) de 15,7% en el caso 2, del 9,3% en el caso 3, y del 2,6% en el 4, todos respecto del caso 1.

A pesar de esto, las reducciones del consumo muestran la conveniencia de utilizar recirculación de aire. La elección de las variantes 2, 3 o 4 dependerá del modo de trabajo de cada secadora; podría pensarse que a medida que aumenta la intensidad de uso de una secadora, la conveniencia irá pasando del caso 4 al 3 y de éste al 2. En este sentido, la Figura 10.22 muestra ahora una comparación más completa entre el caso convencional y el caso 3 de la Tabla 10.2

La Figura 10.22 muestra que si bien se produce una reducción del 9% en el caudal de granos procesados, el nuevo sistema con recirculación permite ahorrar un 22% de energía térmica por kg de agua evaporada además de causar un enfriamiento adicional de prácticamente 2°C en la capacidad de enfriamiento, debido al ligero aumento del tiempo de residencia. Otros parámetros como heterogeneidad de secado y calidad final de grano se mantienen en niveles comparables.

Secadoras continuas de trigo

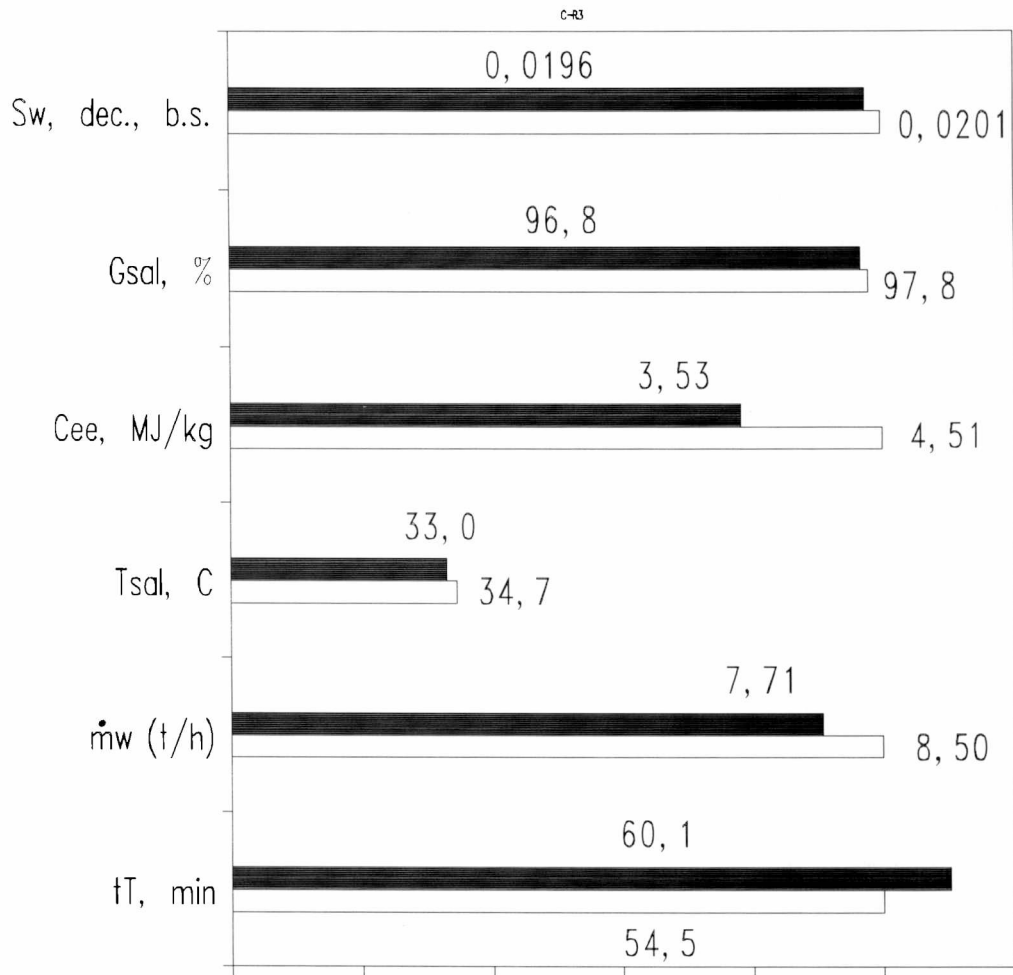


Figura 10.22. Parámetros de comportamiento de secadora convencional (barras vacías) comparados con los de un caso de recirculación de aire (barras llenas)

En vista de los resultados obtenidos, se considera necesario simular una secadora que combine cambios de dirección de aire y recirculación, a fines de reducir heterogeneidad de secado y el consumo de energía, simultáneamente.

10.2.5. Simulación de secadoras de flujo cruzado combinando cambios de dirección del flujo de aire y recirculación del aire de salida.

Si se combinan las modificaciones del programa de simulación realizadas en las secciones 10.2.3 (Figuras 10.17-10.18) y 10.2.4 (Figura 10.21), se podrá simular al mismo tiempo los cambios de dirección del aire y la recirculación. Esta última seguirá el esquema del caso 3, Tabla 10.2. La Figura 10.23 muestra la comparación de los parámetros de comportamiento con los del caso convencional.

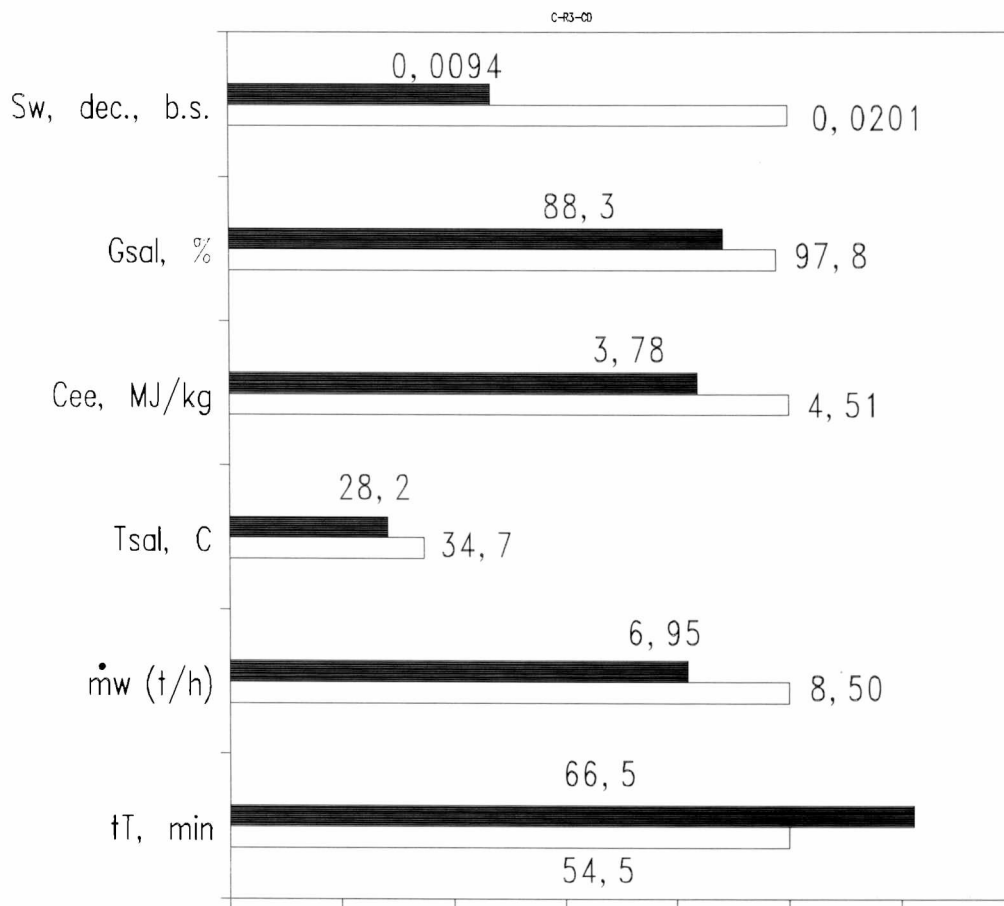


Figura 10.23. Parámetros de comportamiento de una secadora convencional (barras vacías) comparados con los de un caso combinado de cambios de dirección del aire y recirculación (barras llenas).

Secadoras continuas de trigo

El incremento del tiempo de residencia, y la reducción del caudal de granos húmedos procesable se sitúa ahora en un 18,2%, pero el consumo específico se reduce en un 16,2% y hay una disminución de la heterogeneidad del secado del 53%, llevando S_w a menos de 1% b.s., además de mejorarse sustancialmente la capacidad de enfriamiento en 6,5°C por el mayor tiempo de residencia, que permite a los granos ser enfriados correctamente (por debajo del límite tolerable de $T_{amb} + 5^\circ\text{C}$).

Con respecto a la viabilidad, el valor de germinación de salida de 88,3% resulta ligeramente afectado por los cambios de dirección del aire, como se mencionó en la sección 10.2.3, pero es un valor todavía aceptable. En este sentido, Bruce (1992) correlacionó una reducción del volumen de pan del 5% con una germinación del 75%.

Se podría concluir que una instalación que use secadoras con cambios de dirección de aire y recirculación, debería adquirir un equipo de un tamaño 18% mayor si desea procesar el mismo caudal de granos que se lograría con una secadora convencional. No obstante, el incremento de inversión se limitaría al 11% por la ley de la escala (Peters and Timmerhaus, 1980). La ventaja se obtendrá de producir granos secados con un tratamiento mucho menos heterogéneo, en un equipo que permitirá un mejor enfriamiento a igual potencia de ventilación por unidad de sección, y con la posibilidad cierta de que el menor consumo específico permitirá recuperar la mayor inversión inicial en la secadora. Asimismo, no debe perderse de vista que el grano bien secado tiende a valorizarse, dado que crece la demanda de productos de panadería obtenidos mediante levado tradicional, "biológico" de las harinas, sin aditivos químicos. Además, los trigos de buen tenor proteico y elevada calidad panadera se cotizan mejor en el mercado internacional.

Se estudiará, finalmente, la sensibilidad de los parámetros de comportamiento de la secadora frente a cambios en ciertas propiedades físicas de importancia en el modelo matemático.

10.3. Análisis de sensibilidad paramétrica del programa de simulación de secadoras de flujo cruzado

De acuerdo a la definición de Ingels (1985), los estudios de sensibilidad indican la tasa a la cual cambia una variable frente a un cambio en una segunda variable.

En nuestro caso, se provocaron cambios de $\pm 10\%$ en varias "segundas variables", que son propiedades del modelo. Las "primeras variables", fueron en este caso tres parámetros de comportamiento de la secadora como el tiempo de residencia, el caudal de granos y el consumo específico (t_T , \dot{m}_w , y C_{ee} , respectivamente). No se consideraron cambios de condiciones operativas, que ya fueron estudiados en la sección 10.1 de este capítulo. Las propiedades a variar son las siguientes:

- Coeficiente de difusión efectivo (D),

- Area específica equivalente del grano evaluada a la humedad inicial (a_{vel})

- Densidad de grano-porosidad (+5% y -5% y viceversa, para dar variaciones de densidad de lecho de aproximadamente $\pm 10\%$)

- Humedad de granos para el equilibrio sorcional, W_e

- Calor de desorción del agua, L_g .

- Coeficiente de transferencia de calor aire-grano, h_T .

Los resultados se indican en la Tabla 10.3 para el caso de secadora de flujo cruzado en las condiciones de la Figura 10.12, esto es, sin recirculación ni cambios de dirección del aire.

Secadoras continuas de trigo

TABLA 10.3. Sensibilidad paramétrica del modelo matemático de secado/enfriamiento en flujo cruzado frente a cambios en sus propiedades.

Caso		t_T min	\dot{m}_w t/h	C_{ee} MJ/kg
Base		54,5	8,50	4,51
D	+10%	- 2,5%	+ 2,5%	- 2,2%
	-10%	+ 3,1%	- 2,8%	+ 3,1%
a_{ve0}	+10%	- 4,8%	+ 4,8%	- 4,4%
	-10%	+ 6,1%	- 5,8%	+ 6,4%
$\rho_{s0} (1-\epsilon_0)$	+10%	+ 6,1%	+ 2,1%	- 1,8%
	-10%	- 6,1%	- 2,0%	+ 2,4%
W_e	+10%	+ 4,8%	- 4,7%	+ 5,3%
	-10%	- 4,8%	+ 5,1%	- 4,4%
L_g	+10%	+ 4,2%	- 4,1%	+ 4,4%
	-10%	- 4,0 %	+ 4,1%	- 3,8%
h_T	+10%	Sin efecto	Sin efecto	Sin efecto
	-10%	Sin efecto	Sin efecto	Sin efecto

Esta tabla permite observar que, excepto el h_T , la variación de todas las propiedades ejerce un marcado efecto sobre los parámetros de comportamiento.

La falta de efecto de h_T puede obedecer a las condiciones de pseudo-equilibrio que se generan entre la temperatura del aire de salida de cada capa y la temperatura instantánea de los granos en la misma. Debe indicarse que el pseudo equilibrio es térmico solamente, y no respecto de la transferencia de materia, que presenta fuerzas impulsoras considerables.

Teniendo en cuenta los resultados del capítulo de secado de granos en capa delgada (capítulo 6), respecto a la dispersión de valores del coeficiente de difusión de agua en trigo (en ocasiones hasta de un orden de magnitud), se considera que la influencia de D está entre las más importantes. A su vez, los valores de D deben usarse siempre junto a los valores de equilibrio (W_e) empleados en su ajuste original, dado que se observa que W_e también presenta un efecto importante en los parámetros de comportamiento.

El efecto del tamaño de partícula, representado por a_{ve0} , es considerable, pero su rango de variación está más acotado que el de D .

La densidad de lecho, $\rho_{s0} (1-\epsilon_0)$, presenta un efecto curioso. Es esperable que ocurra un aumento del tiempo de residencia para lechos más compactos, como lo muestra la Tabla 10.3, pero esto, en lugar de causar una disminución del caudal de granos húmedos (\dot{m}_w), produce un incremento. Esto ocurriría pues a igual volumen de secadora, la masa retenida es mayor, y eso influye más en el cálculo de \dot{m}_w que el aumento de tiempo de residencia.

El calor de desorción, dominante en secado, tiene un efecto significativo, pues sus aumentos demandan más energía del aire haciendo el secado más lento.

En consecuencia, todas estas variables deben ser cuidadosamente medidas y utilizadas en forma consistente, a fines de evitar errores acumulativos que resulten en desviaciones considerables de los parámetros de comportamiento predichos.

CAPITULO 11. CONCLUSIONES

CAPITULO 11. CONCLUSIONES

- Del Capítulo 2: Diseño de sistemas de ventilación forzada para silos y secadoras

2.1) En coincidencia con trabajos previos, se encontró que la ecuación de Ergun, que si bien acompaña correctamente la curvatura de los gráficos de Δp_u vs V , y por ende el tipo de régimen de flujo, subestima los datos de pérdida de carga en partículas de forma irregular como el trigo, que presentan un eje mucho mayor a los otros dos. Por esa cualidad los lechos de trigo presentan fuerte anisotropía. La ecuación de Ergun puede utilizarse en lechos isotrópicos o en aquellos lechos anisotrópicos donde las partículas queden orientadas en la dirección del flujo, generando un arrastre mínimo. Este tipo de empaque no es habitual en la práctica de aireación de granos en silos, donde Ergun subestima la pérdida de carga en un 40%. Esto es peligroso en un producto biológico del cual se debe extraer calor de respiración y limitar la producción de agua por el mismo mecanismo, a efectos de mantener controlado el ecosistema grano-aire-agua-microorganismos-insectos. Asimismo, el uso de la ecuación dimensional de Ergun plantea otros problemas para el diseño pues depende muy fuertemente del diámetro de partícula (D_p) y la porosidad (ϵ) del lecho, que además de ser medidas con cierto error, dependen a su vez de la variedad de grano, contenido de humedad, contenido de finos. El valor de D_p , está determinado también por el contenido de finos, mientras que el de porosidad también puede cambiar con la proporción de finos y, adicionalmente, por el método de llenado (densidad de empaque).

2.2) Los lechos de trigo operan en régimen laminar para $V < 0,03$ m/s (aireación de granos secos en silos no muy elevados). El régimen turbulento puro, $V > 2,7$ m/s, sólo podría alcanzarse si los granos se retienen con paredes perforadas, toda vez que la velocidad de mínima fluidización es de alrededor de 1 m/s. El secado de granos en secadoras continuas, con V de 0,2 a 0,4 m/s, opera, pues, en régimen de transición.

CONCLUSIONES

2.3) Cualitativamente, las ecuaciones tipo-Ergun para medios porosos consolidados

$\Delta p_u = a \mu V + b \rho V^2$ con un término laminar de flujo viscoso combinado con otro inercial turbulento interpretan correctamente la dependencia de la pérdida de carga con la velocidad superficial (V).

2.4) La pérdida de carga disminuye a ritmo creciente (parabólicamente) hasta en un 30% al aumentar la humedad del trigo entre 12,8 y 22,3% (b.h.). En ese rango, se midieron curvas de Δp_u vs V entre 0,006 y 0,42 m/s a 4 niveles de humedad. Se observó que hay una cierta relación fija entre los parámetros a y b de la ecuación tipo-Ergun que permite considerar el efecto de variables distintas de la velocidad como humedad del grano y finos a través de un sólo parámetro, a_p , cuya variación reflejará la de la pérdida de carga con tales variables.

Para trigo, la ecuación resulta $\Delta p_u = a_p V (\mu + 4 \times 10^{-5} \rho V)$ y presenta la suposición implícita que la magnitud de la influencia de propiedades del lecho sobre Δp_u no cambia con la velocidad. Esto es aceptable cuando el cambio de mecanismo fluidodinámico no es muy grande como en postcosecha de trigo, donde se pasa de la zona final de régimen laminar a una inicial de transición.

2.5) La pérdida de carga aumenta linealmente hasta un 75% cuando el contenido de finos (f) se incrementa desde 0% (grano limpio) a 10,6% p/p. La consideración de los finos es muy necesaria pues los granos pueden ser secados o aireados con contenidos de finos que en ocasiones pueden superar el 5%.

2.6) Tanto la dependencia de Δp_u con M, como aquella con f han sido interpretadas con buen ajuste mediante correlaciones específicas contenidas sólo en el parámetro a_p , mostrando la practicidad de la ecuación simplificada tipo Ergun desarrollada.

CONCLUSIONES

2.7) La pérdida de carga aumenta con la temperatura a bajas velocidades de aire, a través del aumento lineal creciente que, en un rango limitado, presenta μ con T, y disminuye a valores muy altos, donde domina la variación inversa de ρ con T. Por esto, la dependencia de la ecuación desarrollada con la temperatura puede precisar mejor, para un producto específico con un empaque dado, el cambio de régimen fluidodinámico comparada con los gráficos doble logarítmicos del factor de fricción en lechos rellenos f_k vs Re_m . Asimismo, se observó que para el rango de velocidades de secadoras de granos con aire caliente (0,2-0,4 m/s), donde prevalece un régimen de transición, la pérdida de carga no depende de T pues el efecto de la misma en el término laminar se compensa con el que ejerce sobre el turbulento.

2.8) Se desarrolló una ecuación de potencia eléctrica de ventiladores por unidad de sección transversal, basada en la ecuación de la pérdida de carga y el caudal de aire. Los valores de los gráficos están realizados para grano seco con 8% de finos, que dan un 50% de incremento de Δp_u comparado con el caso de granos limpios y a 20°C. La ecuación incluye un factor de 30% de incremento de pérdida de carga para prever el efecto de las conducciones. Para transformar la potencia requerida por el aire en potencia eléctrica requerida por el ventilador, se utilizó un rendimiento motor eléctrico-rotor del 50%. Los gráficos citados pueden ser útiles para establecer la ingeniería básica del sistema de aireación de granos secos aireados en silo, seca-aireación, secado con aire natural, y secado de granos en secadoras continuas.

2.9) La potencia de aireación de secadoras continuas aumenta un 105% cuando se incrementa la velocidad del aire de 0,3 a 0,4 m/s (33%). Esto muestra, por un lado, la importancia de establecer un valor adecuado de V debido al impacto del aumento de potencia en la inversión inicial y en los costos operativos del secado y, por otro lado, pone de manifiesto la relevancia del tema de ventilación en el diseño de secadoras.

Del capítulo 3: psicrometría y evaporación de agua pura

Psicrometría

3.1) Con el objetivo final de realizar un programa de computadora de trazado de líneas de evolución psicrométrica y cálculo de variables psicrométricas, se consideró útil realizar una descripción paso a paso de las definiciones de variables psicrométricas, diferenciando conceptos que a menudo se confunden entre sí como grado de saturación y humedad relativa y temperatura de bulbo húmedo y de saturación adiabática.

3.2) Se mostró el fenómeno de bulbo húmedo como una forma idealizada del secado de una partícula individual en un gran caudal de aire cuyas propiedades no cambian y al fenómeno de saturación adiabática como un análisis preliminar de secado de una cantidad considerable de material sólido, donde tanto la fase de donde el agua se evapora como la fase aire húmedo se modifican durante la operación.

3.3) Se presentan correlaciones verificadas para propiedades del aire en función de la temperatura como presión de saturación líquido-vapor, viscosidad, conductividad térmica y difusividad binaria aire-vapor de agua.

3.4) Se desarrollaron diagramas de bloques para trazar las curvas más representativas del diagrama psicrométrico como las líneas de humedad relativa constante y las de temperatura de saturación adiabática constante. Se muestra que el diagrama psicrométrico se forma al graficar tales familias de curvas en forma superpuesta. A través del trazado del diagrama, pudo adelantarse que el análisis del secado debe centrarse en el compromiso entre eficiencia energética de secado y duración de la operación.

CONCLUSIONES

3.5) Se dedujo una expresión para el cociente del coeficiente de transferencia de calor y materia en termómetros húmedos y se lo comparó con otras contribuciones de literatura. Ninguna de éstas depende del número de Reynolds, sino del Pr y/o el Sc.

3.6) Como consecuencia de la conclusión 5) se encontró que es deseable y en ocasiones necesario diferenciar los métodos de cálculo de la temperatura de bulbo húmedo (T_{bh}) y de la de saturación adiabática (T_{sa}). El valor de T_{sa} es siempre mayor al de T_{bh} y las diferencias se vuelven detectables en aire caliente y seco, como el que usan las secadoras de granos, pudiendo llegar a $1,3^{\circ}\text{C}$. La indiferenciación de ambas temperaturas, es decir, el uso de T_{bh} en la ecuación de T_{sa} puede llevar a errores absolutos del 3% de humedad relativa, y a errores relativos cercanos al 13%

3.7) Se mostró la importancia de utilizar el método del punto de rocío para la determinación y control de la humedad relativa del aire.

3.8) Se presenta un programa de computadora modularizado-estructurado que traza las líneas principales del diagrama psicrométrico o alternativamente, calcula las variables psicrométricas más importantes para un aire en un estado dado, a partir de la entrada de dos parámetros, siendo uno de ellos la temperatura de bulbo seco. El programa incluye rutinas de resolución numérica de ecuaciones cuando las incógnitas son T_{bh} , T_{sa} y T_R . Los resultados del programa son comparables con los de un programa de cálculos psicrométricos desarrollados por autores previos.

Evaporación de agua pura

3.9) En esta parte, se buscaron las ecuaciones que dan la velocidad de evaporación desde un pequeño espejo de agua, para condiciones constantes de aire, y el tiempo de evaporación. Las mismas se basan en las ecuaciones de transferencia de calor y materia en interfases, y son fácilmente adaptables a secado de gotas. La expresión obtenida se deduce como forma preliminar de las ecuaciones de velocidad de secado de productos de alta humedad.

3.10) El tiempo de evaporación de un espejo de agua depende directamente del espesor del mismo e inversamente del coeficiente de transferencia de calor y de la diferencia de temperaturas de bulbo seco y húmedo.

Evaporación de agua desde sólidos de alta humedad

3.11) Se define el secado de sólidos y se muestran las condiciones necesarias a cumplirse para la existencia del Período de Velocidad Constante de Secado (PVCS), donde el secado ocurre en forma similar a la evaporación de un espejo de agua. Además de la constancia en las condiciones del aire, se requerirá que el espesor de la pieza no se reduzca, y que la presión de vapor en la superficie no disminuya significativamente por debajo del valor de agua pura.

3.12) Se muestran resultados experimentales de secado de cortes de zanahorias frescas, observándose un período inicial de velocidad de secado constante. La velocidad de secado cae a tiempos más largos, debido a la disminución de la presión de vapor del agua retenida en la superficie del sólido. La curva de secado experimental muestra que la humedad del sólido se hace asintótica a tiempos largos, tendiendo a un valor distinto de cero denominado humedad de equilibrio. La reducción de la presión de vapor superficial y la humedad de equilibrio se estudian en el capítulo cuatro.

-Del capítulo 4: Equilibrio sorcional

4.1) En cuanto a los métodos experimentales de determinación de isothermas de sorción, los métodos higrométricos son más rápidos que los gravimétricos y deberían preferirse. Entre los higrométricos, el basado en la medición de la temperatura de rocío por sensor óptico de espejo enfriado provee medidas precisas del contenido de vapor del aire y no requiere calibración, a diferencia de los sensores higrométricos electrónicos.

4.2) En cuanto a los datos experimentales de sorción en alimentos y particularmente en trigo, se observa escasez de los mismos en la zona de bajas actividades acuosas y altas temperaturas.

4.3) Entre las ecuaciones de isothermas calificadas como empíricas, la ecuación de Henderson-Thompson ha sido probada por varios investigadores y fué hallada como una de las más indicadas para productos ricos en almidón como el trigo. La ecuación cumple con los requerimientos matemáticos típicos en isothermas sigmoides, presenta sólo tres parámetros incluyendo la funcionalidad con la temperatura y permite despejar fácilmente tanto la humedad de los granos como el a_w . La ecuación presenta cierta tendencia a subestimar los datos medidos a muy altas a_w , que caen normalmente fuera del rango de humedades manejados en poscosecha de trigo, pero aproxima muy bien los datos a humedades de seguridad para el almacenamiento y es suficientemente precisa para estimar humedades de equilibrio en secado con aire caliente.

CONCLUSIONES

4.4) Con respecto al modelo teórico GAB de sorción multicapa, se ha encontrado que la humedad de monocapa W_m decrece con la temperatura, y que los otros dos parámetros, C_G y k_G , no permiten ser vinculados a la temperatura por ecuaciones tipo-Arrhenius. En el caso de C_G , esto se debe, en parte al rango de a_w empleado en el ajuste de GAB en cada temperatura: 0,3-0,9, y en parte a que todos los valores ajustados son mayores que 10, donde C_G mayores no afectan la predicción de la curva. El parámetro C_G , vinculado al parámetro C_L de la isoterma de Langmuir de adsorción monocapa, debe ser ajustado en cada temperatura en el rango de a_w 0 - 0,30, donde realmente afecta la curva. Con respecto al parámetro k_G , que otorga a la multicapa adsorbida propiedades diferentes a la del agua pura condensada, sus valores tienden a mantenerse constantes a distintas temperaturas. La falta de datos sorcionales a bajas a_w , la consecuente falta de confiabilidad de los ajustes de los parámetros de GAB con la temperatura y la naturaleza cuadrática de la ecuación en a_w hacen que se prefiera utilizar una isoterma más simple y suficientemente precisa, como la de Henderson-Thompson. Por otro lado, este modelo GAB, desarrollado primeramente para la adsorción física multicapa de pares adsorbente-adsorbato inorgánicos, subestima, según la literatura revisada, las humedades adsorbidas para a_w mayor que 0,9. Una de las causas es matemática, dado que la humedad no tiende a infinito en $a_w \rightarrow 1$, y otra es experimental: en muy altas a_w (que en realidad no se observan en poscosecha de trigo), los materiales biológicos retienen agua por mecanismos diferentes a la adsorción, como capilaridad y ósmosis.

CONCLUSIONES

4.5) Se ha mostrado aquí que el fenómeno de equilibrio sorcional puede verse como un fenómeno análogo al de la curva de presión de saturación de agua pura en función de la temperatura p_s vs T , con la diferencia que los granos húmedos presentarán una curva p_v vs T para cada contenido de humedad. En este sentido, trigos con bajos contenidos de agua presentan una curva de presión de vapor bastante inferior a la de p_s . Al aumentar la humedad del grano, p_v crece a tal punto que, para $W = 0,25$, es ya muy similar a p_s , según la predicción realizada con la isoterma de Henderson-Thompson para trigo duro.

4.6) El calor de sorción de agua en trigo L_g se ha modelado en función de la humedad del grano y su temperatura utilizando un método basado en la ecuación de Clapeyron en combinación con una isoterma de sorción. En nuestro caso, la isoterma base fué la de Henderson-Thompson trigo duro, y se obtuvieron curvas de L_g vs W a varias temperaturas. A altas humedades de grano, el L_g tiende al L_w , valor del agua pura a la temperatura correspondiente, mientras que L_g crece al disminuir la humedad. Este crecimiento presenta un punto de inflexión en humedades que corresponderían a la monocapa; L_g tiende luego a un valor asintótico superior de aproximadamente $1,2 L_w$ que, en términos del modelos clásico de sorción, coincidiría con el calor de sorción de la monocapa adsorbida.

4.7) Los calores de sorción obtenidos por el método Clapeyron -Isoterma de sorción fueron comparados con los predichos en dos versiones de la ecuación empírica de Gallaher. Esta ecuación no presenta un valor asintótico superior y predice valores de L_g desproporcionadamente altos, entre 2,7 y 24 veces L_w . En consecuencia, se recomienda el uso del método desarrollado en este trabajo

-Del capítulo 5: Análisis preliminar del secado de alimentos

5.1) La existencia de un período de velocidad constante de secado (PVCS) requiere, como condición necesaria, un elevado contenido de humedad inicial que mantenga la presión de vapor en la superficie del material en valores semejantes a los del agua pura durante un cierto lapso. Esto ocurre en la zona de la isoterma de sorción para la cual la humedad disminuye sin reducir la presión de vapor del agua en el alimento.

5.2) La extensión del período de velocidad de secado constante, en términos de diferencia de contenidos de agua inicial y crítica (valores medios en el sólido), se facilita en piezas muy pequeñas, puesto, que sólo en ellas, el lento transporte interno de agua en un sólido puede ser capaz de reponer el agua superficial y mantenerla en la zona de la isoterma de sorción de la conclusión 1). Este concepto se lleva al límite en secado spray, donde una muy buena proporción del agua removida se extrae en el PVCS.

5.3) El número de Biot para la transferencia de materia permite analizar que, durante el pasaje del PVCS al de velocidad decreciente, la resistencia interna no crece necesariamente por un aumento de la resistencia específica del material al transporte de agua, sino por la reducción de la presión de vapor superficial. Esta resistencia específica sí puede cambiar al pasarse de un primer a un segundo subperíodo de velocidad decreciente de secado, lo que se verificó en datos de secado de rodajas de zanahoria medidos para este trabajo.

5.4) La reducción de la presión de vapor puede tener dos causas:

(a) en piezas muy pequeñas, donde no se generarían gradientes apreciables de concentración, se debe a que se llega en toda la partícula a valores "tan bajos" de humedad donde cada disminución del contenido de agua reduce la presión de vapor del agua adsorbida.

(b) en piezas de considerable longitud característica, ocurre por la brusca reducción de la humedad superficial, que no puede compensarse por difusión interna. En este tipo de piezas, la disminución de la velocidad de secado, medida en términos de decrecimiento de la humedad media, ocurre poco después de comenzada la operación, conduciendo a una humedad crítica -valor medio en la pieza o partícula- muy elevada. Esto es, se inducen pronunciados gradientes de concentración. La resistencia interna crecería, en consecuencia, por un efecto fisicoquímico-termodinámico y no, necesariamente, por un cambio en el mecanismo de transporte interno. Esto es lo que puede ocurrir en cortes de productos frutihortícolas.

5.5) La deshidratación por aire de alimentos muy húmedos es una operación particular donde se puede presentar un período de secado de velocidad constante y un período de velocidad decreciente formado aparentemente, por dos subperíodos. Consecuentemente, el número de Biot de transferencia de materia pasa de tener valores inicialmente bajos (control externo) a intermedios (control compartido, 1° subperíodo decreciente) y luego valores muy altos hacia el final (control interno, 2° subperíodo decreciente). En secado de materiales no tan húmedos y otras operaciones físicas, el número de Bi tiende a mantenerse en el mismo orden de valores.

CONCLUSIONES

5.6) La conclusión 5) implica que la zanahoria presenta todos los mecanismos de secado, incluyendo el 2° decreciente, característico del secado de trigo.

5.7) Se han propuesto numerosos modelos para predecir las velocidades de secado de piezas o partículas individuales en el período de velocidad decreciente. Los más comunes son los de flujo capilar y difusivo. Una buena proporción de los trabajos de investigación en secado de alimentos de alta humedad han empleado modelos difusivos de mayor o menor complejidad. Una minoría ha trabajado con representaciones detalladas de la estructura celular de los alimentos naturales mientras que otros han optado por modelados de complejidad intermedia, considerando difusividades variables con la concentración y encogimiento del material. Hay otra línea de investigación que debería ser caracterizada como fenomenológica que propone funciones más o menos empíricas para obtener una curva característica del material, para la cual ha habido contribuciones recientes que consideran explícitamente el encogimiento. Las líneas de investigación de la curva característica puede reconciliarse con la difusiva simplificada dependiendo de la elección de la función.

5.8) Teniendo en cuenta las observaciones realizadas aquí, se puede esperar que el secado de granos individuales de trigo, un material de baja humedad inicial, transcurra en el segundo período de velocidad decreciente de secado. Esto podría permitir la aplicación de modelos con base física pero simplificados a nivel partícula, de manera de poder incluir posteriormente la complejidad adicional del modelado del secado de lechos de granos y condiciones de aire variables en el lecho.

-Del capítulo 6: Secado de granos individuales de trigo por la técnica de capa delgada. Determinación de parámetros cinéticos.

6.1) En base a cálculos realizados de los números de Biot de transferencia de calor y materia, se encontró control mayormente externo a la transferencia de calor e interno estricto a la transferencia de materia. La rapidez de calentamiento de los granos de trigo en capa delgada hizo posible asumir secado isotérmico, permitiendo resolver analíticamente la ecuación de difusión no estacionaria en esferas con condición de contorno prescrita. Este valor se tomó igual a la humedad del grano en equilibrio con las condiciones del aire de secado, dada por la isoterma de sorción.

6.2) Entre las soluciones analíticas de tipo difusión líquida no estacionaria en esferas, se analizó la deducción de la ecuación de Becker de 3 términos, para "tiempos cortos", basada en consideración de medio semi-infinito, cuya precisión es similar a la de las series infinitas convergentes, utilizadas en trabajos previos. La ecuación de tiempos cortos cubre, no obstante, todo el rango de interés práctico en secado de trigo, de forma tal que puede usarse para la determinación de parámetros cinéticos de secado.

6.3) La ecuación de Becker ha sido utilizada en muy pocos trabajos de secado de trigo. Las versiones usadas incluyen humedad prescrita independiente de la temperatura y humedad relativa del aire, y coeficiente de difusión dependiente sólo de la temperatura.

6.4) Existen relativamente pocos trabajos que hayan estudiado experimentalmente la posible dependencia del coeficiente de difusión efectivo (D) con el contenido de humedad del grano, y no se han encontrado correlaciones confiables de este tipo en trigo.

CONCLUSIONES

6.5) Se realizaron 16 experiencias de secado en capa delgada cubriendo cuatro niveles de humedad inicial de grano, y , en cada uno, cuatro temperaturas de aire. Cada una de las curvas de humedad adimensional vs tiempo mostraron un decrecimiento de velocidad de secado sostenido desde el inicio, evidenciando un secado en el segundo subperíodo de velocidad decreciente.

6.6) La solución analítica simplificada de tiempos cortos presentó un muy buen ajuste a cada una de las curvas experimentales, con $r_2 > 0,99$ en todos los casos. El parámetro de ajuste (D), se estimó con error típico muy bajo.

6.7) A humedad inicial constante, los valores de D presentaron una correlación muy clara, tipo Arrhenius, con la temperatura.

6.8) A temperatura constante las curvas de humedad adimensional experimental (W_{ad}) en función del tiempo (t), que parten de distintas humedades iniciales, no coinciden, como lo predeciría la solución analítica. Las curvas W_{ad} vs t que parten de humedades iniciales mayores decrecieron más rápidamente, demostrando que el coeficiente de difusión crece con la humedad inicial de los granos.

6.9) Para tener en cuenta el efecto del contenido de agua en D y mantener el D constante *durante la predicción del secado*, tal como lo prescribe la solución analítica, se vinculó el D a la humedad inicial (W_0). Esto se hizo a través de una función lineal creciente del factor preexponencial de Arrhenius. La energía de activación no depende de W_0 .

-Del capítulo 7: Modelado del secado de trigo en lecho fijo

Modelo de lecho fijo

7.1) La forma general del balance macroscópico-diferencial, establecida por la teoría moderna de simulación de procesos tanto para materia como energía, es adecuada para desarrollar un modelo de secado de granos en lecho fijo. El método permite una deducción clara de las ecuaciones, ayudando a explicitar las diferencias entre los balances de conservación propiamente dichos y las ecuaciones constitutivas de velocidad de transferencia de materia (ecuación de capa delgada) y de calor.

7.2) En consecuencia, el modelo está basado en los principios de los fenómenos de transporte, leyes termodinámicas y principios fisicoquímicos clásicos. Se dedujeron cuatro ecuaciones diferenciales que dan la variación de las temperaturas y humedades del grano y del aire con el tiempo y la coordenada del espesor del lecho.

7.3) Con respecto a las propiedades utilizadas, se emplean parámetros variables estimados en base a ecuaciones con significado físico. Ejemplos son la variación del calor latente de vaporización del agua pura con la temperatura, y del calor de desorción del agua con la temperatura y humedad del grano.

7.4) El modelo emplea la ecuación cinética de difusión líquida simplificada de capa delgada para tiempos adimensionales cortos, y la cambia por la ecuación de convergencia en un término de la solución analítica en serie infinita para tiempos largos. En ambas expresiones, de rápido tiempo de cálculo, se utiliza un coeficiente de difusión efectivo dependiente de la temperatura y la humedad inicial. Las humedades de equilibrio fueron calculadas con la misma isoterma de equilibrio estática usada en el desarrollo de la ecuación de capa delgada.

CONCLUSIONES

7.5) El modelo incorpora una rutina de condensación, adaptada para la resolución numérica específica, que posibilita el recálculo de las ecuaciones de secado hasta convergencia en casos donde el uso del balance de materia conduciría a humedades relativas mayores a la unidad. En tales casos, el modelo transfiere el excedente de humedad al grano, simulando la condensación. El recálculo se detiene cuando la humedad relativa del aire a la salida de la capa es aproximadamente la unidad, dentro de una cota de error.

7.6) Se utilizó un esquema de resolución numérica de las ecuaciones de secado con un método de 4° orden para las derivadas temporales, cuya variación es más rápida, y de 2° orden para las dependientes de la posición en el lecho, que varían en forma más suave. Esto permite integrar las ecuaciones con muy bajo error de truncamiento y buena velocidad de cálculo.

Convalidación del modelo de secado en lecho fijo

7.7) En una convalidación realizada con 29 corridas experimentales previamente publicadas, que cubre un rango de condiciones operativas más amplio que el usual en el manejo postcosecha de trigo, los tiempos de secado predichos por el modelo presentaron un error porcentual medio de 12,1%.

CONCLUSIONES

7.8) La única tendencia definida del error se estableció para aquellas condiciones donde los tiempos de secado resultan mucho mayores a aquellos empleados en las corridas de determinación de parámetros cinéticos de secado de granos individuales de trigo (cap. 6). Los altos tiempos de secado son producidos por la existencia de condiciones de alta humedad relativa intergranular durante una buena proporción de la operación, producto del uso de caudales bajos de aire, temperaturas bajas a moderadas del mismo y elevados espesores de lecho. Sin embargo estas condiciones no son habituales en el secado continuo de trigo.

7.9) El modelo predice correctamente las humedades del grano en el interior del lecho hasta, al menos, 0,45 m de la base del mismo, y también mostró buenas predicciones para las temperaturas y humedades del aire a la salida del lecho.

Comportamiento del secado en lecho fijo

7.10) En lechos altos (0,60 m en adelante), la humedad media del lecho presenta una caída lineal con el tiempo (velocidad media de secado constante) mientras la capa superior del lecho no pierde humedad. En ese lapso, el aire de salida presenta una humedad relativa de saturación, y la temperatura de salida del aire tiende a coincidir con la temperatura de saturación adiabática del aire de entrada. Cuando la capa del tope del lecho comienza a secarse, el frente de secado pasa a ocupar todo el espesor del lecho; como consecuencia de esto la velocidad media de secado decrece, la temperatura de salida del aire se eleva, y su humedad relativa se reduce.

CONCLUSIONES

7.11) En general, puede decirse que el modelo es apropiado para predecir tiempos experimentales de secado de trigo en lecho fijo estático menores de 300 min, y el comportamiento de distintas variables de secado en el tiempo y la posición en el interior del lecho. En las condiciones habituales de secado de trigo: lechos delgados -espesores de 0,10 a 0,40 m-, temperaturas moderadas a altas, el error medio fué de 3,96 %, sin presentar tendencias definidas.

7.12) Se considera que este modelo puede ser utilizado como base de un programa de simulación de secadoras de trigo, donde el parámetro fundamental es el tiempo de residencia, versión continua del tiempo de secado en lecho fijo.

-Del capítulo 8: Modelo cinético de pérdida de germinación durante el secado de trigo con aire caliente

8.1) El método experimental de secado en lecho fluidizado es adecuado para realizar experiencias donde se determine la influencia del tratamiento térmico en la calidad. La técnica confiere un tratamiento térmico uniforme a la masa de granos, lo que permite extraer muestras representativas de todo el lecho. Asimismo, en lechos de altura suficiente, es posible registrar continuamente la temperatura de la masa de granos en forma no invasiva, a través de la medición de la temperatura del aire a la salida.

8.2) Se realizaron distintas corridas de secado para condiciones variables de temperatura y humedad del grano, obteniéndose datos de tiempo, humedad, temperatura y germinación de granos. Este tipo de experiencias reflejan la forma en que los granos se comportan en un equipo de secado.

8.3) Se observó que el contenido de humedad ejerce un efecto tan importante como la temperatura en la resistencia del trigo al tratamiento térmico. La viabilidad de granos húmedos es sensible a temperaturas incluso moderadas, mientras que granos de baja humedad pueden resistir temperaturas mucho más elevadas.

8.4) A efectos de su tratamiento matemático, los datos experimentales de las historias térmicas y de secado fueron expresados como curvas escalonadas, formadas por una sucesión de intervalos de tiempo, cada uno con una temperatura y humedad media constante.

CONCLUSIONES

8.5) Se dedujo una forma particular de una cinética de primer orden para la pérdida de viabilidad aplicable a datos medidos en condiciones variables. La misma fue expresada en función del intervalo de tiempo. Se realizó un ajuste directo de la expresión a los datos de germinación en función de la humedad, temperatura y tiempo asumiendo que la constante cinética dependía en forma tipo Arrhenius con la temperatura. Se encontró que el efecto de la humedad podía incluirse en el factor preexponencial, cuyo logaritmo natural resultó ser una función lineal del contenido de agua en base seca.

8.6) Las predicciones del modelo muestran una concordancia cuantitativa muy satisfactoria con las germinaciones experimentales dentro del rango de condiciones cubierto por las experiencias.

8.7) El método del tiempo fraccional desarrollado en trabajos previos, aplicado a las historias térmicas y de secado medidas aquí, mostró ser un buen indicador cualitativo del comienzo del deterioro.

8.8) El modelo cinético desarrollado en este trabajo constituye un progreso respecto del procedimiento numérico del tiempo fraccional, dado que permite cuantificar la viabilidad cuando existen deterioros parciales en el poder germinativo.

Del capítulo 9: Extensión del modelo para secadoras continuas de flujo cruzado: convalidación experimental

9.1) El modelo de secado en lecho fijo estático del capítulo 7 fué extendido para simular la operación de secadoras de flujo cruzado en estado estacionario. Se incluyó el modelo de pérdidas de germinación de capítulo 8, específicamente desarrollado para condiciones variables de temperatura y humedad de grano, y la simulación de la etapa de enfriamiento.

9.2) En secado/enfriamiento continuo en flujo cruzado, la humedad media final requerida no puede ubicarse al terminar la etapa de secado, como en lecho fijo estático, sino a la salida del enfriamiento, etapa donde normalmente se produce una pequeña pérdida adicional de humedad. Esto requirió resolver la secadora completa en forma iterativa, suponiendo primero un tiempo de residencia, calculando la discrepancia entre humedad media de salida deseada y obtenida, y corrigiendo el valor del tiempo de residencia por medio de un algoritmo de búsqueda, a fines de hacer tender a cero la discrepancia en sucesivas iteraciones.

9.3) Se realizaron versiones específicas del simulador para tener en cuenta variaciones del espesor de lecho durante el secado, distintos espesores medios en secado y enfriamiento, y, para secadoras multilecho, mezclado de los granos entre lechos.

9.4) El mezclado fué interpretado como un fenómeno aleatorio, con reordenamiento al azar de capas que, inmediatamente después del mezclado, mantenían su humedad de grano, temperatura y germinación, lo que se se considera una contribución original del trabajo de tesis.

CONCLUSIONES

9.5) El programa de simulación de secadoras de flujo cruzado predijo correctamente los resultados de 16 ensayos de tres secadoras comerciales, con un error en el caudal de granos húmedos de 8,24% y de 10,3 % para el consumo específico de energía. La temperatura media del lecho a la salida fué predicha con un error absoluto medio de 2,6°C, mientras que el promedio del error absoluto de la germinación a la salida fué de 8,81%. Las predicciones de la secadora multilecho con mezclados intermedios fueron especialmente precisas.

9.6) Este simulador del secado en flujo cruzado predijo correctamente, en los 16 ensayos, el umbral de daño térmico a la viabilidad (que ha ocurrido en todos los casos observados a temperaturas de aire de secado de 70°C) y los pequeños daños parciales en la germinación. Hubo una tendencia a sobreestimar las pérdidas de germinación en condiciones severas de tratamiento térmico, pero debe indicarse que esas condiciones no podrían elegirse si se desea preservar la calidad panadera, propiedad tecnológica correlacionada a la pérdida de germinación. Por consiguiente, el programa desarrollado resulta confiable para determinar condiciones de seguridad para el secado de trigo con aire caliente.

Del capítulo 10: Simulación de secadoras continuas de flujo cruzado. Efecto de condiciones operativas y estudio de diversos modos de funcionamiento

Efecto de condiciones operativas en el comportamiento del secado

10.1) Para condiciones operativas típicas de secado de trigo en Argentina, el tiempo de secado se triplica, aproximadamente, al quintuplicarse el espesor de lecho, lo cual conduce a un aumento de la capacidad de secado de una máquina dada a casi el doble de su valor. Se logra, por esta vía, una reducción del consumo específico de energía térmica y que el lecho aumente menos su temperatura media, evitando daños térmicos. Sin embargo, no se consideró conveniente superar un espesor de 0,30 m debido a que se incrementa notablemente la heterogeneidad del secado y se aumenta proporcionalmente la potencia de ventilación.

10.2) Al aumentar la temperatura de secado de 40° a 90°C, el tiempo de secado se reduce a menos de la tercera parte, con lo cual se consigue triplicar al menos la cantidad de granos secados por unidad de tiempo sin mayor variación de consumo específico. Sin embargo, para un espesor de lecho de 0,30 m, temperaturas mayores de 75°C causan mermas en la viabilidad de los granos secados, con impacto en la calidad panadera de las harinas.

10.3) Se observa una influencia de la humedad inicial de los granos en las temperaturas permitidas. Si se admite una pérdida de germinación tolerable del 10% (que no causaría daño práctico en la calidad panadera) en lechos de 0,30 m de espesor, se podrían emplear temperaturas de hasta 83°C, secando desde el 17% b.h. (0,205, dec., b.s.) mientras que si el secado parte desde 22% b.h. (0,282 dec., b.s.) la temperatura máxima permitida no superaría los 75°C.

CONCLUSIONES

10.4) La heterogeneidad de tratamiento, medida como la desviación típica de las humedades en el lecho al final del secado respecto de la humedad media final, ha mostrado ser un indicador complementario adecuado de la calidad del secado. Si se fija un valor máximo de 2,5% b.s. (0,0025 dec., b.s.), este indicador resulta más sensible que la viabilidad de los granos para secados que partan de una humedad inicial de grano mayor que 0,22 dec., b.s.

Secadora continua con secado y enfriamiento

10.5) Para los secados de trigo habituales en Argentina, donde se remueven pocos puntos de humedad, una secadora convencional que opere a 75°C de temperatura de aire de secado, donde la etapa de enfriamiento sea de un tercio de aquella, y donde el flujo de aire en la última sea igual que en la primera, no permite enfriar satisfactoriamente los granos, (Temperatura de salida $\approx 35^\circ\text{C}$). Esto es debido a que el tiempo de secado es corto, y el de enfriamiento, vinculado al de secado, lo es aún más. Granos por encima de 25°C están expuestos a crecimiento de insectos en el almacenamiento posterior, especialmente en silos no ventilados.

10.6) Al aumentar el flujo de aire en secado (G_{as}), el tiempo de esta etapa se reduce, pero la capacidad de secado no aumenta directamente sino que depende aproximadamente de $G_{as}^{0.7}$, incrementándose el consumo específico de energía térmica. Al aumentar el flujo de aire de 0,25 a 0,40 kg/(m² s) (60% de incremento), la potencia de ventilación crece un 240%, lo que incrementa costos operativos y de inversión. Un valor de G_{as} de 0,30 kg/(m² s) en secadoras de 0,30 m de espesor de lecho combina razonable consumo específico de energía térmica, buena capacidad de secado, manteniendo la potencia de ventilación en valores aceptables.

CONCLUSIONES

10.7) Para la secadora convencional, un aumento del 30% del flujo de aire en enfriamiento, respecto al valor de la zona de secado, permitiría un mejor enfriamiento de los granos, pero a expensas de un aumento de potencia eléctrica del 22%.

10.8) Se simuló una sistema que invierte el sentido del flujo de aire en la mitad de la etapa de secado y al comenzar el enfriamiento, en base a llamadas a una rutina que reordena las capas del lecho. El mismo permite reducir la heterogeneidad del sistema de flujo cruzado en más del 50%, aunque reduce levemente la capacidad de secado, aumenta ligeramente el consumo e imparte un tratamiento algo más severo a los granos. De todas formas, se lo considera altamente conveniente, puesto que, además, el mayor tiempo de residencia permite enfriar correctamente los granos sin potencia adicional de ventilación.

10.9) Se simuló la recirculación de parte del aire de salida de secado y todo el de salida del enfriamiento por medio del agregado de un lazo iterativo externo al cálculo completo de la secadora. El aire ingresa al calefactor a mayor temperatura, pero con una mayor humedad absoluta. Los ahorros de energía en consumo específico, del 25%, fueron mayores a la merma de capacidad de secado, del 10%, causada por el aumento del tiempo de residencia, que también permite reducir 2°C adicionales la temperatura de los granos.

10.10) Combinando cambios de dirección del aire y recirculación, se puede lograr un sistema de secado con un consumo reducido de energía térmica respecto del caso convencional (-16%), con menor heterogeneidad de tratamiento (-55%), pero con una merma del 18% en la capacidad de secado, un daño al poder germinativo un 10% mayor (todavía aceptable en granos de humedad inicial menor o igual que el 17% b.h. (0,205 dec, b.s.) a una temperatura del aire de 75°C). Sin embargo, el mayor tiempo de residencia permite lograr ahora un correcto enfriamiento.

CONCLUSIONES

10.11) Si bien la secadora que combine recirculación con cambios de dirección del aire deberá ser un 18% más grande para lograr la misma capacidad de secado que tiene un sistema convencional, la elección del nuevo sistema sería adecuada pues, además de las ventajas de uniformidad de tratamiento térmico, el incremento de inversión de la secadora, sólo de un 11% por ley de la escala, se podría recuperar relativamente rápido, debido al menor consumo específico de energía térmica.

NOTACION

-
- a : Area superficial de grano por unidad de volumen de lecho, m^2/m^3
 - a_v : Area superficial de partícula por unidad de volumen de partícula, m^2/m^3
 - a_{ve0} : Idem, para la esfera de igual volumen que el grano (esfera equivalente), evaluada a W_0 .
 - a_{vp0} : Idem, para esfera de igual a_v que el grano (esfera efectiva), evaluado a W_0 .
 - Bi_m y Bi_c : Números de Biot para la transferencia de materia y calor, respectivamente.
 - C_{HT} : Parámetro de la ecuación de equilibrio sorcional de Henderson-Thompson de sorción
 - C_p : Calor específico, $J/(kg^\circ C)$
 - C_{pa} : Idem, para el aire seco
 - C_{pv} : Idem, para vapor de agua
 - C_{ps} : Idem, para materia seca de grano
 - C_{pw} : Idem, para agua líquida
 - D_{AB} : Difusividad binaria aire - vapor de agua, m^2/s
 - D : Coeficiente de difusión efectivo de agua en granos, m^2/s
 - D_e : Diámetro equivalente de partícula (de una esfera de igual volumen que el grano), m
 - D_p : Diámetro efectivo de partícula (de una esfera de igual a_v que el grano), m
 - D_∞ : Factor preexponencial de la ecuación de Arrhenius para D , m^2/s
 - E_a : Energía de Activación de Arrhenius para la variación de D con la temperatura, J/mol
 - E_{aq} : Idem anterior para la variación de la constante cinética de pérdida de germinación, J/mol
 - f_k : factor de fricción en lechos rellenos, adimensional
 - G : Germinación, %
 - G_a : Flujo másico de aire forzado a través del lecho de granos, $kg/(m^2.s)$
 - G_{as} : Idem, para la parte de secado con aire caliente
 - G_{ae} : Idem anterior para la parte de enfriamiento con aire ambiente
 - H : Entalpía específica, J/kg (Referencia: $0^\circ C$, con agua en estado líquido), también del grano húmedo, expresada en base seca.
 - H_a : Idem, para el aire húmedo, expresada sobre base seca
 - H_{as} : Idem, para el aire seco
 - H_v : Idem, para el vapor de agua
 - H_w : Idem, para agua líquida
 - H_s : Idem, para materia seca de grano
 - h_a : humedad absoluta del aire, kg vapor/ kg aire seco
 - $h_{a,z}$: Idem, en la posición z de la coordenada en la dirección del espesor de lecho
 - $h_{a,z+\Delta z}$: Idem, en la posición $z + \Delta z$.

-
- h_{as} : humedad absoluta del aire saturado
 - h_{bh} : Idem, para aire saturado a la temperatura de bulbo húmedo
 - h_{sa} : Idem, para aire saturado a la temperatura de saturación adiabática
 - h_r ó h_{ra} : humedad relativa del aire, decimal
 - h_T : coeficiente de transferencia de calor aire-grano, $W/(m^2 \text{ } ^\circ\text{C})$
 - J_M y J_H : Factor de Colburn-Chilton para transferencia de materia y calor, respectivamente
 - k = constante cinética de secado para el modelo de Lewis, s^{-1} o min^{-1}
 - k_{page} = constante cinética de secado para el modelo de Page
 - k_p : coeficiente de transferencia de materia en base a fuerza impulsora de presiones, $\text{kg}/(\text{s m}^2 \text{ Pa})$
 - k_c : Idem, en base a fuerza impulsora de concentraciones $\text{kg}/(\text{s m}^2 (\text{kg}/\text{m}^3)) \equiv \text{m}/\text{s}$
 - k_h : Idem, en base a fuerza impulsora de humedad absoluta del aire, $\text{kg}/(\text{s m}^2 (\text{kg}/\text{kg}))$
 - K_q : constante cinética de pérdida de germinación, $1/\text{min}$
 - K_{HT} : Parámetro de la ecuación de equilibrio sorcional de Henderson-Thompson de sorción
 - L : Calor latente de vaporización
 - L_w : Idem, para agua pura, J/kg
 - L_g : Idem, para el agua incorporada a los granos, J/kg
 - M : humedad de los granos, kg de agua/ kg grano húmedo (base húmeda: b.h.)
 - M_p : Idem, expresada en %.
 - M_a : Peso Molecular del aire seco, g/mol , o kg/kgmol
 - M_v : Peso Molecular del agua, g/mol , o kg/kgmol
 - \dot{m}_d : caudal de materia seca de granos a través del equipo de secado, t/h
 - \dot{m}_{ds} : Idem anterior, por unidad de sección de la parte de secado con aire caliente
 - \dot{m}_{da} : Idem anterior, por unidad de anchura de la sección de la parte de secado con aire caliente
 - \dot{m}_w : caudal de granos húmedos (tomados a la humedad inicial (W_0)) a través de la secadora, t/h
 - \dot{m}_{ws} : Capacidad de secado, masa de granos húmedos/(área de secado y tiempo), $\text{t}/(\text{h m}^2)$
 - $\delta \dot{m}_v$: Velocidad de transferencia de vapor grano-aire, kg/s
 - N : parámetro de la ecuación de equilibrio sorcional de Henderson-Thompson

-
- Q_v : Caudal volumétrico de aire, m^3/s
 - Q_{vv} : Caudal volumétrico de aire por unidad de volumen de lecho, $m^3/(s m^3)$
 - P : Potencia de ventilación, W o kW
 - P_r : Idem, requerida por el aire, W
 - P_{rs} : Idem, por unidad de sección, W/m^2
 - P_{el} : Potencia eléctrica absorbida por el ventilador, W o kW
 - P_{els} : Idem, por unidad de sección transversal al movimiento del aire, W/m^2 ó kW/m^2
 - p : presión absoluta del aire, Pa
 - p_s : Presión de saturación líquido-vapor del agua, Pa
 - p_{sbh} : Idem, evaluada a la temperatura de bulbo húmedo
 - p_v : presión de equilibrio líquido-vapor del agua incorporada a los granos, Pa
 - p_{va} : presión parcial del vapor de agua en el aire, Pa
 - $\delta \dot{Q}$: Velocidad de transferencia de calor convectiva aire-grano, W
 - Q_v : caudal volumétrico de aire, m^3/s
 - $Q_{vv} =$ caudal volumétrico por unidad de volumen de lecho, $m^3 \text{ aire}/(s m^3 \text{ lecho})$
 - R : Constante de los gases, $J/(\text{mol K})$ ó $\text{cal}/(\text{mol K})$, o radio equivalente de los granos, m.
 - R_h : radio hidráulico, m
 - Re : Número de Reynolds, adimensional
 - Re_m : Número de Reynolds modificado para lechos rellenos
 - S : Sección transversal a la dirección del aire, m^2
 - S_s : Sección transversal al caudal de aire en la zona de secado con aire caliente, m^2
 - S_e : Sección transversal al caudal de aire en la zona de enfriamiento con aire ambiente, m^2
 - t : Tiempo, s
 - t_s : Tiempo de secado, s ó min
 - t_e : Tiempo de enfriamiento, s ó min
 - t_T : Tiempo de residencia total en la secadora, s ó min
 - T : Temperatura ó temperatura media de un grano o capa delgada de granos, $^\circ C$
 - T_a : Temperatura de bulbo seco en el seno del aire de secado, $^\circ C$
 - T_{az} : Idem, en la posición z de la coordenada en la dirección del espesor de lecho, $^\circ C$
 - $T_{a z + \Delta z}$: Idem, en la posición $z + \Delta z$, $^\circ C$
 - T_{bh} : Temperatura de bulbo húmedo de aire, $^\circ C$
 - T_{sa} : Temperatura de saturación adiabática del aire, $^\circ C$

-
- T_R : Temperatura de rocío del aire, °C
 - T_{abs} : Temperature absoluta, K
 - T_l : Temperatura local intragranular, °C
 - V : Velocidad superficial del aire = $Q_v/S = Q_{vv} Z_{max}$, m/s
 - V_i : Velocidad intersticial del aire en el lecho relleno, m/s
 - W_l : Humedad local intragranular, kg agua/kg masa seca de grano (decimal, base seca (b.s.))
 - W : Humedad media del grano o capa delgada de granos, decimal, b.s.
 - W_m : Humedad media del lecho de granos, a un tiempo dado, decimal, b.s.
 - W_{mf} : Humedad media final del lecho de granos, decimal, b.s.
 - W_e : Humedad de los granos en equilibrio con aire de T_a y h_{ra} , decimal, b.s.
 - W_0 : Humedad inicial de los granos, decimal, b.s.
 - W_{ad} : humedad adimensional media de un grano o capa delgada = $[(W - W_e)/(W_0 - W_e)]$
 - X^2 : tiempo adimensional en el secado de una capa delgada = $a_{vd}^2 D t$
 - y_{st} : coordenada de longitud (proporcional al tiempo "t") en la parte de secado de la secadora, m;
 - Y_{max} : Longitud total de la secadora en la dirección de avance de los granos, m
 - z : coordenada del espesor de lecho, m
 - Z_{max} : espesor de lecho, m
 - Z : Factor preexponencial de Arrhenius en el modelo cinético de pérdida de calidad, 1/min

Símbolos griegos

- ρ_a : densidad del aire seco, kg/m³
- ρ_g : densidad de grano a humedad W , kg/m³
- ρ_{g0} : densidad de grano a humedad W_0
- ρ_{s0} : masa seca de trigo referida al volumen de grano húmedo a W_0
- ρ_L : densidad de lecho a humedad W , kg/m³. Se calcula como: $\rho_L = \rho_g (1 - \epsilon)$
- ρ_{L0} : densidad de lecho a humedad W_0
- ϵ : fracción de huecos del lecho a humedad W , decimal
- ϵ_0 : fracción de huecos del lecho a humedad W_0
- Δt : Intervalo de tiempo para la integración numérica, s
- Δz : Intervalo de longitud para la integración en la dirección del espesor de lecho, m
- Δp_v : pérdida de carga del aire por unidad de lecho de granos, Pa
- μ ó μ_a : viscosidad del aire, kg/(m.s)

REFERENCIAS

Referencias

- **Alagusundaram, K. y Jayas, D.S. (1990).** Airflow Resistance of Grains and Oilseeds. Post-Harvest News and Information 1990 1(4): 279-283.
- **Anderson, R.B. (1946).** Modifications of the Brunauer, Emmett and Teller Equation. Journal of the American Chemical Society 68: 686-691.
- **Andrés, D.A.; Madussi, R.; Dreifuss E.H.; Zacchino, J.; Ferrero, E.H. y Nino, S. (1988).** Informe sobre Trabajo Programa Demostrativo de Ahorro de Energía en Secado de Granos. Grupo de Estudios sobre Energía, Fac. Regional Rosario, UTN.
- **Arroyo, G. y Mascheroni, R.H. (1990).** Comunicación Personal en el CIDCA, Facultad de Ciencias Exactas, UNLP-CONICET.
- **AOAC (1980).** Official Methods of Analysis. 13th ed. Association of Official Analytical Chemists, Washington, D.C.
- **ASAE (1982).** Moisture Measurement: Grain and Seeds. ASAE Standard S352. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI 49085, USA.
- **ASAE (1988).** Resistance of Airflow through grains, seeds, other agricultural products, and perforated metal sheets. ASAE Standard 272.1. American Society of Agricultural Engineers.
- **ASAE (1991).** Moisture Relationships of Grains. ASAE Standard D245.4. American Association of Agricultural Engineers.
- **ASHRAE (1997).** Handbook of Fundamentals. American Association of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc. New York.
- **ASHRAE (1999).** HVAC Applications. American Association of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, Georgia.

Referencias

- **Bakker-Arkema, F.W.; Lerew, L.E.; De Boer, S.F. y Roth, M.G. (1974).** Grain Drying Simulation. Research Report N° 224. Michigan State University, East Lansing, Michigan.

- **Bakker-Arkema, F.W. (1982).** Effect of Air Recirculation on Energy Efficiency and Dryer Capacity. Proceedings of the Grain Conditioning Conference: 75-81. University of Illinois, Urbana-Champaign.

- **Bakker-Arkema, F.W. (1993).** High Temperature Grain Drying. FAO Technical Symposium on Grain Drying and Storage in Latin America, Canela, RS, Brasil.

- **Bakker-Arkema, F.W. (1994).** Grain Quality and Management of Grain Quality Standards. Proceedings of the International Symposium on Grain Conservation, Páginas 3-12. FAO-CESA, Canela, RS, Brazil.

- **Barreto, G.F. (1996).** Comunicación Personal. Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, UNLP.

- **Becker, H. A. (1959).** A Study of Diffusion in Solids of Arbitrary Shape with Application to the Drying of the Wheat Kernel. Journal of Applied Polymer Science 1 (2): 212-226.

- **Becker, H.A. e Isaacson, R.A. (1970).** Wheat Drying in well-Stirred-Batch and Continuous Moving Bed Dryers. The Canadian Journal of Chemical Engineering 18: 560-567.

- **Belluti, G.; Gherbezza, E.; Monti, J.; Carbone, O.D.; Carlini, H.D. y Suñer, L.A. (1988).** Recuperación de Calores Perdidos en el Secado de Granos y Optimización del Proceso. Dirección General de Asesoramiento Técnico, Rosario. Ministerio de Economía de la Provincia de Santa Fé.

Referencias

- **Beroqui, M. (1981)**. Psicrometría y Secado. Cátedra de Ingeniería de las Operaciones Físicas. Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Editado por el C.E.I.L.P.
- **Bird, R.B; Stewart, W.E. y Lightfoot, E.N. (1960)**. Transport Phenomena, Wiley, New York.
- **BMA (1990)**. The British Medical Association Complete Family Health Encyclopedia (Smith, T., Editor). Guild Publishing-Dorling Kindersley, London.
- **Bolsa de Cereales (1996)**. Número Estadístico 1994/95 y 1995/96. Bolsa de Cereales de Buenos Aires, Argentina.
- **Botani, E. (1996)**. Comunicación Personal. INIFTA, Facultad de Ciencias Exactas, UNLP.
- **Brennan, J.G.; Butters, J.R.; Cowell, N.D. y Lilly, A.E.V. (1981)**. Food Engineering Operations 2nd Edition. Applied Science Publishers Ltd, London.
- **British Standards Institution (1966)**. Methods of Test for Agricultural Grain Driers. British Standard 3986:1966, London.
- **British Standards Institution (1991)**. Methods of Test for Drying Performance of Agricultural Grain Driers. British Standard 3986:1991, London
- **Brooker, D.; Bakker-Arkema, F.W. y Hall, C.W. (1992)**. The Drying and Storage of Grains and Oilseeds. Van Nostrand Reinhold, Avi Book, New York.
- **Bruce, D.M. (1984)**. Simulation of a Multiple Bed Concurrent-, Counter-, and Mixed-Flow Grain Driers. Journal of Agricultural Engineering Research 30: 361-372.

Referencias

- **Bruce, D.M. (1985)**. Exposed-Layer Barley Drying: Three Models Fitted to New Data up to 150°C. *Journal of Agricultural Engineering Research* 32: 337-347.
- **Bruce, D.M. (1991)**. Comunicación Personal. Silsoe Research Institute, Silsoe, Bedford, Gran Bretaña.
- **Bruce, D.M. (1992)**. A Model of the Effect of Heated Air Drying on the Bread-Baking Quality of Wheat. *Journal of Agricultural Engineering Research* 52 (1): 53-76.
- **Bruce, D.M. y Giner, S.A. (1993)**. Mathematical Modelling of Grain Drying in Counter-Flow Beds: Investigation of Crossover of Air and Grain Temperatures. *Journal of Agricultural Engineering Research* 55: 143-161.
- **Burrell, N.J.; Smith, E.A. y Armitage, D.M. (1982)**. Air Distribution from Ventilation Ducts under Grain. *Journal of Agricultural Engineering Research* 27: 337-354.
- **Calvelo, A. (1975)**. Fluidodinámica. Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata. Curso de Reducción. Instituto Argentino de Siderurgia, Buenos Aires.
- **Calvelo, A. (1985)**. Comunicación Personal en el CIDCA, UNLP-CONICET-CIC.
- **Casalins, A. (1994)**. Comunicación Personal. Bolsa de Cereales de Buenos Aires.
- **Cases, J. (1997)**. Comunicación Personal. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro (UNC), Olavarría.
- **CEDAR S.A. (1994)**. Catálogos de Secadoras Continuas de Granos. Arequito, Santa Fé.

Referencias

- **Cenkowski, S.; Jayas, D.S. y Hao, D. (1990)**. Latent Heat of Vaporization for Main Crops and Selected Foods. Paper N° 90-408, Canadian Society of Agricultural Engineering, Saskatoon, Canada.
- **Cheftel, J.C.; Cheftel, H. y Besancon, P. (1977)**. Introducción a la Bioquímica y Tecnología de los Alimentos. Acribia, Zaragoza, España.
- **Chen, C. y Jayas, D.S. (1998)**. Evaluation of the GAB Equation for the Isotherms of Agricultural Products. Transactions of the ASAE 41(6):1755-1760.
- **Chirife, J. e Iglesias, H. (1984)**. Consideraciones sobre la Cinética de Secado de Granos y las Humedades de Equilibrio durante el Almacenaje. La Refrigeración como Medio para Disminuir las Pérdidas Post-Cosecha. Tomo II. Páginas 5-61. PNITA-SECYT y OEA. Buenos Aires.
- **Chirife, J.; Resnik, S. y Suárez, C. (1985)**. Fundamentos de Secado y Almacenaje de Granos. Curso de Postgrado. Departamento de Industrias. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.
- **Chirife, J.; Timmermann, E.O.; Iglesias, H. y Boquet, R. (1992)**. Some Features of the Parameter k of the GAB Equation as Applied to Sorption Isotherms of Selected Food Materials. Short Communication. Journal of Food Engineering 15, 75-82.
- **CIMBRIA Unigrain (1990)**. Grain Drying Guide. DK-7700 Thisted, Denmark.
- **Clark, R.G. y Lamond, W.J. (1968)**. Drying Wheat in Two Foot Beds. I: Rate of Drying. Journal of Agricultural Engineering Research 13 (2): 141-148.
- **Compton's New Media, Inc. (1995)**. Compton's 1996 Interactive Encyclopedia in CD-ROM.

Referencias

- **Cory, W.T.W. (1991)**. Fans for Today's Agriculture. The Agricultural Engineer. Spring Issue.
- **Crank, J. (1975)**. The Mathematics of Diffusion, 2nd Edition. Oxford University Press.
- **Crapiste, G.; Urbicain, M. y Rotstein, E. (1984)**. Secado de alimentos mientras prevalece la estructura celular. La Refrigeración como Medio para Disminuir las Pérdidas Post-Cosecha. Tomo I. Sección I Páginas 159-200. PNITA-SECYT y OEA. Buenos Aires.
- **Crapiste, G.H. y Rotstein, E. (1997)**. Design and Performance Evaluation of Dryers. Cap. 4 (páginas 125-165) en Handbook of Food Engineering Practice (Editores: Valentas, K.J.; Rotstein, E. y Singh, R.P.), CRC Press, Boca Raton y New York.
- **Cunningham, R.E. y Lombardi, J.L. (1978)**. Fundamentos del Diseño de Reactores 2^o Edición. Tomo I. EUDEBA SEM., Buenos Aires.
- **Damario, E.A. y Pascale, A.J. (1988)**. Características Agroclimáticas de la Región Pampeana Argentina. Revista de la Facultad de Agronomía 9 (1-2): 41-64. Universidad de Buenos Aires.
- **Daud, W.R.W.; Talib, M.Z.M. e Ibrahim, M.H. (1996)**. Characteristic Drying Curves of Cocoa Beans. Drying Technology 14 (10) 2387-2396.
- **Dávila, S.I.; Chen, H.L. y Welch, G.B. (1983)**. Simulation Model for Reversing Direction Airflow Drying of Rough Rice. Transactions of the ASAE 26(6): 1842-1848.

Referencias

- **De Boer, J.H. (1953)**. The Dynamical Character of Adsorption. Clarendon Press, Oxford, UK.

- **De Dios, C.A. (1985)**. Seca-Aireación de Granos. Serie: Tecnología Post-Cosecha 5. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, Santiago, Chile.

- **De Dios, C.A. (1988)**. Comunicación Personal en la Estación Experimental Agropecuaria Pergamino, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA).

- **De Dios, C.A. (1996)**. Secado de Granos y Secadoras. Serie Tecnología Post Cosecha 11. Oficina Regional de la FAO para América Latina y el Caribe, Santiago, Chile.

- **Desrosier, N.W. (1959)**. The Technology of Food Preservation. The Avi Publishing Co, Inc. Westport, Connecticut.

- **Disney, R.W. (1954)**. The Specific Heat of Some Cereal Grains. Cereal Chemistry 31: 229-239.

- **Dreifuss, E. y Gasset, J. (1995)**. Programa de Cooperación en el Área del Uso Racional de la Energía entre la Unión Europea y la República Argentina. Proyecto URE N° 9. Uso Racional de la Energía en el Secado de Granos. Jornadas de Difusión.

- **Dutta, S.K.; Nema, V.K. y Bhardwaj, R.K. (1988)**. Drying Behavior of Spherical Grains. International Journal of Heat & Mass Transfer 31 (4): 855-862.

- **Ergun, S. (1952)**. Fluid Flow through Packed Columns. Chemical Engineering Progress 48: 89-94.

- **Escardino, A.; Ruiz, F. y Barbero, P. (1970).** Circulación de Aire a través de Lechos de Cereal. *Revista de Agroquímica y Tecnología de Alimentos* 10 (4): 528-539.

- **Farina, H.I.; Ferreti, O.A. y Barreto, G.F. (1986).** Introducción al Diseño de Reactores Químicos. EUDEBA SEM, Buenos Aires.

- **Fortes, M. y Okos, M.R. (1980).** Drying Theories: Their Bases and Limitations as Applied to Foods and Grains. Capítulo 5 en *Advances in Drying* Vol. 1. (Editor: Mujumdar, A.S.). Hemisphere Publishing, Washington.

- **Fortes, M.; Okos, M.R. y Barrett, J.R. (1981).** Heat and Mass Transfer Analysis of Intra-kernel Wheat Drying and Rewetting. *Journal of Agricultural Engineering Research* 26: 109-125.

- **GADAR, S.R.L. (1994).** Catálogos de Secadoras de Granos. Arequito, Santa Fé.

- **Gamson, B.W.; Thodos, G. y Hougen, O.D. (1943).** Heat, Mass and Momentum Transfer in the Flow of Gases through Granular Solids. *Transactions of the American Institute of Chemical Engineers* 39: 1-35.

- **Gely, M.C. y Giner, S.A. (1997).** Equilibrio Sorcional Agua-Maíz: Dependencia de la Ecuación de GAB con la Temperatura y Cálculo del Calor de Sorción. X Seminario Latinoamericano de Ciencia y Tecnología de Alimentos/ 7º Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de Alimentos. Libro de Resúmenes, pag. 1-17.

- **General Eastern Instruments (1994).** Hygro M4 Operators' Manual. Woburn, MA, USA.

- **Gallaher, G.L. (1951).** A Method for Determining the Latent Heat of Agricultural Crops. *Agricultural Engineering* 32: 34.

Referencias

- **Ghaly, T.F.; Edwards, R.A. y Ratcliffe, J.S. (1973).** Heat-Induced Damage in Wheat as a consequence of Spouted Bed Drying. *Journal of Agricultural Engineering Research* 18: 95-106.

- **Ghaly, T.F.; Edwards, R.A. y Ratcliffe, J.S. (1974).** Heat Sensitivities of Air Drying Wheat.- A Proposed Technique to Predict Properties of Exit Product of a Spouted Bed Drier. *Journal of Agricultural Engineering Research* 19 (3): 289-295.

- **Ghaly, T.F. y Taylor, P.A. (1981).** Quality Effects of Heat Treatment of Two Wheat Varieties. *Journal of Agricultural Engineering Research* 27: 227-234.

- **Ghaly, T.F. y Van der Touw, J.W. (1982).** Heat Damage Studies in Relation to High Temperature Disinfestation of Wheat. *Journal of Agricultural Engineering Research* 27(4): 329-336.

- **Gherbezza, E.; Solans, J.; Saranich, R.; Monti, J.; Valfiorani, M.; Urrutigoity, E. y Purinán, H. (1986).** Ahorro de Energía en una Secadora de Granos con Recuperación de Calor. Ensayos Comparativos. Dirección General de Asesoramiento Técnico, Rosario. Ministerio de Economía de la Provincia de Santa Fé.

- **Gherbezza, E. (1990).** Ahorro Energético en el Secado de Granos mediante Aislación de la Cámara de Gases Calientes de una Secadoras. *Università Degli Studi. Istituto di Ingegneria Agraria, Milano.*

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

- **Giner, S.A. y De Michelis, A. (1988).** Evaluation of the Thermal Efficiency of Wheat Drying in Fluidized Beds. Influence of Air Temperature and Heat Recovery. *Journal of Agricultural Engineering Research* 41: 11-23.

Referencias

- **Giner, S.A. (1989)**. Rough Rice Properties: Grain Density versus Moisture, Bed Resistance to Airflow and Kinetic Parameters of Drying at Ambient Temperatures. Latin American Applied Research 19: 75-82.
- **Giner, S.A. (1994)**. Información sobre el Secado y Almacenamiento de Granos en Argentina. Proceedings of the International Symposium on Grain Conservation, Páginas 413-448. FAO-CESA, Canela, RS, Brazil.
- **Giner, S.A.; Borrás, F.; Robutti, J.L. y Añón, M.C. (1994)**. Drying Rates of 25 Argentinian Varieties of Soybean: A Comparative Study. Lebensmittel, Wissenschaft und Technologie 27: 308-313.
- **Giner, S.A.; Denisienia, E.; Jovanovich, G. y Añón, M.C. (1997)**. Medición de A_w con un Sistema Optico de Punto de Rocío. Resultados Preliminares para Aislados Proteicos de Soja. X Seminario Latinoamericano de Ciencia y Tecnología de Alimentos/ 7° Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de Alimentos. Libro de Resúmenes, pag. 2-22.
- **Giner, S.A.; Bruce, D.M. y Mortimore, S. (1998)**. Two-Dimensional Model of Steady-State Mixed-Flow Grain Drying. Part 1: The Model. Journal of Agricultural Engineering Reserch 71: 37-50.
- **Giner, S.A. y Bruce, D.M. (1998)**. Two-Dimensional Simulation Model of Steady-State Mixed-Flow Grain Drying. Part 2: Experimental Validation. Journal of Agricultural Engineering Research 71: 51-66.
- **Grama, S.N.; Bern, C.J. y Hurburgh Jr, C.R. (1984)**. Airflow Resistance of Mixtures of Shelled Corn and Fines. Transactions of the ASAE 27: 268-272.
- **Green, D.W. y Maloney, J.O. (Editors) (1984)**. Perry's Chemical Engineers' Handbook. Sixth Edition. New York: Mc Graw Hill.

Referencias

- **Gregg, S.J. y Sing, K.S.W. (1967).** Adsorption, Surface Area and Porosity. Academic Press, London and New York.
- **Guggenheim, E.A. (1966).** Applications of Statistical Mechanics. Clarendon Press, Oxford, UK.
- **Gupta, A.K. y Woods, J.L. (1992).** A Variable-Grid Model of a Spherical Kernel during Drying. Agricultural Engineering 28: 302-314.
- **Haghighi, K.; Irudayaraj, R.; Stroshine, L. y Sokhansanj, S. (1990).** Grain Kernel Drying Simulation using the Finite Element Method. Transactions of the ASAE 33: 1957-1965.
- **Hall, C.W. (1971).** Drying Farm Crops. Avi Publishing Company, Westport, Connecticut.
- **Haque, E.; Foster, G.H.; Chung, D.S. y Lai, F.S. (1978).** Static Pressure Drop across a Bed of Corn Mixed with Fines. Transactions of the ASAE 21: 997-1000.
- **Haque, E.; Chung, D.S. y Foster, G.H. (1981).** Analytical Solution of the Pressure and Velocity Field in Steady State Incompressible Axisymmetric Darcy Flow through Granular Materials such as Corn. Transactions of ASAE 24(6):1618-1620.
- **Haque, E.; Ahmed, Y.N. y Deyoe, C.W. (1982).** Static Pressure Drop in a Fixed Bed of Grain as Affected by Grain Moisture Content. Transactions of the ASAE 25: 1095-1098.
- **Heldman, D.R. y Singh, R.P. (1981).** Food Process Engineering, 2nd Edition. AVI Publishing, Westport, Connecticut.

Referencias

- **Henderson, S.M. (1952)**. A Basic Concept of Equilibrium Moisture. *Agricultural Engineering* 33, 29-31.

- **Himmelblau, D.M. y Bischoff, K.B. (1976)**. *Process Analysis and Simulation*. John Wiley & Sons, Inc., New York.

- **Himmelblau, D.M. (1988)**. *Balances de Materia y Energía 4º Edición*. Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A. México.

- **Hoebink, J.H.B.J. y Rietema, K. (1980)**. Drying Granular Solids in Fluidized Bed. I. Description on Basis of Mass and Heat Transfer Coefficients. *Chemical Engineering Science* 35: 2135-2140.

- **Hui, Y.H. (1992) (Editor)**. *Encyclopedia of Food Science and Technology*. Vol. III. John Wiley & Sons, Inc., New York.

- **Hukill, W.V. e Ives, N.C. (1955)**. Radial Airflow Resistance of Grain. *Agricultural Engineering* 36(5):332-335.

- **Hunter, A.J. (1983)**. Pressure Difference across an Aerated Seed Bulk for Some Common Duct and Store Cross-Sections. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 28: 437-450.

- **Hutchinson, J.B. (1944)**. The Drying of Wheat. III. The Effect of Temperature on Germination Capacity. *J. Soc. Chem. Ind.* 63: 104-114.

- **IASCAV (1993)**. Información estadística de humedades de recibo. Instituto Argentino de Sanidad y Calidad Vegetal. Dirección de Calidad. Área de Productos Granarios.

Referencias

- **Iglesias, H.A. y Chirife, J. (1976)**. Handbook of Food Isotherms. Academic Press, New York.
- **Ingels, D.M. (1985)**. What Every Engineer Should Know about Computer Modelling and Simulation. Marcel Dekker, Inc., New York and Basel.
- **Ingram, G.W. (1976)**. Deep-Bed Drier Simulation with Intra-Particule Moisture Diffusion. Journal of Agricultural Engineering Research, 21: 263-272.
- **INTA (1993)**. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Proyecto : Desarrollo y Difusión de Tecnología para Reducir las Pérdidas de Postcosecha y Mejorar la Calidad de Granos de Cereales y Oleaginosas (PROGRAMOS).
- **INTA-PROPECO (1994)**. Trigo: Cosecha, Secado y Almacenaje. Cuaderno de Actualización Técnica N°13. Estación Experimental Agropecuaria Manfredi. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria.
- **IRADI (1989)**. Catálogos de Secadoras Continuas de Granos. IRADI, S.A.I.C.I.A. Pergamino, Buenos Aires.
- **IRAM (1983)**. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. Norma IRAM 8032 Parte I. SECADORAS DE GRANOS DE FLUJO CONTINUO. Métodos de Ensayo.
- **IRAM (1987)**. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. Norma IRAM 8032 Parte I. SECADORAS DE GRANOS. Nomenclatura
- **IRAM (1989)**. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. Norma IRAM 8032 Parte II. SECADORAS DE GRANOS. Partes Constitutivas.

Referencias

- **IRAM (1990)**. Instituto Argentino de Racionalización de Materiales. Norma IRAM 8027. SECADORAS DE GRANOS. Definiciones.
- **Jayas, D.S.; Cenkowski, S.; Pabis, S. y Muir, W.E. (1991)**. Review of Thin-Layer Drying and Wetting Equations. *Drying Technology* 9(3): 551-588.
- **Jensen, R.M. (1995)**. Comunicación Personal. Jensen Aireación, Venado Tuerto, Santa Fé.
- **Junta Nacional de Granos (1985)**. Información Estadística.
- **Keey, R.B. (1972)**. *Drying Principles and Practice*. Pergamon Press, Oxford.
- **Keey, R.B. y Suzuki, M. (1974)**. On the Characteristic Drying Curve. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 17: 1455-1464.
- **Keey, R.B. (1978)**. *Introduction to Industrial Drying Operations*. Pergamon Press, Oxford.
- **Keey, R.B. (1992)**. *Drying of Loose and Particulate Materials*. Hemisphere, New York.
- **Kent, N.L. (1970)**. *Technology of Cereals*. Oxford: Pergamon Press.
- **Kumar, A. y Muir, W.E. (1986)**. Airflow Resistance of Wheat and Barley as Affected by Airflow Direction, Filling Method and Dockage. *Transactions of the ASAE* 29(5): 1423-1426.
- **Kunii, D. y Levenspiel, O. (1969)**. *Fluidization Engineering*. New York: John Wiley & Sons.

Referencias

- **Lasserán, J.C. (1982)**. Le Séchage des Grains- Principes, Appareillage, Economies d'énergie, et Sécurité Incendie. Capítulo 27 :631-686 en Conservation et Stockage des Grains et Graines et Produits Derivés. Volumen II. J.L. Multon (Coordinateur). Technique et Documentation Lavoisier, París.

- **Lasserán, J.C. (1994)**. Improvement of Aeration Duct System and Management to Control the Quality of Grains. Proceedings of the International Symposium on Grain Conservation (FAO-CESA) Section II : 197-214.

- **Lewis, W.K. (1921)**. The Drying Rate of Solid Materials. Industrial Engineering Chemistry 13: 427-432.

- **Li, W. y Sokhansanj, S. (1994)**. Generalized Equation for Airflow Resistance of Bulk Grains with Variable Density, Moisture Content and Fines. Drying Technology 12(3): 649-668.

- **Lindberg, J.E. y Sorensson (1959)**. Heat treatment and Hot-Air Drying of Grain notably Wheat. J. Roy. Swed. Acad. Agric. For, Supplement 1. Stockholm, Sweden.

- **Lomauro, C.J.; Bakshi, A.S. y Labuza, T.P. (1985)**. Evaluation of Food Moisture Sorption Isotherm Equation. Part II: Milk, Coffee, Tea, Nuts, Oilseeds, Spices and Starchy Foods. Lebensmittel, Wissenschaft und Technologie 18 , 118-124.

- **López Roman, L. (1995)**. Programación Estructurada: Un Enfoque Algorítmico. Computec Editores, México D.F..

- **Lupano, C.E. (1986)**. Deterioro Bioquímico durante el Secado de Trigo. Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias Exactas, Universidad Nacional de La Plata.

- **Lupano, C.E. y Añón, M.C. (1986)**. Denaturation of Wheat Germ Proteins during Drying. *Cereal Chemistry* 63 (3): 259-262.

- **Maier, D.E.; Moreira, R.G. y Bakker-Arkema, F.W. (1992)**. Comparison of Conventional and Chilled Aeration of Grains under Texas Conditions. *Applied Engineering in Agriculture* 8(5): 661-667.

- **Maier, D.E. y Bakker-Arkema, F.W. (1992)**. The Counterflow Cooling of Feed Pellets. *Journal of Agricultural Engineering Research* 53: 305-319.

- **Mao, Z. y Nellist, M.E. (1991)**. Two Dimensional Heat and Mass Transfer Simulation Program. Part 1. Model and Method. Div. Note D.N. 1600. AFRC Institute of Engineering Research, Silsoe, UK.

- **Martínez Vera, C; Vizcarra-Mendoza, M.; Galán-Domingo, O. y Ruiz-Martínez, R. (1995)**. Experimental Validation of a Mathematical Model for the Batch Drying of Corn Grains. *Drying Technology* 13 (1&2): 333-350.

- **Marsans, G.J. (1985)**. Manejo de Granos en Plantas de Acopio. Editado por la Asociación Cooperadora "Amigos de las Escuelas de Recibidores de Granos". Junta Nacional de Granos, Buenos Aires.

- **Masters, K. (1991)**. *Spray Drying Handbook*, 5th Edition. Longman Scientific and Technical, Essex, UK.

- **Mayol, J.P. (1985)**. Secado y Almacenamiento de Granos. Conferencia dictada en el Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos (CIDCA), Facultad de Ciencias Exactas, UNLP-CONICET.

- **McKenzie, B.A. y Foster, G.H. (1980)**. Dryeration and Bin Cooling for Grain. AE 107, Coop. Ext. Serv. Purdue University, West Lafayette, Indiana.

Referencias

- **McKenzie, B.A.; Foster, G.H. y Deforest, S.S. (1980)**. Fan Sizing & Application for Bin Drying/Cooling of Grain. Report AE-106, Cooperative Extension Service, Purdue University, West Lafayette, Indiana 47907.
- **Morey, R.V. y Cloud, H.A. (1973)**. Simulation and Evaluation of a Multiple Column Crossflow Grain Dryer. Transactions of the ASAE: 984-987.
- **Morey, R.V.; Keener, H.M.; Thompson, T.L.; White, G.M. and Bakker-Arkema, F.W. (1978)**. The Present Status of Grain Drying Simulation. Paper 78-3009. American Society of Agricultural Engineers, St Joseph, MI 49085.
- **Mujumdar, A.S. (Editor) (1991)**. Drying'91. Hemisphere Publishing, Co.
- **Mujumdar, A.S. y Menon, A.S. (1995)**. Drying of Solids: Principles, Classification and Selection of Dryers. Capitulo 1 (Páginas 1-40) en Handbook of Industrial Drying (Editor: Mujumdar, A.S.). Marcel Dekker, Inc., New York.
- **Mulet, A. (1994)**. Drying Modelling and Water Diffusivity in Carrots and Potatoes. Journal of Food Engineering 22: 329-348.
- **Multon, J.L. (1982)**. Conservation et Stockage des Grains et Graines et Produits Dérivés. Volume 1. Paris: Technique & Documentation Lavoisier.
- **Multon, J.L. (1988)**. Interactions between Water and the Constituents of Grains, Seeds and By-Products. En Preservation and Storage of Grains, Seeds and By-Products (Páginas 89-159, Editor: Multon, J.L.). Lavoisier, New York.
- **Nellist, M.E. (1974)**. The Drying of Ryegrass Seed in Deep Layers. PhD Thesis. University of Newcastle upon Tyne, UK.

Referencias

- **Nellist, M.E. (1978).** Safe Temperatures for Drying Grain. Report N° 29. National Institute of Agricultural Engineering, Silsoe, UK.
- **Nellist, M.E. y Dumont, S. (1979).** Desorption Isotherms for Wheat. Divisional Note DN/CDV/983/06010, National Institute of Agricultural Engineering, Silsoe, UK.
- **Nellist, M.E. (1980).** Safe Drying Temperatures for Seed Grain. In: Seed Production. (Editor: Hebblethwaite, P.D.) páginas: 371-378. Butterworths, London.
- **Nellist, M.E. (1981).** The Viability of Seeds Dried with Heated Air. Seed Science & Technology 9: 439-455.
- **Nellist, M.,E. (1982).** Developments in Continuous-Flow Grain Driers. The Agricultural Engineer 37:74-80.
- **Nellist, M.E. (1984).** Some Developments in Heated-Air Grain Drying. Farm Buildings & Engineering 1 (1): 25-31.
- **Nellist, M.E. (1986).** The Drying of Wheat in the U.K. Conferencia en el 1° Congreso Nacional de Trigo. A.I.A.N.B.A., Pergamino, Argentina.
- **Nellist, M.E. (1987).** Modelling the Performance of a Cross-Flow Grain Drier. Journal of Agricultural Engineering Research 37 (1): 43-57.
- **Nellist, M.E. (1989).** Applications of Computer Simulation Techniques to the Design and Use of Grain Dryers. Paper to Workshop on Grain Drying and Bulk Handling and Storage Systems in ASEAN, Pitsanuloke, Thailand.

Referencias

- **Nellist, M.E. y Bruce, D.M. (1992)**. Grain dryer Testing-Procedure, Calculation and Adjustment of Results, and Effect of Errors. *Journal of Agricultural Engineering Research* 52(1). 35-51.
- **Nellist, M.E. (1995)**. Engineering Advances in Drying and Storage of Grain. Home-Grown Cereal Authority 1995 Conference on Cereals R & D. Robinson College, Cambridge.
- **Nellist, M.E. y Bruce, D.M. (1995)**. Heated-Air Grain Drying. Capítulo 16 (Páginas 609-659) en *Stored Grain Ecosystems* (Editores: Jayas, D.S.; White, N.D.G. y Muir, W.E.). Marcel Dekker, New York-Basel-Hong Kong
- **Nelson, S.O. (1980)**. Moisture-Dependent Kernel- and Bulk-Density Relationships for Wheat and Corn. *Transactions of the ASAE* 23(1): 139-143.
- **NIAE (1962)**. Report on Test of Gascoigne 3/70 Grain Drier. National Institute of Agricultural Engineering, Silsoe, Bedford, Inglaterra.
- **NIAE (1963)**. Test Report for Users: Airwoods 40 Grain Drier. National Institute of Agricultural Engineering, Silsoe, Bedford, Inglaterra.
- **NIAE (1964)**. Test Report for Users: Allmet 50 cwt Grain Drier D400/63 Series. National Institute of Agricultural Engineering, Silsoe, Bedford, Inglaterra.
- **Nonhebel, G. y Moss, A.A.M. (1979)**. El Secado de Sólidos en la Industria Química. Reverté, Barcelona.
- **Numerical Algorithms Group (NAG) (1989)**. D02RAF NAG FORTRAN Library Manual, Mark 14, Oxford, UK.

Referencias

- **Nybrant, T. (1986)**. Modeling and Control of Agricultural Grain Driers. Thesis for Doctorate of Technology. University of Uppsala, Sweden.

- **O'Callaghan, J.R.; Menzies, D.J. and Bailey, P.H. (1971)**. Digital Simulation of Agricultural Dryer Performance. *Journal of Agricultural Engineering Research* 16: 223-244.

- **Olesen, H.T. (1987)**. Grain Drying. Thisted, Denmark: Innovation Development Engineering. Aps. Aasvej 21, 7700 Thisted, Denmark.

- **Othmer, D.F. (1940)**. Correlating Vapour Pressure and Latent Heat Data. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry* 32(6):841-845.

- **Pabis, S. y Henderson, S.M. (1962)**. Grain Drying Theory III. The Air/Grain Temperature Relationship. *Journal of Agricultural Engineering Research* 7 (1): 21-26.

- **Pagano, A.M.; Riccobene, I.; Latreite, M.S.; Nolasco, S.; Apro, N. y Resnik, S. (1990)**. Diagnóstico del Almacenamiento de Granos en los Partidos de Olavarría y Nueve de Julio de la Provincia de Buenos Aires. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional del Centro.

- **Page, C. (1949)**. Factors Influencing the Maximum Rate of Air Drying Shelled Corn in Thin Layers. M.S. Thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA.

- **Pandey, D.K. y Upadhyay, S.N. (1981)**. Mass Transfer between the Particles and the Fluid in Fluidized Beds of Large Particles. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 24: 1221-1228.

Referencias

- **Parry, J.L. (1985)**. Mathematical Modelling and Computer Simulation of Heat and Mass Transfer in Agricultural Grain Drying: A Review. *Journal of Agricultural Engineering Research* 32 (1) 1-29.
- **Parti, M. (1993)**. Selection of Mathematical Models for Drying Grain in Thin Layers. *Journal of Agricultural Engineering Research* 54: 339-352.
- **Patterson, R.J.; Bakker-Arkema, F.W. y Bickert, W.G. (1971)**. Static Pressure-Airflow Relationships in Packed Beds of Granular Biological Materials such as Grain II. *Transactions of the ASAE* 14: 172-174, 178.
- **Peters, M.S. y Timmerhaus, K.D. (1980)**. *Plant Design and Economics for Chemical Engineers*. Third Edition. Mc Graw-Hill, New York.
- **Pfost, H.B.; Mourer, S.G.; Chung, D.S. y Milliken, G.A. (1976)**. Summarizing and Reporting Equilibrium Moisture Data for Grains. ASAE Paper N° 76-3520, St-Joseph, MI.
- **Pixton, S.W y Henderson, S. (1981)**. The Moisture Content-Equilibrium Relative Humidity Relationships of Five Varieties of Canadian Wheat and Candle Rapeseed at Different Temperatures. *Journal of Stored Products Research* 17: 187-190.
- **Puzzi, D. (1984)**. *Manual de Almacenamiento de Granos*. Editorial Hemisferio Sur S.A., Buenos Aires.
- **Radován, J.; Bellutti, G. y Monti, J. (1988)**. *Recuperación de Calores Perdidos en el Secado de Granos y Optimización del Proceso*. Ensayo en Trigo Cosecha 1988. Dirección General de Asesoramiento Técnico, Rosario. Ministerio de Economía de la Provincia de Santa Fé.

Referencias

- **Ratti, C. (1991).** Diseño de Secaderos de Productos Frutihortícolas. Tesis Doctoral. Departamento de Química e Ingeniería Química. Planta Piloto de Ingeniería Química. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina.

- **Ratti, C. y Crapiste, G.H. (1992).** A Generalized Drying Curve for Shrinking Food Materials. In Drying 92 (Editor Mujumdar, A.S.) (Páginas, 864-873). Elsevier, New York.

- **Reid, R.C.; Prausnitz, J.M. y Sherwood, T.K. (1977).** The Properties of Gases and Liquids. Mc Graw Hill Book Compnay, New York.

- **Rígoli, M.I.; Giner, S.A. y Mascheroni, R.H. (1994).** Modelado del Secado Spray en Flujo Co-Corriente. Actas del VI Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de Alimentos: 131-133. AATA-PROTAL, Buenos Aires.

- **Roberts, E.H. (1960).** The Viability of Cereal Seed (in Storage) in relation to Temperature and Moisture. Annals of Botany 24: 12-31.

- **Rodríguez, J.C. (1982).** Energy Efficiency and Grain Quality Characteristics in Cross-Flow and Concurrent-Flow Dryers. PhD Thesis, Michigan State University.

- **Rodríguez, J.C. (1994).** Evaluación de un Sistema de Secado de Granos con Aire Natural. Proceedings of the International Symposium on Grain Conservation (Organized by FAO-CESA) pp. 215-236. Canela, RS, Brazil.

- **Rovedo, C.O.; Aguerre, R.J. y Suárez, C. (1993).** Measuring and Modelling the Water Vapour Desorption in Sunflower Seed. International Journal of Food Science and Technology 28, 153-158.

Referencias

- **Ryniecki, A. y Nellist, M.E. (1991)**. Optimization of control Systems for Near-Ambient Drying I. The Optimization Procedure. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 48(1): 1-17.

- **SAGyP (1991)**. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. Servicio Nacional de Semillas. Ley de Semillas N° 20247, 1973. Decreto Reglamentario 2183.

- **SAGyP (1994)**. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. Resolución N° 549. Estándar para la Comercialización de Trigo Pan.

- **SAGyP (1995)**. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación. Calidad de Trigo. Información para Técnicos y Especialistas.

- **Schreiber, H.; Muhlbauer, W., Wassermann, L. y Kuppinger, H. (1981)**. Influence of Drying on Wheat Quality. Study of the Reaction Kinetics. *Zeitschrift fur Lebensmittel-Untersuchung und Forschung* 173 (3): 169-175. NIAE Translation N° 517, Silsoe, UK.

- **Serena, N. (1994)**. Comunicación Personal. Centro de Investigación y Desarrollo en Criotecnología de Alimentos, CIDCA, UNLP-CONICET-CIC.

- **Shatadal, P. y Jayas, D.S. (1990)**. Moisture Sorption Isotherms of Grains and Oilseeds. *Postharvest News and Information* 1(6) 447-451.

- **Shedd, C.K. (1953)**. Resistance of Grain and Seeds to Airflow. *Agricultural Engineering* 34(9): 616-619.

- **Shewry, P. y Tatham, A. (1990)**. The prolamin storage proteins of cereal seeds: structure and evolution. *Biochemical Journal* 267: 1-12.

Referencias

- **Sokhansanj, S. y Bruce, D.M. (1987).** A Conduction Model to Predict Grain Temperatures in Grain Drying Simulation. Transactions of the ASAE 30(4): 1181-1184.

- **Sokhansanj, S. y Cenkowski, S. (1988).** Equipment and Methods of Thin-Layer Drying. A Review. Sixth International Drying Symposium IDS'88 Versailles, Páginas 160-170.

- **Sopade, P.A. y Ajisegiri, E.S. (1994).** Moisture Sorption Study on Nigerian Foods: Maize and Sorghum. Journal of Food Process Engineering 17, 33-56.

- **Spencer, H.B. (1969).** A Mathematical Simulation of Grain Drying. Journal of Agricultural Engineering Research 14(3): 226-235.

- **Spencer, H.B. (1972).** A Revised Model of the Wheat Drying Process. Journal of Agricultural Engineering Research 17: 189-194.

- **Spiazzi, E. y Mascheroni, R.H. (1997).** Mass Transfer for Osmotic Dehydration of Fruits and Vegetables.-I. Development of the Simulation Model. Journal of Food Engineering 34, 387-410.

- **Suárez, C., Chirife, J. y Viollaz, P. (1981).** Shape Characterization for a Simple Diffusion Analysis of Air Drying of Grains. Journal of Food Science 47: 97-101.

- **Sun, D.W. y Woods, J.L. (1993).** The Moisture Content/Relative Humidity Equilibrium Relationship of Wheat. A Review. Drying Technology 11, 1523-1551.

- **Sun, D.W. y Woods, J.L. (1994).** Low Temperature Moisture Transfer Characteristics of Wheat in Thin Layers. Transactions of the ASAE 37(6): 1919-1926.

Referencias

- **Sun, D.W. y Woods, J.L. (1997a)**. Simulation of the Heat and Moisture Transfer Process During Drying in Deep Grain Beds. *Drying Technology*, 15(10): 2479-2508.

- **Sun, D.W. y Woods, J.L. (1997b)**. Deep Bed Simulation of the Cooling of Stored Grain with Ambient Air: a Test Bed for Ventilation Control Strategies. *Journal of Stored Products Research* 33(4):299-312.

- **Thompson, T.L.; Peart, R.M. y Foster, G.H. (1968)**. Mathematical Simulation of Corn Drying- A New Model. *Transactions of the ASAE* 24 (3): 582-586.

- **Tolaba, M. y Suárez, C. (1988)**. Simulation of the Thin-Layer Drying of Corn by means of the Diffusional Model. *Lebensmittel, Wissenschaft und Technologie* 21(2): 83-86.

- **Tosi, E.A.; Re, E. D.; Macías, S.; Cazzoli, A. F. y Catalano, O. (1986)**. Perfiles de Temperatura, Humedad y Poder Germinativo en un Secadero de Flujos Cruzados. *Actas del Primer Congreso Nacional de Trigo, Tomo II*, 190-204. A.I.A.N.B.A., Pergamino.

- **Tosi, E.A.; Re, E. D.; Cazzoli, A. F., Tapiz, L.; Masciarelli, R. y Catalano, O. (1993)**. Secado de Trigo en Secaderos de Flujos Mixtos. Estudio de la Calidad del Secado. *La Alimentación Latinoamericana* N° 199.

- **Treybal, R.E. (1980)**. *Operaciones de Transferencia de Masa*" 2^{da} Ed. Mc Graw-Hill, México.

- **Van Arsdel, W. (1963)**. *Food Dehydration. Volume 1. Principles*. Van Arsdel y Copley (Eds). The AVI Publishing Company, Inc. Westport, Connecticut.

Referencias

- **van den Berg, C. y Bruin, S. (1981)**. Water Activity and its Estimation in Food Systems: Theoretical Aspects. En Water Activity: Influence on Food Quality (Páginas 1-61). (Editores: Rockland, L.B y Stewart, G.F). Academic Press, New York.
- **van den Berg, C. (1984)**. Description of Water Activity of Foods for Engineering Purposes by means of the G.A.B. Model of Sorption. Capítulo 31 (Páginas 311-321) en Engineering and Food. Volume 1. Engineering Sciences in the Food Industry (Editor: McKenna, B.M.). Elsevier Applied Science Publishers.
- **van den Berg, C. (1985)**. Water Activity. En Concentration and Drying of Foods (Páginas 11-36, Editor: McCarthy, Q.). Elsevier Applied Science Publisher, London.
- **Van Meel, D.A. (1958)**. Adiabatic Convection Batch Drying with Recirculation of Air. Chemical Engineering Science 9: 36-44.
- **Vázquez, A. y Calvelo, A. (1983)**. Gas-Particle Heat Transfer Coefficient for the Fluidization of Different Shaped Foods. Journal of Food Science 48: 114-118.
- **Villiermaux, J. (1993)**. Future Challenges for Basic Research in Chemical Engineering. Review Article. Chemical Engineering Science 48 (14): 2525-2535.
- **Wakao, N. y Kaguei, S. (1982)**. Heat and Mass Transfer in Packed Beds. Gordon and Breach Science Publishers, Inc. London, New York, Paris.
- **Warner, M.G.R. y Browne, D.A. (1962)**. Drying wheat 2ft deep in a 50 ft² tray. Journal of Agricultural Engineering Research 7(2): 112-127.
- **Weast, R.C. (Editor) (1975)**. Handbook of Chemistry and Physics. CRC Press, Inc., Cleveland, Ohio.

Referencias

- **Welty, J.R. (1974)**. Engineering Heat Transfer. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- **Wesselingh, J.A. y Krishna, R. (1997)**. Mass Transfer. Version 0.5. Department of Chemical Engineering. University of Amsterdam.
- **Wiederhold, P. (1995)**. Humidity Measurements. Capítulo 42: 1313-1341 en Handbook of Industrial Drying, Volume 2, 2nd Edition (Editor: Mujumdar, A.S.), Marcel Dekker Inc., New York.
- **Wilkinson, L. (1990)**. SYSTAT: The System for Statistics. SYSTAT Inc., Evanston, IL.
- **Woodforde, J. y Lawton, P.J. (1965)**. Drying cereal grain in beds six inches deep. Journal of Agricultural Engineering Research 10 (2): 146-155.
- **Woods, J.L. y Favier, J.F. (1993)**. Apparatus for Thin Layer Drying and Associated Error Analysis. Journal of Agricultural Engineering Research 55: 113-127.
- **Young, D.M. y Corwell, A.G. (1962)**. Physical Adsorption of Gases. Washington DC
- **Young, J.H. y Dickens, J.W. (1975)**. Evaluation of Costs for Drying Grain in Batch or Cross-Flow Systems. Transactions of the ASAE: 734-739.
- **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.

Referencias

- **Zimmerman, O.T. y Levine, I. (1945).** Psychrometric Tables and Charts. Dover, New Hampshire.
- **Zogzas, N.P., Maroulis, Z.B. y Marinos-Kouris, D. (1994).** Moisture Diffusivity: Methods of Experimental Determination. A Review. *Drying Technology*, 12 (3): 483-516.
- **Zogzas, N.P. y Maroulis, Z.B. (1996).** Effective Moisture Diffusivity Estimation from Drying Data. A Comparison between Various Methods of Analysis. *Drying Technology* 14 (7&8) 1543-1574.
- **Zogzas, N.P., Maroulis, Z.B. y Marinos-Kouris, D. (1996).** Moisture Diffusivity Data Compilation in Foodstuffs. *Drying Technology*, 14 (10): 2225-2254.
- **Zuritz, C.A. y Singh, R.P. (1982).** Simulation of Rough Rice Drying in Spouted Beds. *Drying' 82* (Páginas 239-247), (Editor: Mujumdar, A.S.). Hemisphere Publishing Co, Washington.

Investigacion previa empleada para este trabajo de tesis

- **Giner, S.A.; Lupano, C.E. y Añón. M.C. (1987).** Predicción numérica de temperaturas máximas para el secado de trigo en base al criterio de la viabilidad. V Congreso de Ciencia y Tecnología de Alimentos A.A.T.A., Salta.
- **Giner, S.A. y Mascheroni, R.H. (1989).** Modelado del secado de trigo en lecho fijo. XV Jornadas sobre Investigaciones en Ciencias de la Ingeniería Química y Química Aplicada. Universidad Nacional del Comahue. Neuquén

Referencias

- **Giner, S.A. y Mascheroni, R.H. (1990).** Secado de zanahoria. Datos no publicados. CIDCA, Facultad de Ciencias Exactas, UNLP-CONICET-CIC.

- **Giner, S.A. y Mascheroni, R.H. (1990).** Simulation of Cross-Flow Drying of Maize with Reversed Direction Airflow. Effect of Thin-Layer Equation. International Drying Symposium (IDS '90), Prague, Czechoslovakia.

- **Giner, S.A.; Lupano, C.E. y Añón, M.C. (1991).** A Model for Estimating Loss of Wheat Seed Viability during Hot-Air Drying. *Cereal Chemistry* 68 (1): 77-80.

- **Giner, S.A. (1991).** Modelo Matemático Aplicable a Diseño de Secadoras. Parte 1. *Aceites y Grasas* 1 (3): 43-47.

- **Giner, S.A. (1991).** Modelo Matemático Aplicable a Diseño de Secadoras. Parte 2. *Aceites y Grasas* 1 (4): 49-55.

- **Giner, S.A. y Mascheroni, R.H. (1992).** Modelado del Secado de Maíz en Secadoras de Flujo Cruzado con Aire de Dirección Alternante. Efecto de la Ecuación de Capa Delgada. *Anales del V Congreso Nacional de Maíz. Capítulo I: 28-38.* A.I.A.N.B.A., Pergamino, Argentina.

- **Giner, S.A. (1994).** Temas de Post-Cosecha de Granos Oleaginosos. Parte 1: Información General, Manejo de Aire Húmedo y Equilibrio Higroscópico Aire-Granos. *Aceites y Grasas* 17:71-83.

- **Giner, S.A. (1995).** Temas de Post-Cosecha de Granos Oleaginosos. Parte 2: Aireación de mantenimiento de Granos Ensilados Secos. *Aceites y Grasas* 18: 51-70.

Referencias

- **Giner, S.A. (1995).** Temas de Post-Cosecha de Granos Oleaginosos. Parte 3. Ingeniería de Secadoras de Granos y Condiciones de Diseño. Aceites y Grasas 19: 223-238.
- **Giner, S.A.; Mascheroni, R.H. y Nellist, M.E. (1996).** Cross-Flow Drying of Wheat. A Simulation Program with a Diffusion-Based Deep-Bed Model and a Kinetic Equation for Viability Loss Estimations. Drying Technology 14 (7&8):1625-1672.
- **Giner, S.A. y Denisienia, E. (1996).** Pressure Drop Through Wheat as Affected by Air Velocity, Moisture Content and Fines. Journal of Agricultural Engineering Research 63: 73-86.
- **Servieres, D.L. y Giner, S.A. (1997).** Secadoras Continuas de Granos: Desarrollo de un Modelo y Programa de Simulación de Diseño Básico. Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de La Plata.
- **Giner, S.A., Siri, G.J. y Mascheroni, R.H. (1998).** Secado de Granos Individuales de Trigo. Optimización del Coeficiente de Difusión a partir de Balances Microscópicos de Materia y Energía. Actas del 7º Congreso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia, LATCYM'98. Vol. I: 116-120.
- **Gely, M.C. y Giner, S.A. (1998).** Dependencia de los Parámetros Cinéticos de Secado de Trigo con la Isotherma de Equilibrio. Actas del 7º Congreso Latinoamericano de Transferencia de Calor y Materia, LATCYM'98. Vol. I: 111-115
- **Gely, M.C. y Giner, S.A. (1998).** Isotermas de Maiz y Soja. Estudio de la Ecuacion de Guggenheim, Anderson y De Boer (GAB) a distintas Temperaturas. Información Tecnológica. Revista Internacional 9 (4): 165-170 ISSN 0716-8756. Centro de Informacion Tecnologica, La Serena, Chile.

Referencias

- **Cúneo, J.M. y Giner, S.A. (1998)**. Desarrollo de un Psicrómetro Aspirado: Funcionamiento, Medición de Humedad Relativa del Aire y Análisis de los Errores. II Congreso CONEQ, Facultad de Ingeniería Química Universidad Nacional del Litoral, Santa Fé.
- **Gely, M.C. y Giner, S.A. (1999)**. Comportamiento del Modelo G.A.B. para Sorción de Agua en Trigo. VIII Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Rafaela, Santa Fé.
- **Giner, S.A. y Mascheroni, R.H. (1999)**. Simulador de Secadoras de Granos de Flujo Cruzado. VIII Congreso Argentino de Ciencia y Tecnología de Alimentos, Rafaela, Prov. Santa Fé.