

SEP INSTITUTO TECNOLÓGICO de celaya

I.Q./104/98

Asunto: Aprobación de Impresión
de Tesis de Maestría

20 de septiembre de 1998.

M.C. J. Guadalupe Michel Nava
Jefe del Depto. de Ingeniería Química.
Presente

De acuerdo con la convocatoria hecha por esa Jefatura a su digno cargo con el fin de determinar la aprobación de impresión del Proyecto de Tesis de Maestría, titulado: "ESTUDIO SOBRE EL SECADO DE LAGAZO DE CAÑA" presentado por el (la) ING. LILIA LETICIA MENDEZ LAGUNAS, comunico a usted que esta Comisión Revisora de tesis ha tenido a bien aprobar la impresión de este trabajo.

Lo anterior, para los efectos consiguientes.

Atentamente,



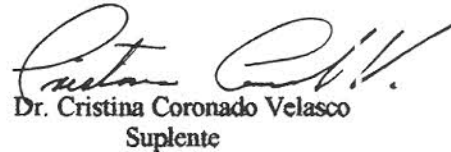
Dr. Pedro Alberto Quintana Hernández
Presidente



Dra. Gloria María Martínez González
Secretario



Dr. Gustavo Arturo Iglesias Silva
Vocal



Dr. Cristina Coronado Velasco
Suplente



DEDICATORIA

Dedico esta tesis al M.C. Jorge A. Maciel Suárez
Secretario Académico del Instituto Politécnico Nacional

Porque sin su ayuda no habría sido posible, agradeciéndole la confianza que puso en mi al apoyarme para que realizara mis estudios de posgrado.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a las siguientes instituciones:

Al **Instituto Politécnico Nacional** por las facilidades otorgadas para poder realizar mis estudios de posgrado.

Al **CONACyT** por el apoyo económico otorgado mediante el proyecto:

0333P-A9506 Modelos matemáticos del secado por transporte neumático de bagazo de caña y mediante beca de estudio número 115005

Al **COSNET** con apoyo económico número 649.95-P otorgado al mismo proyecto.

Al **Instituto Mexicano del Petróleo** especialmente al siguiente personal del Laboratorio Central de la División de Estructuras Químicas:

Químico Miguel Angel Flores Ríos, Jefe de la División de Estructuras Químicas

Química Emma García-Figueroa Medina, Jefa del Laboratorio de Microscopía

Química Cecilia Arzate Salgado, Jefa del Laboratorio de Catalizadores

Ing. Química Beatriz Mar Mar, Investigador del Lab. de Catalizadores

Por el apoyo otorgado de manera desinteresada, en la determinación de algunas propiedades físicas y fotografías electrónicas presentadas en esta tesis, así como sus valiosas observaciones a este respecto.

Con admiración y respeto y agradeciendo su paciencia al asesor de esta tesis Dr. Pedro Quintana Hernández.

Mi reconocimiento a todos los Profesores del Depto. de Ing. Química, que de una u otra manera me apoyaron durante mi estancia en el Departamento de Ing. Química.

Mi gratitud a la Dra. Cristina Coronado Velasco que me alentó a iniciar este Posgrado, a la Dra. Gloria María Martínez González que me distinguió con su amistad y al Dr. Gustavo Iglesias Silva que revisaron la tesis y aportaron sugerencias para mejorarlo.

Con un sincero reconocimiento por su labor al siguiente personal del Laboratorio de Química:

Dr. Julio Rocha Patiño, Jefe del Laboratorio de Ing. Química

Hector Vásquez Vera, Salvador Gutiérrez, Juvencio Miranda Mancera, J. Guadalupe Jiménez Flores, Personal de apoyo del Laboratorio de Ing. Química.

También agradezco a las siguientes personas que me distinguieron con su amistad y confianza:

Lic. Lorena Lara, Julia Moreno Arámbula, Ing. Eréndira Rodríguez, Lic. Leticia Villagómez Parra. Personal administrativo del Depto. de Ing. Química y a la Ing. Erika Guerrero Cabrera.

Quedo especialmente reconocida con la Lic. Rocío Esqueda y el Ing. Salvador Corona de la Dirección de Vinculación Académica y Tecnológica del I.P:N. por el buen trato recibido por ellos durante mi trámite de permiso en esa oficina.

ESTUDIO SOBRE EL SECADO DE BAGAZO DE CAÑA

Por:

Lilia L. Méndez Lagunas

RESUMEN

Se determinaron los coeficientes de transferencia de masa, calor y difusividad efectiva durante el secado de fibra y médula de bagazo de caña, así como propiedades físicas y termodinámicas del material de estudio. Las mediciones experimentales se realizaron en un secador de charolas mediante un sistema de adquisición de datos automatizado. La fibra integral fue desmedulada y separada en fracciones. Se seleccionaron 2 fracciones representativas de fibra y médula para realizar las pruebas experimentales.

Un diseño de experimentos anidado fue seleccionado para evaluar, mediante un análisis de varianza el efecto del tipo y tamaño del material, temperatura y flujo de aire.

Para determinar las isotermas de sorción de fibra y médula a 25 y 70 °C, se utilizaron celdas de equilibrio, soluciones de ácido sulfúrico y sales saturadas.

La relación de los principales componentes del bagazo de caña es de 51 % de fibra y 48% de médula. El material está conformado por estructuras huecas y múltiples poros cuyo tamaño se encuentra en el rango de macroporos.

Los factores significativos estadísticamente fueron el material, la temperatura, la interacción de éstos y en mucho menor medida el flujo de aire.

La diferencia entre la velocidad de secado en fibra y médula está influida por la fracción de huecos y la difusividad efectiva sigue un comportamiento exponencial con relación al contenido de humedad.

La ecuación de Guggenheim (1966), Anderson (1946) y De Boer (1953) ajustó las isotermas de adsorción obtenidas con un R^2 mayor a 0.97. Se observó que a mayor contenido de humedad es requerida menor cantidad de energía para remover moléculas de agua del sólido. Finalmente se determinó el calor isostérico de adsorción y el área superficial.

Dirigida por: Dr. Pedro A. Quintana Hernández

INDICE

RESUMEN	i
INDICE	ii
LISTA DE TABLAS	v
LISTA DE FIGURAS	vi
NOMENCLATURA	viii
Capítulo 1	1
INTRODUCCION	
1.1 Mecanismos de transporte de humedad	1
1.2 Datos experimentales en el secado de sólidos	2
1.3 Justificación	3
1.4 Descripción del bagazo de caña	4
1.5 Hipótesis	5
1.6 Objetivo	5
1.7 Metas	5
Capítulo 2	6
MARCO TEORICO	
2.1 Secado	6
2.2 Mecanismo de secado	6
2.3 Condiciones internas y externas de secado	9
2.4 Correlaciones de transferencia convectiva de masa y calor	10
2.5 Difusividad efectiva	11
2.6 Isotermas de sorción	12
2.7 La ecuación GAB	14
2.8 Efecto de la temperatura	16
2.9 Area superficial	17
2.10 Métodos para la determinación de isotermas de sorción	18
Capítulo 3	20
METODOLOGIA	
3.1 Equipo	20
3.1.1 Secador de charolas	20
3.1.2 Sistema de medición	20
3.1.3 Adquisición y manejo de datos	21
3.1.4 Balanza	21

3.1.5	Estufa de vacío	21
3.1.6	Celdas de equilibrio	21
3.2	Procedimiento	21
3.2.1	Determinación de humedad	21
3.2.2	Preparación de materiales	22
3.2.3	Separación por tamaños	22
3.2.4	Humidificación	23
3.2.5	Determinación del contenido de azúcares en bagazo integral	23
3.2.6	Método estándar para la determinación de área superficial y volumen de poro por adsorción de nitrógeno	23
3.2.7	Fotografía electrónica y estereoscópica	23
3.2.8	Secado en secador de charolas	24
3.2.9	Selección del método, procedimiento y calibración para la determinación de isotermas de sorción	25
3.2.10	Evaluación previa de equipo y procedimientos	26
3.3	Diseño de experimentos	26
3.3.1	Posición de las charolas	27
3.3.2	Diseño anidado	28
Capítulo 4		30
RESULTADOS		
4.1	Morfología del material	30
4.2	Separación por tamaños	34
4.3	Determinación del contenido de azúcares	35
4.4	Evaluación de la posición de las charolas	35
4.5	Secado de fibra y médula de bagazo de caña	37
4.5.1	Fracción de huecos	37
4.5.2	Curvas de secado	37
4.5.3	Evaluación estadística de resultados	42
4.5.4	Determinación de los coeficientes convectivos de masa y calor	46
4.5.5	Determinación de la difusividad efectiva	48
4.6	Isotermas de sorción	52
4.6.1	Evaluación del método	53
4.6.2	Isotermas de adsorción de fibra y médula	54
4.6.3	Área superficial	57
4.6.4	Efecto de la temperatura	58
Capítulo 5		60
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		
5.1	Conclusiones	60
5.2	Recomendaciones	61

BIBLIOGRAFIA

62

ANEXOS

A. Diseño y adaptación al equipo

66

B. Desmedulador

68

C. Manejo del secador

69

D. Puntos de seguridad en el manejo del secador

72

E. Determinación de los coeficientes de transferencia de masa y calor

73

LISTA DE TABLAS

	Página	
3.1	Humedad relativa de soluciones de sales saturadas	26
3.2	Diseño experimental anidado	29
4.1	Separación por tamaños	34
4.2	Primer momento utilizado en la evaluación de la posición de las charolas	35
4.3	Reporte del análisis estadístico de la evaluación de la posición de las charolas	36
4.4	Fracción de huecos y su desviación estándar	37
4.5	Resumen del diseño de experimentos y primer momento	42
4.6	Prueba de normalidad	44
4.7	Análisis de varianza	44
4.8	Propiedades y condiciones de operación de cada corrida utilizados en cálculos.	46
4.9	Propiedades del aire y del material	47
4.10	Coefficientes de transferencia de masa y calor	47
4.11	Números adimensionales	48
4.12	Coefficientes de la ecuación exponencial para fibra	50
4.13	Coefficientes para la ecuación exponencial en médula	51
4.14	Constantes de la regresión de la curva de calibración de papel filtro	54
4.15	Constantes de la ecuación GAB y ajuste	55
4.16	Factores de corrección de la ecuación GAB	53
4.17	Area superficial	53
4.18	Calores de sorción para fibra y médula	53

LISTA DE FIGURAS

	Página	
1.1	Isoterma de sorción	3
2.1	Curvas de secado típicas. Secado convectivo, condiciones externas constantes	7
2.2	Curvas de secado mostrando a) contenido de humedad en función del tiempo de secado y b) humedad removida en función del tiempo de secado.	3
2.3	Los 5 tipos de isothermas de adsorción de Van der Waals	13
3.1	Charolas ubicadas en los 4 niveles del soporte portamuestras	26
4.1	Partículas de médula adherida a una fibra	30
4.2	Fotografía de fibra	30
4.3	Fotografía electrónica de médula, ampliación 100X	31
4.4	Fotografía electrónica de médula, ampliación 1000X	31
4.5	Fotografía electrónica de médula, ampliación 100X	32
4.6	Fotografía electrónica de médula, ampliación 1000X	32
4.7	Fotografía electrónica de fibras, ampliación 20X	33
4.8	Fotografía electrónica de fibra, ampliación 200X	33
4.9	Fotografía electrónica de fibra, ampliación 1000X	34
4.10	Evaluación de la posición de las charolas	36
4.11	Pérdida de humedad de fibra a diferentes condiciones de secado	38
4.12	Pérdida de humedad de médula a diferentes condiciones de secado	38
4.13	Velocidad de secado de fibra	39
4.14	Velocidad de secado de médula	40
4.15	Pérdida de humedad con respecto al contenido de humedad en fibra	41
4.16	Pérdida de humedad con respecto al contenido de humedad en médula	41
4.17	Gráfico de probabilidad de los resultados experimentales	43
4.18	Histograma de los resultados experimentales	43
4.19	Gráficos de medias de efectos	45
4.20	Gráfico de medias de los efectos	45
4.21	Difusividad con respecto a la humedad en fibra	49
4.22	Difusividad con respecto a la humedad en médula	50

4.23	Comportamiento de la difusividad del material en fibra para las condiciones de operación 90°C, 2 m/s, 8-12	51
4.24	Celda de proximidad al equilibrio	53
4.25	Curva de calibración de papel filtro a 28 °C	54
4.26	Isoterma de adsorción de fibra a 25 °C y 70 °C	55
4.27	Isoterma de adsorción de médula a 25 °C y 70 °C	56
4.28	Isoterma de adsorción de celulosa microcristalina a 28 °C	57
4.29	Calor isostérico de sorción	59
A1	Secador de charolas	66
A2	Control PID	66
A3	Diagrama esquemático del sistema de calentamiento y control	66
A4	Guardamotor, control de temperatura de la resistencia adicional y relevador	67
A5	Instalación eléctrica	67
A6	Diagrama esquemático del desmedulador	68

NOMENCLATURA

A	Area superficial del sólido, m^2/kg
A	Coefficiente de la función de la difusividad con relación al contenido de humedad, m^2/s
a	Constante de regresión
A_{H_2O}	Area de una molécula de agua, m^2
a_w	Actividad de agua, adimensional
B	Coefficiente de la función de la difusividad con relación al contenido de humedad, $kg\ s.s./kg\ agua$
C	Constante de la ecuación de GAB
c	Factor de corrección de la ecuación de GAB
C_p	Capacidad calorífica, $J/kg\ ^\circ K$
D	Difusividad efectiva, m^2/s
D_{AB}	Difusividad molecular, m^2/s
G	Gasto de aire, $kg/m^2 \cdot s$
h	Coefficiente de transferencia de calor teórico, $W/m\ ^\circ K$
h_{exp}	Coefficiente de transferencia de calor experimental, $W/m\ ^\circ K$
H_L	Calor total de sorción de la primera capa, kJ/mol
H_n	Calor de vaporización de vapor de agua pura, kJ/mol
H_o	Calor total de sorción de la multicapa, kJ/mol
K	Constante de la ecuación de GAB
k	Factor de corrección de la ecuación GAB
k_a, k	Conductividad térmica aire, $W/m\ ^\circ K$
k_c	Coefficiente de transferencia de masa, $mol/m \cdot s$
L	Longitud de la charola, m
M_{H_2O}	Peso molecular del agua, $kg/kmol$
N	Número de Avogadro, moléculas/ $kmol$
p	Presión parcial, atm
P	Presión total, atm
p^*	Presión de vapor de agua, atm
q_{st}	Calor de sorción isostérico neto, kJ/mol
Q_{st}	Calor de sorción, kJ/mol

R	Constante de los gases, $8.314 \text{ m}^3 \cdot \text{Pa/mol} \cdot ^\circ\text{K}$
Rc	Pérdida de humedad, $\text{kg/m}^2 \cdot \text{s}$
T	Temperatura del aire, $^\circ\text{K}$
t	Tiempo, s
Ta	Temperatura del aire, $^\circ\text{K}$
Tp	Temperatura promedio, $^\circ\text{K}$
Ts	Temperatura del sólido, $^\circ\text{K}$
W	Contenido de humedad adimensionalizado, $(X-X_e)/(X_o-X_e)$
X	Contenido de humedad (b.s), kg agua/kg s.s.
Xe	Contenido de humedad en equilibrio (b.s), kg agua/kg s.s.
Xm	Contenido de humedad en la monocapa, $\text{kg. agua/kg.sólido seco}$
Xo	Contenido de humedad inicial, kg agua/kg s.s.
z	Coordenada dimensional, m
z _o	Altura del lecho del material en la charola, m
α	Nivel de significancia estadística
ρ	Densidad , kg/m^3
ρ_s	Densidad del sólido , kg/m^3
μ_a	Viscosidad del aire, $\text{Pa}\cdot\text{s}$
μ	Viscosidad, $\text{Pa}\cdot\text{s}$
ΔH_v	Calor de vaporización, J/kg

Números adimensionales

$Bi = \frac{h \cdot z_o}{k_{bag}}$	Número de Biot	$Fo = \frac{D \cdot t}{z_o^2}$	Número de Fourier
$Pr = \frac{C_p \mu}{k}$	Número de Prandtl	$Re = L \frac{G}{\mu}$	Número de Reynolds
$Sc = \frac{\mu}{\rho \cdot D_{AB}}$	Número de Schmidt	$Nu = \frac{h \cdot L}{k_a}$	Número de Nusselt
$Sh = \frac{k_c \cdot R \cdot T \cdot L}{P \cdot D_{AB}}$	Número de Sherwood		

Capítulo 1

INTRODUCCION

El secado es un proceso simultáneo de transferencia de masa y calor. En este proceso la transferencia de calor ocurre durante la evaporación de la humedad removida de un sólido húmedo, mientras que la transferencia de masa se lleva a cabo durante la remoción de la humedad de la superficie del sólido por un fluido externo seco, el cual usualmente es aire.

1.1 Mecanismos de transporte de humedad

Se supone que la humedad se mueve por alguno de los siguientes mecanismos: difusión líquida debido al gradiente de concentración, transporte líquido debido a las fuerzas capilares, difusión de vapor debido a los gradientes de presiones parciales de vapor, transporte de líquido o vapor debido a la diferencia en la presión total causada por presión y temperatura externas, capilaridad o vaporización-condensación. Además se ha demostrado que la humedad puede ser transportada dentro de un material si existe un gradiente de temperatura adecuado. Todos estos mecanismos juegan un importante rol bajo condiciones particulares de secado y no está bien establecido cual de ellos domina bajo condiciones específicas.

Aunque es cierto que las ecuaciones de transporte simplificado pueden ser usadas en circunstancias restringidas también es cierto que tienen malas predicciones. Esto se debe a la complejidad del proceso donde existe un amplio intervalo de condiciones externas como temperatura del aire, velocidad del aire, humedad relativa etc. y condiciones internas como contenido de humedad del sólido, temperatura del sólido etc.

La determinación experimental de las curvas de secado tiene diversos propósitos, tanto de orden práctico como por razones del conocimiento en sí mismo, entre otros: establecer correlaciones empíricas a partir de una serie de experimentos que relacionen el contenido de humedad con las diferentes variables, validar modelos de secado, contar con la información necesaria para determinar el tiempo de secado y tamaño del secador y estudiar los posibles mecanismos que intervienen en el fenómeno.

1.2 Datos experimentales en el secado de sólidos

Para predecir el secado de sólidos, en la práctica se requieren de datos experimentales tales como las curvas de secado y de algunas propiedades del material de estudio, como la humedad de equilibrio, el área superficial y el calor de sorción. Estos últimos valores pueden ser obtenidos de las isotermas de sorción.

Las isotermas de sorción son herramientas termodinámicas empleadas en la determinación de interacciones de agua de diversas sustancias, entre las de más interés se encuentran las alimenticias, además proporcionan información para evaluar operaciones de proceso como secado, mezclado, empacado y almacenado. Las isotermas de sorción también pueden ser usadas para investigar características estructurales como área superficial específica, volumen de poro, distribución de tamaño de poro y cristalinidad.

El límite de contenido de humedad que puede ser alcanzado en secado para unas condiciones dadas de temperatura y humedad del gas es definido como humedad en equilibrio (X_e). El conocimiento de las isotermas de sorción es esencial en **secado** ya que proporciona el valor X_e , además de que proporciona información sobre la calidad y la eficiencia de un proceso de secado (Papadakis y col., 1993). Las relaciones de cinéticas de secado expresan la velocidad como proporcional a la diferencia entre el contenido de humedad actual y el de equilibrio ($X-X_e$).

El comportamiento de un secador puede ser cualitativamente evaluado sobre la escala de contenido de humedad y el efecto producido puede ser visto en la escala de humedad en equilibrio en la figura 1.1 donde el punto C con cerca de 80 % de humedad en equilibrio, tiene aproximadamente la misma cantidad de agua que el punto A. Pero en el punto A se puede obtener un mejor y más estable producto con un ligero incremento del rendimiento del secador. El punto B requiere más rendimiento del secador, además de que B subirá hasta A si el producto es expuesto a un ambiente normal, siendo un desperdicio del rendimiento del secador (NOVASINA, 1990).

En **modelos** de secado la aplicación de las isotermas de sorción ha servido para establecer las condiciones frontera en la interfase a través de las ecuaciones de equilibrio de sorción.

En la literatura aparecen diversas ecuaciones de equilibrio de sorción han sido propuestos, entre otras las propuestas por Guggenheim (1966), Anderson (1946) y De Boer (1953) que se describen en secciones posteriores.

El contenido de humedad en equilibrio es especialmente importante en secado porque representa el valor limitante para condiciones de temperatura y humedad relativa dadas en el sistema de secado. En la teoría existente de secado, el contenido de humedad en equilibrio es una parte integral del problema de secado total (Kumar, 1974).

En el almacenamiento de productos secos las isoterma de sorción sirven para determinar la humedad en equilibrio (X_e) que corresponde a las condiciones bajo el cual el producto es guardado para su almacenaje. Si el valor X_e es mayor que el contenido de humedad de salida del secador entonces el secador estará evaporando innecesariamente. También si X_e es mayor que el contenido de humedad especificado para el producto final entonces las condiciones de guardado tendrán que ser cambiadas.

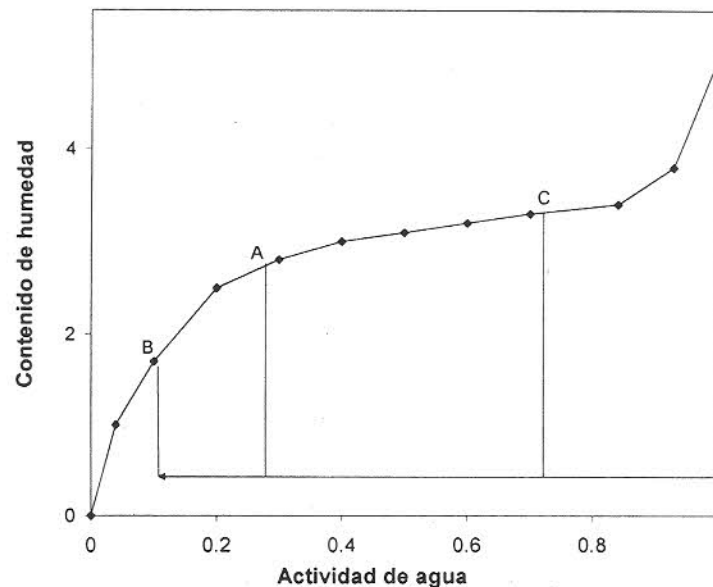


Fig.1.1 Isotherma de sorción

1.3 Justificación

El bagazo de caña, desecho de la industria azucarera en México, es utilizado como combustible en los quemadores de la misma industria para producir vapor. Estudios realizados por Atchicson (1971 y 1974) han demostrado la viabilidad de satisfacer la

demanda energética de los ingenios azucareros con prácticamente la mitad del bagazo del que se utiliza. Secando el bagazo, previo a la combustión, queda un sobrante factible de ser empleado en las más de cuarenta aplicaciones demostradas de las cuales las más relevantes son la producción de celulosa y papel, tableros, etanol, alimento animal y furfural. Otras ventajas del bagazo de caña presecado al utilizarla como combustible es la mejor combustión del mismo lo que reduce la contaminación del aire, se obtienen mayores temperaturas en el calentador y se reduce el volumen de gases de combustión (Arrascaeta y Friedman, 1984).

El disminuir un 8% el contenido de humedad en el bagazo de caña es suficiente para aumentar la eficiencia de un calentador en un 6%. El presecado de bagazo reduce el contenido de humedad a un 46-47 %, y si para esto se utiliza el calor de desecho de los calentadores de gas no solo se ahorrará en combustible sino también un exceso del 10-15 % de bagazo de la producción total, éste puede estar disponible para otros propósitos industriales (Chen y Chow, 1993).

1.4 Descripción del bagazo de caña

Considerando la estructura física del bagazo se tienen 2 principales componentes: médula y fibra derivados de las respectivas áreas de entrada y salida del tallo. La médula (cerca del 30% de peso seco de la caña) es la porción de celulosa parénquimosa no fibrosa de la entrada del tallo donde las células de pared de gada contienen el jugo. La médula está soportada por un haz de fibras dispersas contenidas en la caña en un 15% (b.s.).

La verdadera fibra es la de la corteza con celdas cilíndricas de pared dura en el tallo. Su composición en la caña es de alrededor del 50%. El resto (5% b.s.) ésta constituido de la epidermis, cera, etc.

La fibra por sí misma es insoluble en agua y está compuesta de celulosa, pentosa y lignina. Las partes que contienen más celulosa son las de médula, pero su composición química es similar a la de la fibra. La composición de ligninas y cenizas inorgánicas varían con el origen del bagazo.

Las fibras varían en longitud de 0.5 a 4 mm con un promedio de 1.5 mm de longitud y la relación longitud-ancho es aproximadamente 70. Las fibras pequeñas de bagazo (menos de 0.5 mm de longitud) son conocidas como bagacillo.

1.5 Hipótesis

El bagazo de caña integral se comporta como un sólido poroso. Una parte de ella, la médula, tiene propiedades de adsorción diferentes a la fibra.

El área de la médula es mayor que la de la fibra.

El secado de la fibra es más rápido que el de la médula.

1.6 Objetivo

- Conocer el comportamiento de secado de fibra y médula de bagazo de caña en un secador de charolas y el efecto de las variables que intervienen en el fenómeno.
- Conocer las interacciones en la adsorción de agua en fibra y médula.
- Obtener la información necesaria para el diseño de secadores y el modelamiento de secado de bagazo de caña para establecer las condiciones frontera en la interfase de los modelos de transferencia de masa y calor.

1.7 Metas

- Determinar las características físicas de fibra y médula de bagazo de caña.
- Determinar los coeficientes convectivos de masa y calor durante el secado.
- Calcular la difusividad efectiva en fibra y médula.
- Evaluar estadísticamente los efectos significativos del secado de fibra y médula de bagazo de caña.
- Determinar las isotermas de adsorción de fibra y médula de bagazo de caña.
- Seleccionar un modelo que describa la adsorción de agua del bagazo de caña y obtener los parámetros del modelo de adsorción que se ajusten a los datos experimentales obtenidos.
- Determinar las propiedades que describen la adsorción.

Capítulo 2

MARCO TEORICO

2.1 Secado

El término secado, discutido aquí, se refiere a la vaporización de agua de un sólido con una corriente de aire. En el diseño y operación de secadores se requiere conocer dos tipos de información: la física del movimiento de humedad en el sólido y la difusión del vapor de agua del sólido a la corriente de aire. Además para el diseño ingenieril del secador es necesario conocer los requerimientos de calor y flujo de aire (Comings, 1984), para ello se pueden utilizar curvas de secado o isotermas de sorción con diagramas de entalpía-concentración (Mujumdar, 1995).

2.2 Mecanismo de secado

Transferencia de calor por convección

El sólido húmedo se seca al pasar sobre él una corriente de gas caliente. El gas caliente sirve para transferir calor al sólido y para eliminar el vapor formado. Si el gas caliente es suministrado al sistema a temperatura y humedad constantes se observa que el proceso de secado ocurre en dos etapas diferentes. Inicialmente la velocidad de secado es constante y cuando alcanza un cierto grado de humedad la velocidad comienza a disminuir progresivamente hasta ser nula cuando el material está completamente seco.

El contenido de humedad a partir del cual la velocidad de secado comienza a disminuir se conoce como humedad crítica, pero generalmente el cambio tiende a ocurrir en forma gradual, dentro de un intervalo de humedad, como se indica en la figura 2.1.

En algunos casos, el contenido inicial de humedad puede estar por debajo del valor crítico y el secado transcurrirá completamente con velocidad decreciente, sin un periodo de velocidad constante. Las curvas de velocidad decreciente pueden ser cóncavas, convexas o aproximarse a una línea recta (Moss, 1983), pueden presentar un punto de inflexión cuando ocurre un cambio en la forma física del material, como contracción o rotura y cuando se forma una película en la superficie del material parcialmente seco.

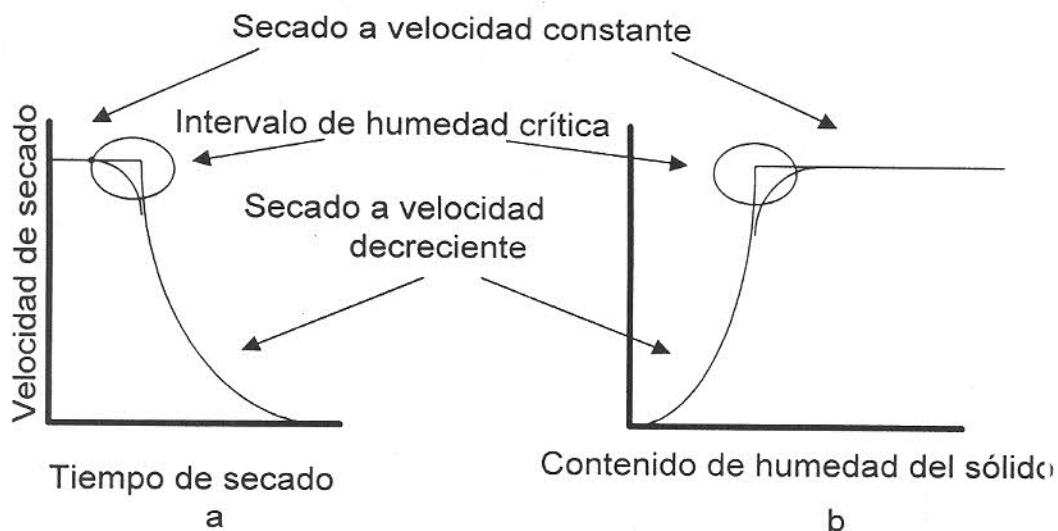


Fig. 2.1 Curvas de secado típicas. Secado convectivo, condiciones externas constantes

En el periodo de velocidad constante, el secado ocurre como si el agua pura estuviera siendo evaporada y en este caso la velocidad de secado está totalmente controlada por las condiciones de secado. El factor controlante es el coeficiente de transferencia para la difusión a través de la película de gas.

En el periodo de velocidad decreciente el movimiento de la humedad desde el interior del sólido a la superficie ha disminuido y las resistencias internas controlan la velocidad de secado. Ahora la superficie no está totalmente mojada, se presentan pequeños islotes de material seco, la velocidad de migración produce una disminución del efecto de las condiciones externas, y la velocidad de secado es solamente un reflejo de la falta de uniformidad en la velocidad de migración de líquido a la superficie.

En la figura 2.2a se muestra una gráfica de contenido de humedad como una función del tiempo. El segmento AB representa el estado inicial inestable o periodo de acondicionamiento y BC el periodo de velocidad constante. La figura 2.2b, muestra la velocidad de secado contra el contenido de humedad, los mismos puntos de la figura 2.2a son marcados, durante el periodo de velocidad constante la superficie está saturada de agua y el secado ocurre a la temperatura de bulbo húmedo del ambiente. El mecanismo del movimiento interno del líquido y la estructura del material determina la extensión del periodo de velocidad constante.

La humedad crítica, indicado por el punto C, se localiza al término del periodo de velocidad constante. En este punto, el contenido de humedad del material no es suficiente para saturar la superficie completa.

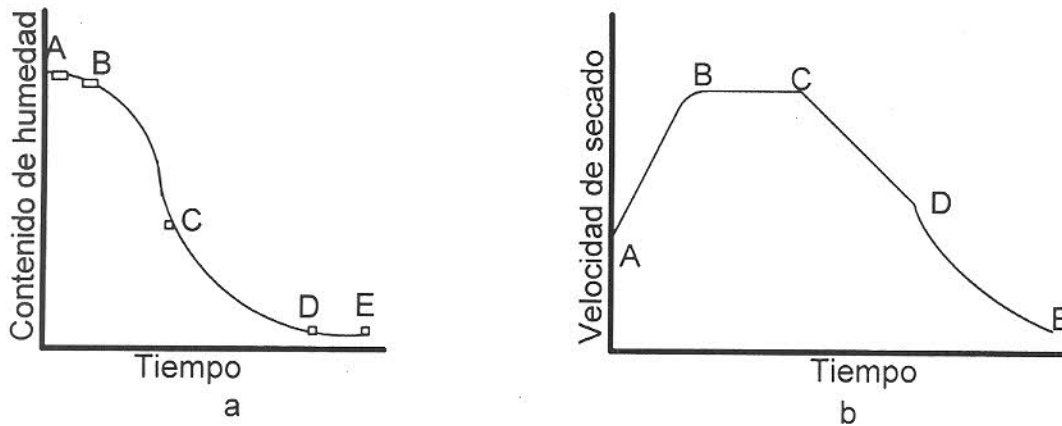


Fig. 2.2 Curvas de secado mostrando a) contenido de humedad en función del tiempo de secado y b) humedad removida en función del tiempo de secado.

En el primer periodo de velocidad decreciente representado por CD en las figuras 2.2a y 2.2.b, la velocidad del movimiento del líquido a la superficie es menor que la velocidad de evaporación de la superficie entonces la superficie comienza a presentar continuamente secciones secas. Partes de la superficie se secan por transferencia convectiva de calor del aire seco, la temperatura de la superficie comenzara a subir, el vapor dentro del material empezará a difundirse dentro de la corriente de gas hasta el punto D, donde toda la evaporación ocurrirá desde el interior del material.

El segundo periodo de velocidad decreciente empieza después del punto D, el camino para transportar masa y calor es más largo y tortuoso conforme el contenido de humedad disminuye. Finalmente, la presión de vapor del material se iguala a la presión parcial de vapor del aire seco, y el secado termina. El contenido de humedad límite en esta etapa, en el cual un material puede ser secado bajo ciertas condiciones de secado es llamado contenido de humedad en equilibrio (Rao y Rizvi, 1986).

Se han propuesto dos teorías para explicar la naturaleza física del desplazamiento de la humedad hacia la superficie de secado durante el periodo de velocidad decreciente, una es la teoría de la difusión y la otra la de capilaridad.

En la teoría de la difusión se supone que la velocidad de desplazamiento del agua hacia la interfase con el aire esta gobernada por ecuaciones de la velocidad similares a las que existen para la transferencia de calor, mientras que en la teoría de la capilaridad se supone que las fuerzas que controlan el movimiento del agua son del tipo capilar, originándose en los diminutos espacios existentes entre las partículas individuales.

2.3 Condiciones internas y externas de secado

La remoción de humedad por evaporación de la superficie del material hacia el aire es esencial en el proceso de secado, sin embargo la migración de la humedad dentro del material húmedo también debe ser considerado (Strumillo, 1987). Debido a esto, los factores que afectan la velocidad de secado dependen del material húmedo o del aire seco y su conexión con las condiciones de transferencia de masa debe ser distinguida.

Condiciones externas: La resistencia a la transferencia de masa de las capas de gas es mayor que la resistencia de migración interna de humedad, la intensidad del secado depende principalmente de las condiciones del gas y es casi independiente de las propiedades del material. El secado es controlado por balances de masa y calor en la superficie del sólido.

Condiciones internas: La resistencia a la transferencia de masa dentro del material es mayor que la resistencia a la difusión en el gas, las propiedades del material tienen fuerte influencia en la velocidad de secado.

El significado relativo del proceso de transferencia de masa y calor interna y externa puede ser expresado por el número adimensional de Biot de masa y calor:

Si $Bi < 0.2$ las condiciones externas controlan el proceso.

Si $Bi > 50$ condiciones internas controlan el proceso.

Si $0.2 < Bi < 50$ ambos son importantes.

Después de identificar la condición que predomina en el fenómeno, la determinación de las correlaciones de transferencia convectiva de masa y calor es fundamental si la resistencia externa es importante y si además la resistencia interna es importante, la difusividad efectiva debe ser calculada.

La identificación de la resistencia predominante es muy importante en el diseño y modelamiento del proceso ya que de ello depende la utilización de las correlaciones de

transferencia convectiva de masa y calor para el periodo de velocidad constante, o difusividad efectiva en el periodo de velocidad decreciente o ambas.

2.4 Correlaciones de transferencia convectiva de masa y calor

Se han obtenido muchos datos correspondientes a la transferencia de masa entre un fluido en movimiento y ciertas formas estándar. Las ecuaciones determinadas en base a resultados experimentales que correlacionan los datos en función de parámetros adimensionales y las analogías entre la transferencia de masa y calor se utilizarán para determinar el coeficiente convectivo de masa y calor teórico en el periodo de velocidad constante para un flujo paralelo y limitado con respecto a placas planas.

El coeficiente de transferencia de calor experimental (Vaccarezza y col., 1974) determinado mediante un balance de calor es:

$$h = \frac{R_c \cdot \Delta H_v}{T - T_s} \quad 2.1$$

El coeficiente de transferencia de calor teórico es determinado mediante la correlación (Geankoplis, 1993):

$$h_{\text{teórico}} = 0.0204 G^{0.8} \quad 2.2$$

Para valores de G de 2450 a 29300 $\text{kg/h} \cdot \text{m}^2$ y velocidades de aire de 0.61 a 7.6 m/s

El coeficiente de transferencia de masa para una placa plana y flujo laminar en la capa límite es:

$$k_c = \frac{Sh D_{AB} P}{R \cdot T_a \cdot L} \quad 2.3$$

donde:

$$Sh = 0.664(Re^{1/2} Sc^{1/3}) \text{ para } Re < 50000 \quad 2.4$$

El número de Reynolds es calculado mediante la ecuación:

$$Re = L \frac{G}{\mu} \quad 2.5$$

Las propiedades que intervienen en las ecuaciones anteriores se evalúan a la temperatura promedio:

$$T_p = \frac{T_{\text{flujoaire}} + T_{\text{placa}}}{2} \quad 2.6$$

2.5 Difusividad efectiva

Tres métodos experimentales se han aplicado para la determinación de la difusividad efectiva de materiales: análisis de datos de secado, cinéticas de sorción y mediciones de permeabilidad. Los dos primeros métodos pueden ser aplicados a varias formas de los materiales, mientras que el método de permeabilidad es limitado a películas.

La difusividad efectiva varía considerablemente con la humedad del material, debido a la compleja estructura de materiales como polímeros (almidón, celulosa o proteínas) y sus interacciones con el agua.

La estimación de la difusividad a partir de datos de secado de materiales puede hacerse por tres métodos: a) por las pendientes de las curvas de secado, b) por ajuste de datos mediante optimización por computadora y c) por la técnica de régimen regular.

Para el periodo de velocidad decreciente se utiliza el método de las pendientes (Karathanos y col., 1990), debido a que se cuenta con las curvas de secado. Este método está basado en la solución de ecuación de Fick para difusión en estado inestable:

$$\frac{dX}{dz} = \frac{d}{dz} \left(D \frac{dX}{dz} \right) \quad 2.7$$

Bajo las siguientes condiciones frontera e iniciales:

$$\begin{array}{lll} t=0 & 0 < z < z_0 & X=X_0 \\ t > 0 & z = 0 & \frac{\partial X}{\partial z} = 0 \\ t > 0 & z = z_0 & X=X_e \end{array}$$

La solución de esta ecuación para un bloque para una difusividad (D) constante, en términos de una serie infinita es:

$$W = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp \left[-\frac{(2n+1)^2 \pi^2 D t}{4z_0^2} \right] \quad 2.8$$

La ecuación anterior es evaluada numéricamente considerando seis términos de la serie determinando el número de Fourier por el método de Newton-Raphson. El número de Fourier para difusión es:

$$Fo = \frac{Dt}{z_0^2} \quad 2.9$$

La difusividad efectiva se estima de la siguiente ecuación,

$$D = \left[\frac{\left(\frac{dW}{dt} \right)_{\text{exp}}}{\left(\frac{dW}{dFo} \right)_{\text{teórica}}} \right] z_0^2 \quad 2.10$$

Con el método de las pendientes se calcula la difusividad efectiva para cada contenido de humedad calculando su correspondiente número de Fourier. El número de Fourier se utiliza en la derivada funcional dW/dFo (teórica) y la derivada experimental se divide con su correspondiente derivada teórica a cada contenido de humedad.

2.6 Isotermas de sorción

Cuando un sólido es expuesto a un gas húmedo a temperatura y humedad constante, este podrá ganar o perder humedad hasta alcanzar el equilibrio. El contenido de humedad en equilibrio del sólido X_e (base seca) es una función de la humedad relativa del gas, la temperatura del gas, la naturaleza del sólido y el líquido. La variación de X_e con la humedad relativa a temperatura constante es llamada una isoterma de sorción y frecuentemente exhiben histéresis dependiendo si el equilibrio ha sido enriquecido por aumento de peso (adsorción) o por secado (desorción).

La actividad de agua (a_w) es la relación de presión de vapor ejercida por el agua en una sustancia (presión parcial) a la presión de vapor de agua pura a temperatura constante.

$$a_w = \frac{p}{p^*} \quad 2.11$$

La relación entre el contenido de humedad total y la correspondiente actividad de agua a_w de un sólido en un rango de valores a temperatura constante produce una isoterma de sorción cuando es expresado en una gráfica.

La adsorción de vapor de agua en un sólido es un proceso espontáneo que decreta la energía libre del sistema, y permite medir el trabajo hecho por el sistema. Brunauer y col. (1938) clasificó las isotermas de sorción en cinco tipos (fig. 2.3):

El tipo I es Langmuir, el tipo II es la sigmoide o isoterma de adsorción de forma S.

Los otros tres tipos no tienen nombres especiales. El tipo II y III están muy cercanos a los tipos IV y V, excepto que la absorción máxima ocurre a una presión más baja que la presión de vapor del gas. Las isotermas de muchos alimentos y otros materiales son no lineales y generalmente de forma sigmoide y han sido clasificados como tipo II.

Otro comportamiento comúnmente observado es la diferencia de caminos que siguen durante los procesos de adsorción y desorción lo que da por resultado una histéresis.

La fuerza de los enlaces del agua a la superficie es indicada por la forma de la curva.

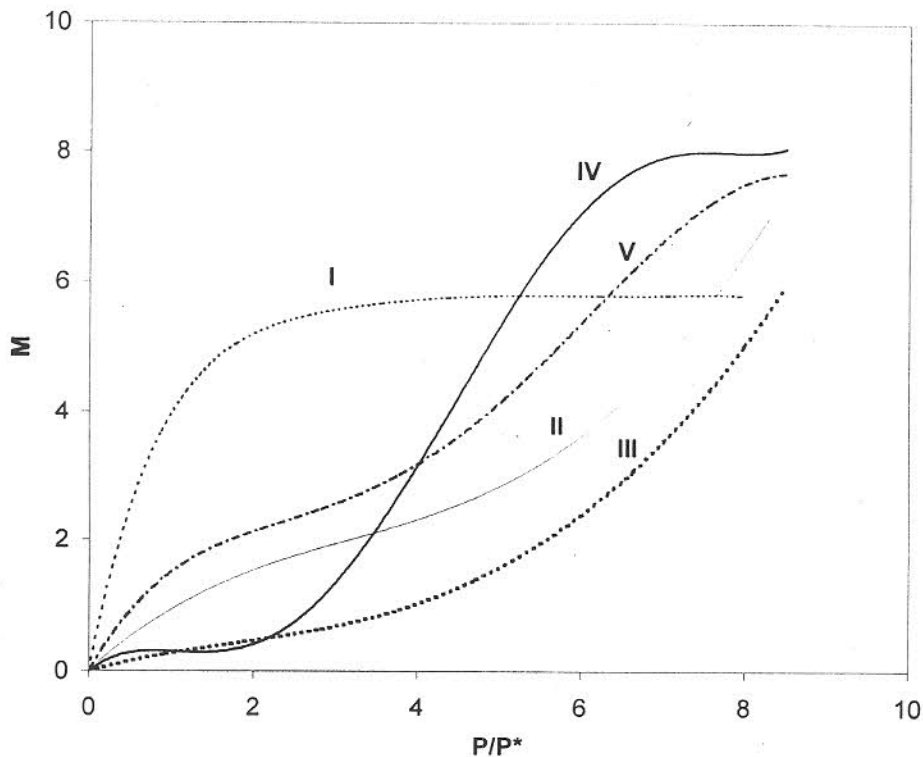


Fig.2.3 Los 5 tipos de isotermas de adsorción de Van der Waals

La forma típica sigmoidal de las isotermas de sorción tiene tres regiones, una región inicial convexa en la región de actividad de agua entre 0.1 y 0.2, una porción lineal con actividad de agua entre 0.2 a 0.5 aproximadamente y una región final cóncava para actividades de agua mayores a 0.5.

El agua en la región inicial "región de la monocapa" está adherida por fuertes cadenas hidrofílicas en los sitios polares de los sólidos. En la segunda región el agua es adherida por cadenas de hidrógeno dentro de los poros o estructura de la fibra. Esta región puede ser considerada de transición entre las regiones inicial y final de la isoterma y se denomina "región de la multicapa".

El agua menos firmemente enlazada se encuentra cuando la actividad de agua se eleva arriba de 0.5. En esta región el agua condensada es mecánicamente atrapada dentro de los espacios vacíos del sólido y tiene muchas de las características del agua líquida.

El agua adsorbida puede ser repartida en "monocapa", "multicapas" y "condensada". El área superficial del sólido y la energía requerida para el proceso de sorción puede ser calculada como se describe más adelante.

Para el mejor entendimiento del comportamiento del agua en las isotermas de sorción se han desarrollado diversos modelos matemáticos (Cadden, 1988). Muchos de ellos se elaboraron principalmente para alimentos, los cuales tienen ciertos comportamientos de acuerdo a los constituyentes que los forman por ejemplo azúcares, proteínas, almidones etc. y debido a lo cual las curvas obtenidas son de diferentes tipos.

Entre los modelos más utilizados se encuentran la ecuación BET (Brunauer y col. 1938), Halsey (1948), Henderson (1952), Iglesias y Chirife (1976) y la ecuación GAB (Guggenheim, 1966). Esta última ajusta datos experimentales de materiales semejantes al bagazo de caña tal como celulosa, además de tener numerosas ventajas sobre otras ecuaciones de ajuste.

2.7 La ecuación GAB

La ecuación GAB desarrollada independientemente por Guggenheim (1966), Anderson (1946) y De Boer (1953), contiene tres parámetros y es el modelo de sorción más versátil disponible en la literatura. Ha sido adoptado por los investigadores de alimentos de Europa (Van den Berg y Bruin, 1981; Bizot 1983). Fundamentalmente representa una refinada extensión de las teorías de Langmuir y BET, con tres

parámetros que tienen significado físico. La sorción de vapor de agua, matemáticamente es expresada como:

$$X = \frac{X_m C \cdot K \cdot a_w}{(1 - K \cdot a_w)(1 - K \cdot a_w + C \cdot K \cdot a_w)} \quad 2.12$$

Donde C y K están relacionadas a la energía de interacción entre las moléculas adsorbidas, primeras y distantes, a los sitios de sorción individuales. Teóricamente están relacionados a entalpías de sorción como sigue:

$$C = c \cdot \exp\left[\frac{H_1 - H_0}{RT}\right] \quad 2.13$$

$$K = k \cdot \exp\left[\frac{H_0 - H_n}{RT}\right] \quad 2.14$$

donde: H_1 es el calor total de sorción de la primera capa en sitios primarios; H_0 es el calor total de sorción de la multicapa (el cual difiere del calor de condensación del agua pura); k es el factor de corrección de propiedades de las moléculas en la multicapa con respecto al volumen del líquido. H_n es el calor de vaporización de vapor de agua pura.

El modelo GAB es básicamente similar a la ecuación BET en la suposición de absorciones físicas localizadas en multicapas sin interacciones laterales. La incorporación del parámetro k, supone que las moléculas en una multicapa tienen interacciones con el adsorbente cuyo intervalo de niveles de energía se encuentra entre las moléculas en la multicapa y el líquido.

Las mayores ventajas del modelo GAB son:

- ◆ Tiene bases teóricas.
- ◆ Describe el comportamiento de sorción de casi todos los alimentos desde una $a_w=0$ hasta 0.9.
- ◆ Tiene una forma matemática simple con solo tres parámetros, lo que facilita los cálculos de ingeniería.
- ◆ Los parámetros tienen un significado físico en términos del proceso de sorción
- ◆ Es capaz de describir algunos efectos de temperatura en isoterms por medio de ecuaciones tipo Arrhenius.

2.8 Efecto de la temperatura

El conocimiento de la dependencia de la temperatura en el fenómeno de sorción proporciona información importante acerca de los cambios relacionados a la energía del sistema.

La variación de la actividad de agua con la temperatura puede ser determinada mediante principios termodinámicos o incorporando términos dentro de las ecuaciones de sorción.

La constante en las ecuaciones de isotermas de sorción representa funciones de temperatura y es usada para calcular la dependencia de la temperatura de la actividad de agua. La ecuación Clausius-Clapeyron es frecuentemente usada para predecir a_w a cualquier temperatura si el calor isostérico y a_w son conocidos a una temperatura.

El calor isostérico de sorción es una propiedad termodinámica diferencial molar derivada de la dependencia de la isoterma de sorción con la temperatura y utilizado como indicador de la interacción energética entre el adsorbato y el adsorbente. Un calor isostérico mayor que el calor de vaporización indica la energía de unión de las moléculas de agua entre sí en estado líquido.

La ecuación para vapor de agua, en términos del calor isostérico (Q_{st}) es:

$$d(\ln P) = \left(\frac{-Q_{st}}{R} \right) \left(d \frac{1}{T} \right) \quad 2.15$$

Sustrayendo la correspondiente relación para vapor de agua en equilibrio con agua pura a la misma temperatura:

$$d(\ln P) - d(\ln p^*) = \left(\frac{Q_{st} - \Delta H_{vap}}{R} \right) d \left(\frac{1}{T} \right) \quad 2.16$$

En términos de actividad de agua, a_{w1} y a_{w2} a temperatura T_1 y T_2 las relaciones anteriores quedan:

$$\ln \left(\frac{a_{w2}}{a_{w1}} \right) = \left(\frac{Q_{st}}{R} \right) \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad 2.17$$

donde: q_{st} = al calor de sorción isostérico neto (también llamado calor de sorción en exceso). El calor de sorción (Q_{st}) es la cantidad de energía requerida para remover agua del substrato en exceso menos la cantidad de energía requerida para vaporización de agua normal.

$$q_{st} = Q_{st} - \Delta H_{vap} \quad 2.18$$

La precisión de las estimaciones de q_{st} requiere mediciones de actividad de agua a varias temperaturas en el intervalo de interés, aunque al menos dos temperaturas son necesarias.

El uso de la ecuación implica que, el contenido de humedad del sistema en estudio permanece constante, así como que la entalpía de vaporización del agua pura y el calor isostérico de sorción no cambien con la temperatura. La dependencia de la temperatura de la isoterma de sorción a altas temperaturas entre 40-60 °C ha sido evaluada en varios materiales utilizando la ecuación de Clausius-Clapeyron dando un buen ajuste con los datos experimentales.

El calor de sorción (q_{st}), es la cantidad de energía requerida para remover el agua en exceso en el absorbente y fue calculada mediante la ec. (2.18).

2.9 Area superficial.

El área superficial del sólido de la muestra se determina mediante la ecuación (Cadden, 1988):

$$A = X_m (1/M_{H_2O})(N)(A_{H_2O}) = (3.5 \times 10^6) X_m \quad (2.19)$$

donde: A es el área superficial del sólido (m^2/kg sólido)

X_m es el contenido de humedad en la monocapa (kg. agua/kg.sólido seco)

M_{H_2O} es el peso molecular del agua (18 kg/kmol)

A_{H_2O} es el área de una molécula de agua (10.6 Angstrom= $10.6 \times 10^{-20} m^2$)

N es el número de Avogadro (6×10^{26} moléculas/kmol)

2.10 Métodos para la determinación de isotermas de sorción

Las isotermas de sorción se pueden determinar por varios métodos dependiendo de los equipos que se tengan disponibles y del principio en que estos se basan. Rockland y Stewart (1981) propusieron la siguiente clasificación:

Métodos gravimétricos

- ◆ Métodos con registro continuo de cambio de peso
 - Sistema de vacío
 - Sistema dinámico
- ◆ Métodos con registro discontinuo de cambio de peso
 - Sistema estático
 - Sistema dinámico
 - Sistema de vacío
- ◆ Método manométrico e higrométrico
 - Métodos manométricos
 - Métodos higrométricos
- ◆ Métodos especiales

El método gravimétrico ha sido preferido para obtener isotermas de sorción completas. Sin considerar la construcción y modo de operación de los aparatos, este método involucra la ejecución de cinco funciones básicas:

- a) Mantener constante la temperatura durante todo el experimento y minimizar fluctuaciones de temperatura entre las muestras y sus alrededores.
- b) Determinar exactamente el peso seco de la muestra, ya que ésta es la referencia base de la isoterma. El contenido de humedad en equilibrio es preferentemente expresada como porcentaje en base libre de agua. El peso seco de la muestra deberá ser determinado, de ser posible, a la temperatura de la isoterma. El peso seco de la muestra puede ser determinado al inicio del experimento de sorción, o al final de éste.
- c) Mantener la presión predeterminada de vapor de agua relativa en el espacio alrededor de la muestra, para lo cual existen varios métodos: mezclar dos corrientes de aire, sistema de dos temperaturas, sistema de dos presiones y

soluciones acuosas. En esta última, soluciones de electrolitos y no electrolitos, saturados o insaturados, han sido usados para mantener constante la presión de vapor en mediciones de isotermas de sorción, las soluciones saturadas de sales tienen un promedio de desviación de ± 0.005 del valor esperado, y las soluciones insaturadas cambian su concentración cuando se usan por largo tiempo.

d) Conseguir equilibrio higroscópico y térmico entre las muestras y vapor de agua. Generalmente esto se considera como un proceso muy lento, pero se pueden tomar algunas de las siguientes medidas para acelerar el proceso:

1. Aplicar vacío al aparato donde se lleve a cabo el experimento.
2. Mantener una alta transferencia de calor y masa por la aplicación de principios dinámicos por ejemplo, circulación de aire a temperatura y humedad constantes.

Este método es usualmente combinado con mezclas de dos corrientes de aire pero también con soluciones de electrolitos.

e) Registrar los cambios de peso de la muestra en equilibrio con la respectiva presión de vapor de agua.

En referencia a los métodos continuos, el sistema de vacío ofrece alta precisión pero demanda una construcción e instrumentación más cara.

Uno de los más importantes aspectos de la medición de sorción es la definición y registro del estado de equilibrio entre muestra y vapor de agua. Teóricamente este estado solo puede alcanzarse después de un periodo de tiempo infinito. Prácticamente, el proceso de sorción deberá ser parado cuando la diferencia de peso al final del equilibrio es menor que la sensibilidad de la balanza usada. Alcanzar este equilibrio requiere de un tiempo imprácticamente largo. Por lo tanto un estado de equilibrio aparente es comúnmente definido en término de un cambio de peso máximo tolerable durante un arbitrario intervalo de tiempo.

Capítulo 3

METODOLOGIA

3.1 Equipo

3.1.1 Secador de charolas.

El aparato marca Armfield consta de un ducto de 1.30 m, en un extremo se encuentra instalado un ventilador. A 73 cm de la salida se encuentra una ventana de 32 x 23 cm donde se instala un soporte que cuelga, por medio de un gancho, de una balanza con capacidad para 3 kg. y con una resolución de 10 g. La ventana se cierra por medio de una puerta con cristal. El ventilador es controlado por medio de un regulador que permite una velocidad de aire de hasta 2 m/s.

El flujo de aire pasa a través de una resistencia eléctrica que puede incrementar la temperatura hasta 80 °C a bajas velocidades de aire. Después de la sección de calentamiento sigue la sección de estabilización del flujo y luego la de charolas portamuestra.

Después de pasar sobre los platos de secado, el aire es descargado a la atmósfera a través de la sección de salida a 73 cm de la zona de secado. La velocidad de aire es medido con un anemómetro (marca Airflow Instrumentation modelo LCA 6000), con una resolución de 0.01 m/s y una precisión de $\pm 3\%$.

Adaptaciones al secador

Con el propósito de aumentar la temperatura hasta 90 °C a una velocidad de aire de 2 m/s se hicieron las adaptaciones al secador de charolas que se describen en el anexo.

3.1.2 Sistema de medición

La balanza fue substituida por una celda de carga, marca Interface modelo SM-1C con capacidad de 5 kg (10 lb), conectada a un equipo de adquisición de datos.

La temperatura se mide utilizando termopares tipo K con aislamiento de teflón PTFE, calibre 24, con una resistencia límite de temperatura de hasta 200 °C y una precisión de $\pm 0.05\%$.

3.1.3 Adquisición y manejo de datos:

Para recibir las señales de minivoltaje de los termopares y celda de carga en tiempo real, acondicionarla y transmitirla en forma digital a una PC se utiliza un Equipo de Adquisición de Datos (Cole-Parmer) con 48 canales, resolución de 16 bits / una precisión de ± 0.02 % del intervalo. El voltaje de entrada puede variar de $0.3 \mu\text{V}$ a 10 V dependiendo del tipo de termocoples utilizado. El equipo de adquisición está conectado a la computadora mediante un cable paralelo. Para almacenar y manejar los datos se utiliza el software Mac-14 que se describe en el anexo.

3.1.4 Balanza

Para la determinación de humedad inicial y final de las muestras, se utilizó una balanza (Sartorius) semi-micro modelo BP210D con una capacidad de hasta 210 g con una resolución de 0.01 mg.

3.1.5 Estufa de vacío

Para la determinación de peso seco de las muestras se utilizó una estufa de vacío marca Shel Lab modelo 1410 D con un intervalo de temperatura de trabajo de 35-325 °C con una precisión de ± 0.2 °C y con un vacío de 0 a 30 pulgadas.

3.1.6 Celdas de equilibrio

Como celdas de equilibrio se usaron desecadores de vidrio de 14 cm de diámetro por 20 cm de altura con soporte de porcelana.

3.2 Procedimiento

3.2.1 Determinación de humedad

Se utilizó el método oficial de análisis de la Organización Americana de Químicos Analistas, AOAC 7.003 que consiste en pesar más de 2 g de material y colocarlo sobre soporte de aluminio previamente secado y pesado, el soporte con la muestra húmeda se coloca en la estufa de vacío y se seca a una temperatura entre 95-100 °C y una presión de vacío menor de 100 mm Hg por más de 5 h. Se determina la humedad por diferencia de peso.

3.2.2 Preparación de materiales

La muestra, inicialmente presentada en bolsa de 30 kg aproximadamente y que está formada por bagazo integral obtenido de caña de azúcar molida, se muestrea rápidamente para la determinación de contenido de humedad.

El siguiente procedimiento se utilizó para muestrear:

- Mezclar, manualmente la muestra por 5 veces, en una área limpia y plana.
- Utilizando la técnica de cuarteo, submuestrear obteniendo muestras de 300 a 500 gr.
- Guardar las submuestras en bolsas de plástico, sellar y congelar a -17°C , colocando en hielera o caja apropiada y guardar en refrigeración.

Después de determinar la humedad de las submuestras, y como preparación a la experimentación, se procede al desmedulado húmedo, utilizando el equipo diseñado que se describe en el anexo.

La operación del desmedulador se llevó a cabo como sigue:

1. Colocar el cilindro perforado dentro del tanque de agitación.
2. Colocar dentro del cilindro perforado aproximadamente 1.5 a 2 kg de bagazo de caña integral.
3. Llenar con agua hasta un 80 % de la altura del cilindro perforado.
4. Colocar el agitador, la tapa y finalmente ajustar la banda del motor.
5. Agitar a una velocidad de 60 rpm durante 15 minutos, dejar reposar 15 minutos y volver agitar otras dos veces, dejando reposar entre agitaciones.
6. Eliminar poco a poco el agua por la parte inferior filtrándola en una malla fina o una franela, hasta la eliminación total de líquido.
7. Retirar la tapa y el agitador y sacar hasta la mitad el cilindro perforado. Rociar agua alrededor del cilindro por la parte externa para que toda la médula caiga al fondo del tanque. Retirar por completo el cilindro perforado que contiene la fibra.
8. Extraer la médula del tanque a mano o bien a través del dren del tanque utilizando agua. Todo lo que se extrae se pasa a través de la malla o franela para escurrir.

3.2.3 Separación por tamaños

Las fracciones obtenidas de fibra y médula se secan al ambiente o bien en estufa a 70°C . Una vez secado cada fracción se separa por tamaños utilizando un juego de tamices de acero inoxidable. Las fracciones se pueden almacenar indefinidamente hasta su utilización.

3.2.4 Humidificación

Las muestras son humedecidas sumergiéndolas en agua hasta que se saturan (aproximadamente 3 días).

3.2.5 Determinación del contenido de azúcares en bagazo integral

El equipo utilizado es un analizador de azúcares con membranas enzimáticas para azúcares (YSI-2700). El procedimiento seguido fue el siguiente:

Se calibra el equipo utilizando un estándar de dextrosa de 5 g/l, se pesan 60 g de bagazo de caña agregando 800 ml de agua destilada, se deja hervir por 10 min. Se añaden 400 ml. de agua destilada comprimiendo el bagazo para extraer al máximo el azúcar, se deja en ebullición otros 10 min. Esta solución se filtra y se deja en ebullición para concentrar la solución hasta obtener 125 ml. de concentrado.

De este concentrado se toman 25 μ l que se colocan en el equipo. La lectura se lleva a cabo a 22.66 °C y el tiempo de exposición a la membrana es de 30 seg. La prueba se realiza por triplicado.

3.2.6 Método estándar para la determinación de área superficial y volumen de poro por adsorción de nitrógeno

El método ASTM D 3663-92 con un equipo Analizador de Area Superficial Acelerado (Mca. Micromeritics, modelo ASAP-2000) es el utilizado para la determinación del área superficial. Para el tamaño de poro y determinación de la isoterma de adsorción y desorción de nitrógeno se utilizó el método ASTM-D-4222.

3.2.7 Fotografía electrónica y estereoscópica

El principio en que se basa el método es la aplicación de una capa conductora sobre la muestra y la medición de electrones emitidos con lo que se forma una imagen. El equipo utilizado fue un Microscopio Electrónico de Barrido (Joel 35 CF) y para aplicar el recubrimiento se utilizó una evaporadora (Joel JEE-4X). Las condiciones de operación utilizadas fueron:

Observación tipo convencional.

Recubrimiento de oro.

15 KV, ampliaciones 100.

Escala 100 micros.

Por medio de un estereomicroscopio (Zeiss) se analizaron exteriormente muestras de fibra y médula seca sin ningún tratamiento.

3.2.8 Secado en secador de charolas

El material seleccionado para esta prueba fue fibra con tamaños de entre los tamices 8-12 y 12-14 y médula con tamaños entre tamices de 20-24 y 40-60 que son los tamaños presentes en mayor cantidad en los lotes de material.

El procedimiento de manejo del material fue el siguiente:

- 1.-El material humedecido es escurrido y colocado en las charolas portamuestras del secador de manera tal que se distribuyan sin dejar huecos y al mismo tiempo sin apretar la muestra.
- 2.-Con una tapa de vidrio, que no sobrepasa al borde de la charola portamuestra, se escurre el material hasta que no sale agua de la muestra.
- 3.-Para medir el volumen de huecos, agregar un volumen conocido de agua a la charola portamuestras hasta el borde, eliminarla de la misma manera que se menciona en el punto 2 y medir el volumen de agua escurrida.
- 4.-Colocar las charolas en el soporte del secador que ya estará en equilibrio a las condiciones de operación e iniciar la corrida inmediatamente.

El procedimiento de manejo del secador se describe en el anexo.

Análisis de resultados

Para determinar la pérdida de humedad a lo largo del experimento se utilizan los cambios de peso a lo largo de la corrida y la humedad final de la muestra. La humedad obtenida se promedió cada dos lecturas para atenuar el "ruido". Se derivó en forma consecutiva tomando 5 puntos antes y después y posteriormente la derivada así obtenida se promedió.

El primer momento se determinó por medio de una integración ponderada con el tiempo. La fracción de huecos se determina con la ecuación:

$$\text{fracción de huecos} = \frac{\text{Vol. escurrido}}{\text{Vol. charola}}$$

El volumen escurrido se ha promediado de los valores obtenidos en las corridas experimentales separadamente de acuerdo al material y tamaño.

3.2.9 Selección del método, procedimiento y calibración para la determinación de isotermas de sorción

Se probaron los métodos gravimétrico de registro discontinuo de pérdida de peso utilizando:

- 1.-La celda de equilibrio propuesto por Kanade y Pai (1988) modificado, usando sales saturadas de actividad de agua conocidas.
- 2.-Sales saturadas y ácido sulfúrico de diferentes concentraciones con actividad de agua conocidos y desecadores de 15 cm de diámetro como celdas.

Se analizaron las ventajas y desventajas de cada método probado, y se utilizaron desecadores como celdas, con sales saturadas y soluciones de ácido sulfúrico de actividad de agua conocidas.

El procedimiento seguido fue:

El bagazo utilizado, proporcionado por el ingenio El Potrero, Veracruz México) fué separado en médula y fibra por vía húmeda, posteriormente fué secado y tamizado. Para la experimentación se seleccionaron los tamaños de tamiza 24-40 para médula y 14-16 para fibra. Las muestras se secaron durante 48 h en estufa de vacío a 90 °C y 10 mm de Hg de presión de vacío. Posteriormente se pesaron muestras de fibra de aproximadamente 2.6 gr., y de médula de aproximadamente 0.8 gr.

Preparación de las soluciones de actividad de agua conocida:

Para la determinación de las isotermas de sorción a 25°C se prepararon soluciones de ácido sulfúrico con contenidos de humedad de 25, 40, 50, 60, 70 y 80 % de acuerdo a la tabla de Concentración de Soluciones de H₂SO₄ (Dean, 1992) y se colocó un volumen de 100 ml en desecadores de 15 cm de diámetro.

La muestra fue colocada en soportes de aluminio e introducidas en los desecadores. Se tomaron lecturas de cambio de peso hasta que la diferencia entre dos pesos fue menor a 0.002 gr. Al término del experimento se utilizó la tabla de relaciones densidad/porcentaje en peso para H₂SO₄ (Luna, 1991) y la densidad de las soluciones obtenida por medio del picnómetro para determinar la concentración final de las soluciones de actividad de agua conocidas, corrigiéndose los puntos iniciales.

Para las isotermas a 70 °C se prepararon soluciones saturadas de sales (tabla 3.1)

Tabla 3.1. Humedad relativa de soluciones de sales saturadas

Sal		Humedad relativa
Hidróxido de potasio ^a	KOH	4
Cloruro de litio ^a	LiCl·H ₂ O	11
Ioduro de sodio ^a	NaI	22.6
Bromuro de sodio ^a	NaBr	50.7
Nitrito de sodio ^a	NaNO ₂	58.9
Nitrato de sodio ^a	NaNO ₃	65.7
Cloruro de sodio ^b	NaCl	75.1
Cloruro de potasio ^b	KCl	80

a) Carr D.S y Harris B.L. (1949)

b) Dean J.A. (1992)

3.2.10 Evaluación previa de equipo y procedimientos

- La evaluación de la posición de las charolas en el secador tuvo el propósito de determinar si el secado se lleva a cabo de manera uniforme e igual entre los 4 niveles de la plataforma portamuestras (fig. 3.1)

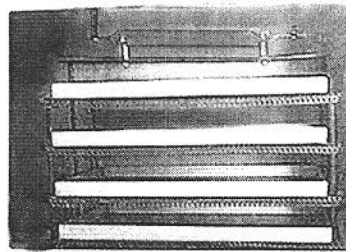


Fig. 3.1 Charolas ubicadas en los 4 niveles del soporte portamuestra

- La evaluación del método seleccionado para obtener las isotermas de adsorción permitió comprobar la precisión del procedimiento utilizado, se llevó a cabo el método desarrollado por Mc Cune y col. (1981) utilizando papel filtro para obtener la isoterma de sorción a 28 °C, en este material.

3.3 Diseño de experimentos

Se siguieron los pasos propuestos por Montgomery (1991) para el diseño de experimentos así como los siguientes principios en que se basa el diseño de experimentos:

- Obtención de réplicas con el propósito de estimar estadísticamente el error experimental.

- Aleatorización, a fin de validar la prueba y evitar errores asociados con las unidades experimentales, los cuales en caso de que sean adyacentes en espacio y tiempo, tiendan a correlacionarse.
- Análisis por bloques. Para incrementar la precisión del experimento ya que gran parte de la desviación prevista no forma parte del error experimental haciendo el diseño más eficiente.

3.3.1 Posición de las charolas

La evaluación de la posición de las charolas se hace aplicando el modelo de efectos fijos estableciéndose la siguiente hipótesis estadística:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \mu_4 \quad (\text{todas las medias son iguales})$$

$$H_1: \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3 \neq \mu_4 \quad (\text{todas las medias son diferentes})$$

El diseño es con un solo factor y las condiciones son constantes a 60°C y flujo de aire a 1.5 m/s, utilizando un mismo lote sin tamizar. La prueba es completamente aleatoria y se llevaron a cabo 2 réplicas. La variable dependiente es el primer momento, el factor a evaluar es la ubicación y los niveles son la posición A,B,C,D, considerando la posición A como la superior y en orden sucesivo B, C y D la cual sería la última charola. El análisis de varianza se aplica para la evaluación de los efectos.

La prueba formal de hipótesis de igualdad de medias de tratamientos:

$$H_0: \mu_1 = \mu_2 = \dots = \mu_a \quad (3.1)$$

O equivalentemente

$$H_0: \tau_1 = \tau_2 = \dots = \tau_a = 0 \quad (3.2)$$

Al suponer que los errores ε_{ij} son independientes y están normalmente distribuidos con media igual a 1 y varianza σ^2 , el estadístico para probar la hipótesis de igualdad de medias de tratamientos es:

$$F_0 = \frac{\frac{SS_{\text{tratamiento}}}{a-1}}{\frac{SS_E}{(N-a)}} = \frac{MS_{\text{tratamiento}}}{MS_E} \quad (3.3)$$

y el criterio para rechazar H_0 es:

$$F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a}$$

Donde: α es el nivel de significación, a es el número de repeticiones y N el número total de observaciones. El poder o potencia de la prueba es la probabilidad de rechazar H_0 si esta es falsa.

3.3.2 Diseño anidado

El diseño experimental seleccionado fue un modelo anidado balanceado, esto debido a que los tamaños de fibra difieren de los tamaños de médula.

El diseño anidado permite que el factor tamaño se encuentre anidado en el factor material y de esta manera se mantienen presentes los 2 factores sin que se “cruzen” sino que se mantienen “anidados”. Un factor anidado es un tipo especial de factor aleatorizado cuyos niveles no son repetidos para todas las combinaciones de los factores. Un diseño anidado balanceado es el que tiene el mismo número de niveles de B dentro de cada nivel de A e igual número de réplicas. El diseño, con 16 corridas, se describe detalladamente en la tabla 3.2.

Los factores que se supone interviene en el fenómeno de secado son:

Factores controlables: Temperatura, flujo de aire, tamaño de partícula, tipo de material.

Factores no controlables pero medibles.- Humedad del aire, temperatura ambiente, humedad inicial del material.

Los niveles se seleccionaron de acuerdo a los límites permitidos por el equipo.

Dos variables de respuesta fueron analizadas, la primera, el tiempo de secado, determinado cuando la curva de secado llega a cero y la segunda variable de respuesta, el área bajo la curva de velocidad de secado ponderada con el tiempo (primer momento). Rodríguez (1998) demostró que es adecuado utilizar el primer momento como variable respuesta para el análisis estadístico.

El modelo lineal estadístico para el diseño anidado es:

$$y_{i,k} = \mu + \tau_i + \beta_{j(i)} + \varepsilon_{(ij)k} \quad \begin{cases} i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \\ k = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (3.4)$$

donde : a son niveles del factor A, b son niveles del factor B anidados bajo el cual cada nivel de A y n réplicas. El subíndice $j(i)$ indica que el nivel j ésimo del factor B es anidado bajo el i ésimo nivel del factor A.

Como los factores A y B son fijos se supone que el efecto de A tratamientos suman cero y que el efecto de B tratamientos suman cero dentro de cada nivel de A.

Tabla 3.2 Diseño experimental anidado

FACTORES	MEDULA								FIBRA							
Tamaño (mallas)	20-24				40-60				8-12				12-14			
Temperatura (°C)	90	60	90	60	90	60	90	60	90	60	90	60	90	60	90	60
Flujo (m/s)	1.3	2	1.3	2	1.3	2	1.3	2	1.3	2	1.3	2	1.3	2	1.3	2

El análisis de resultados inicia con confirmar que las suposiciones que soportan el modelo se cumplen, para ello se revisa si la muestra fue aleatorizada, si existe independencia de las muestras, si los datos son normales y confirmar la ausencia de datos inusitados. La normalidad se evalúa con una gráfica de caja, de probabilidad e histograma. Para evaluar numéricamente la normalidad, curtosis y sesgo se utiliza la prueba omnibus.

Se deben examinar las gráficas de residuales de los datos contra los datos predichos y la de residuales contra cada variable independiente. El mejor patrón a obtener es una nube de puntos, si se obtienen patrones de cuña o moño es una indicación de varianza no constante o una violación de suposiciones. Una pendiente o banda curva significa una inadecuada especificación del modelo. Una banda pendiente con incremento o decremento de variabilidad sugiere una varianza no constante e inadecuada especificación del modelo.

Capítulo 4

RESULTADOS

4.1 Morfología del material

Utilizando un estereomicroscopio se analizaron muestras de médula presentando una estructura esponjosa formada por celdas huecas, semitransparentes, con múltiples

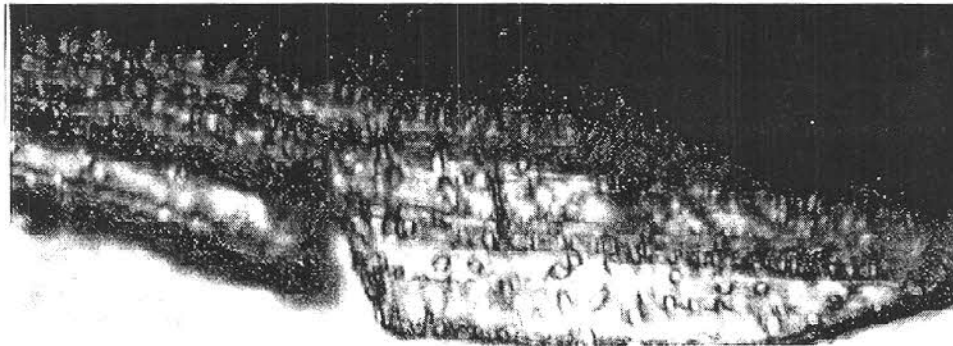


Fig.4.1 Partículas de médula adherida a una fibra.

conductos y poros apreciablemente grandes. Las fibras, de color oscuro en la foto, generalmente tienen adheridas partículas de médula en el exterior, éstas de color claro en la foto (fig. 4.1).



Fig. 4.2. Fotografía de fibra

Las fibrillas se encuentran unidas por médula que le dan el soporte necesario para conformar estructuras más grandes. Por esta razón se encuentran partículas de fibra

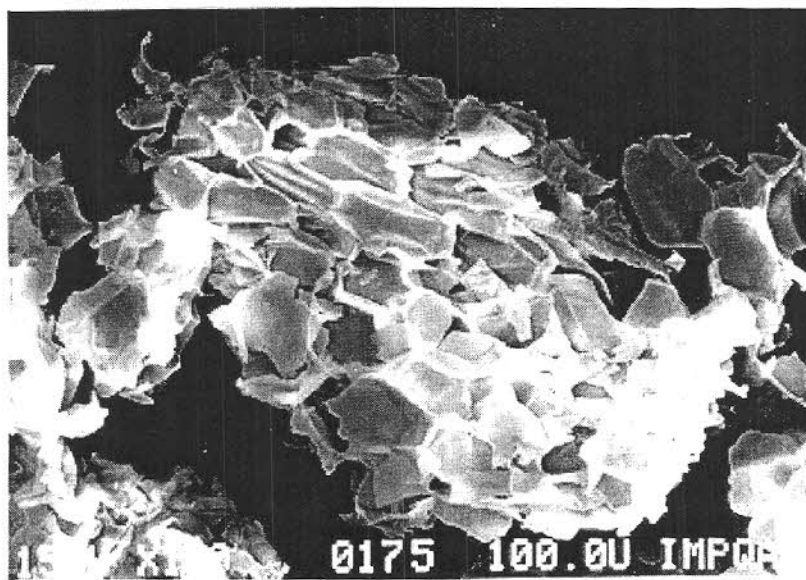


Fig. 4. 3 Fotografía electrónica de médula, ampliación 100 X

de diversos tamaños. Las fibras (fig. 4.2) están conformadas por microfibrillas en forma de cilindros huecos, largos y rígidos.

Las muestras de médula analizadas a través de un microscopio electrónico de barrido (García-Figueroa y Flores, 1997), con ampliaciones de 100X, 200X y 1000X, presentan el aspecto de un material esponjoso (fig. 4.3) conformado por celdas de pared delgada con una gran superficie de contacto (fig. 4.4) y conductos interconectados (fig. 4.5). El tamaño de las celdas varían entre 50 μm y 150 μm . Los huecos intraceldas tiene un tamaño de 7 μm a 30 μm .

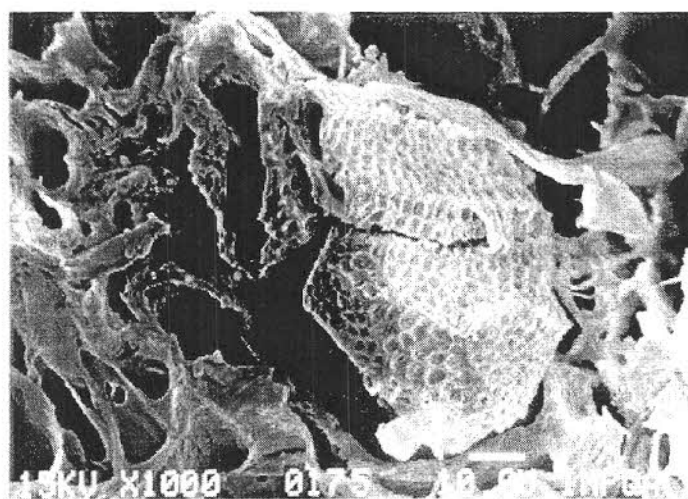


Fig. 4.4. Fotografía electrónica de médula, ampliación 1000X

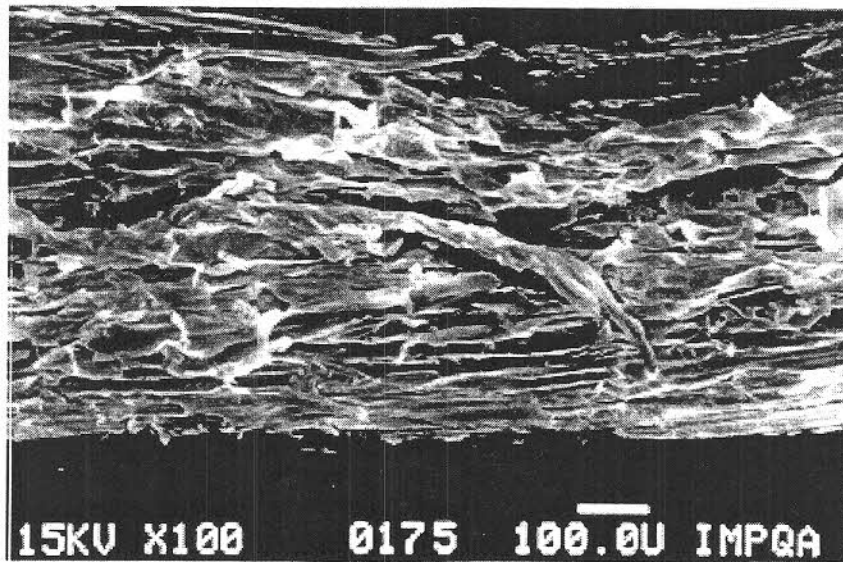


Fig. 4.5 Fotografía electrónica de médula, ampliación 100 X

Se aprecian poros sobre las paredes de las celdas con un tamaño de $0.5 \mu\text{m}$ a $3 \mu\text{m}$ (fig. 4.6).

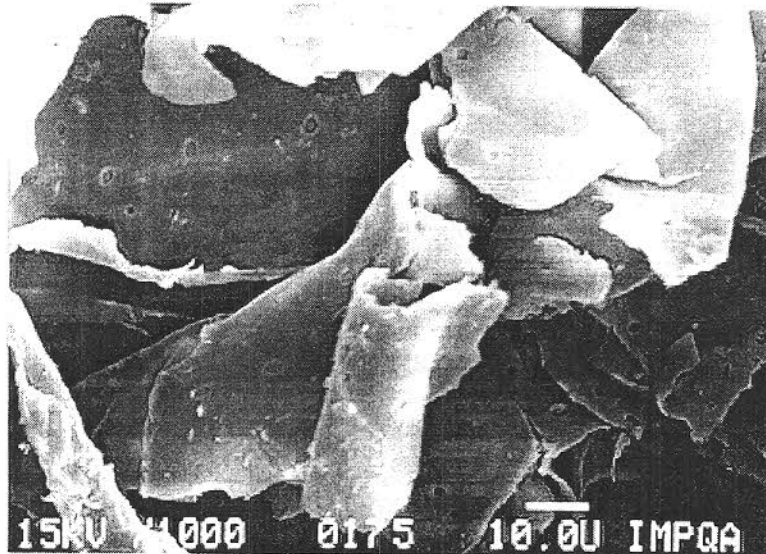


Fig. 4.6. Fotografía electrónica de médula ampliación 1000X

Las fibras unidas en forma de haz (fig. 4.7), de paredes delgadas, alargadas y rígidas, tienen adheridas médulas en el exterior. También se aprecian secciones de médula entre las fibras que mantienen unidas porciones más grandes de fibras.

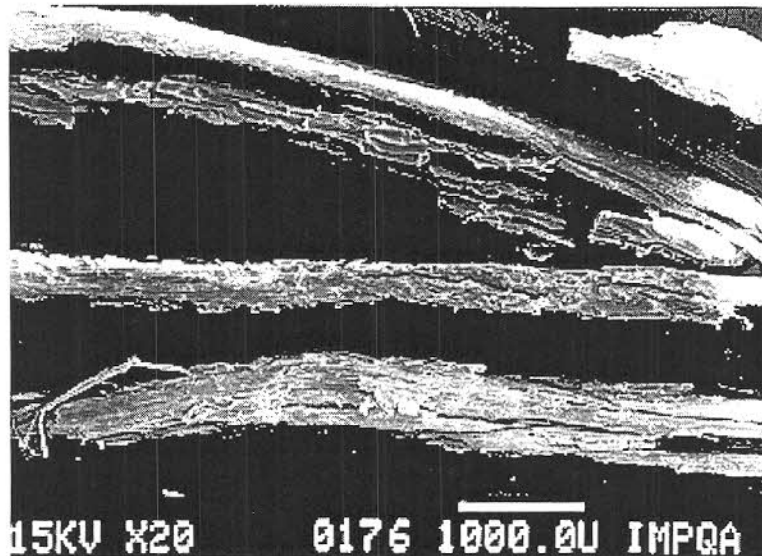


Fig.4.7 Fotografía electrónica de fibras, ampliación 20 X

Las fibras vistas más a detalle revelan una forma cilíndrica y hueca (fig. 4.8).



Fig. 4.8 Fotografía electrónica de fibra, ampliación 200 X

Algunas partes de las fibras tienen estructuras huecas cavernosas con infinidad de poros conformando una red con grandes espacios entre ellas. El tamaño de los poros en estas estructuras es entre 2 y 10 μm , mientras que entre las mallas los huecos son de aproximadamente 4 μm por 10 μm entre hilos (fig. 4.9).

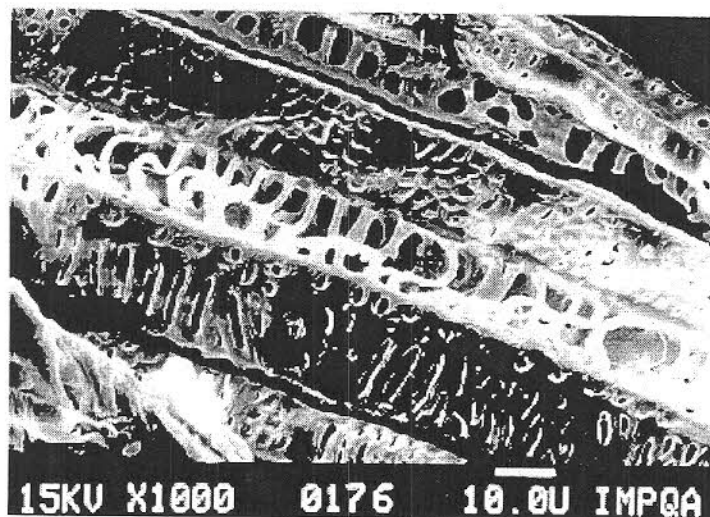


Fig. 4.9 Fotografía electrónica de fibra, ampliación 1000 X

4.2 Separación por tamaños

La separación por tamaños se describe en la tabla 4.1. La obtenida de un lote de 537 g integral, se separa sin desmedular y un lote de 465 g se separa después de un desmedulado húmedo, y separado en sus fracciones médula y fibra. Los porcentajes se determinan para identificar las fracciones más representativas de la muestra y se calculó considerando que el total de médula o fibra separada representan el 100 %.

Tabla 4.1 Separación por tamaños.

MALLA	SIN DESMEDULAR (g)	DESMEDULADA			
		MEDULA(g)	%	FIBRA (g)	%
8	137	0	0	82	34.3
8-12	50	4	1.76	36	15.06
12-14	29	3	1.32	23	9.62
14-16	25	11	4.86	17	7.11
16-18	45	27	11.94	23	9.62
18-20	15	4	1.76	7	2.92
20-24	63	40	17.69	18	7.53
24-30	43	31	13.71	12	5.02
30-35	16	14	6.19	6	2.51
35-40	30	19	8.40	7	2.92
40-60	46	43	19.02	6	2.51
60-100	24	22	9.73	2	0.83
100-120	6	5	2.21	0	0
120	8	3	1.32	0	0
TOTAL	537	226	100	239	100

4.3 Determinación del contenido de azúcares

Los tres resultados obtenidos en la determinación de azúcares fueron promediado dando los siguientes resultados:

Contenido de sacarosa 520 ± 0.02018 mg/kg bagazo.

Contenido de dextrosa 2220.8 ± 0.011547 mg/kg bagazo.

4.4 Evaluación de la posición de las charolas

La tabla 4.2 muestra los valores calculados para el primer momento en base a los resultados experimentales mostrados en la figura 4.10. La tabla 4.3 incluye los resultados del análisis estadístico empleando el paquete NCSS.

Tabla 4.2 Primer momento utilizado en la evaluación de la posición de las charolas y sus réplicas

POSICION							
1		2		3		4	
104.0	113.85	126.30	115.22	104.72	123.31	134.04	101.15

El análisis de varianza muestra la media de cuadrados, el valor del estadístico de Fisher (F_0) y el poder o potencia de la prueba. Hay que hacer notar que la media de cuadrados de tratamientos es menor que la media de cuadrados dentro de los tratamientos. Esto indica que es muy probable que la media de tratamientos sean iguales.

Más formalmente al comparar F_0 con $F_{\alpha, a-1, N-a}$ donde α es 0.01, se concluye que las medias de los tratamientos son iguales, es decir que la posición de las charolas no afectan la variable respuesta. En base a esto se descarta la necesidad de introducir un bloque al experimento por efecto de la posición de las charolas.

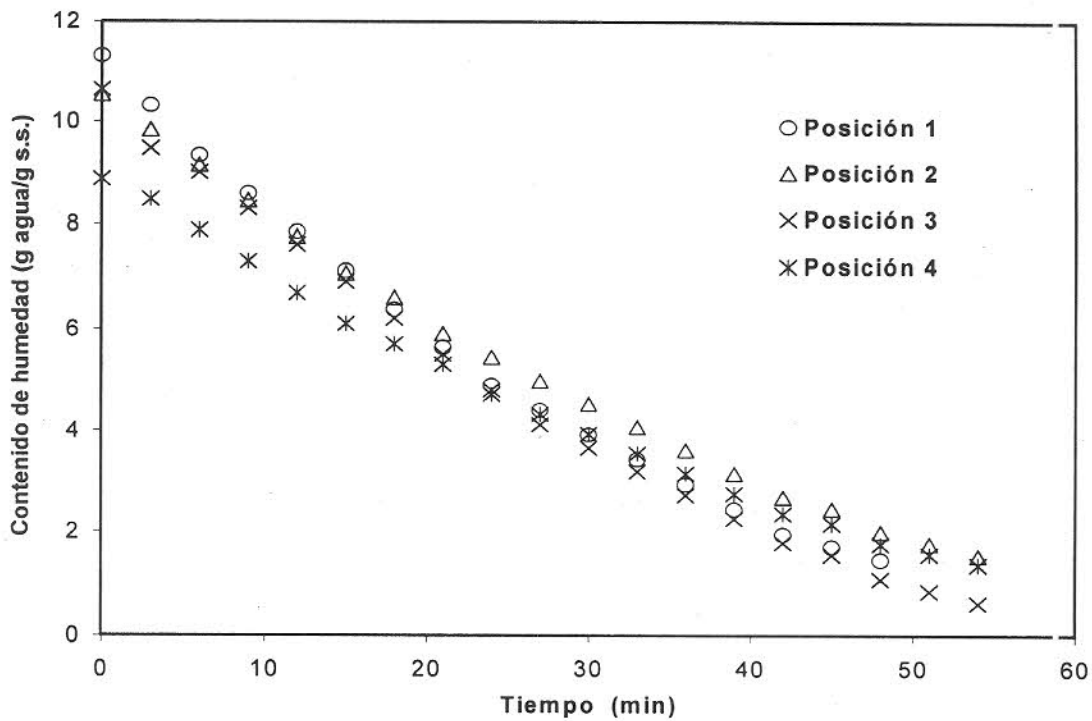


Fig.4.10 Evaluación de la posición de las charolas

Tabla 4.3 Reporte del análisis estadístico de varianza en la evaluación de la posición de las charolas

Respuesta	1° momento					
Tabla de análisis de varianza						
Origen	G.L.	Suma de Cuadrados	Media de Cuadrados	F	Nivel de Probabilidad	Poder (Alfa=0.01)
Entre tratamientos	3	155.0965	51.69884	0.25	0.857375	0.014338
Error	4	824.061	206.0152			
Total (Ajustado)	7	979.1575				
Total	8					

* Términos significativos con una alfa = 0.01

4.5 Secado de fibra y médula de bagazo de caña

4.5.1 Fracción de huecos

Se determina en cada uno de los experimentos y mediante un análisis estadístico de estos datos se obtiene la fracción de huecos como se muestra en la tabla 4.4.

Tabla 4.4 Fracción de huecos y su desviación estándar

FIBRA		MEDULA	
8-12	12-14	20-24	40-60
0.6825 ±0.03	0.6586 ±0.027	0.3262±0.084	0.151±0.014

4.5.2 Curvas de secado

Se obtuvieron las curvas de secado de fibra y médula de bagazo de caña (fig. 4.11 y fig. 4.12) de las corridas experimentales que se llevaron a cabo de acuerdo al diseño de experimentos anidado. Con el propósito de evitar el "ruido" debido principalmente a las condiciones ambientales se promedió la señal de salida tomando en consideración lecturas anteriores y posteriores.

De acuerdo a estos gráficos, al parecer el tamaño de partícula tiene un efecto importante, ya que a mayor tamaño de partícula el secado es más rápido, así mismo condiciones más altas de temperatura y velocidad de aire disminuye el tiempo de secado.

El efecto del tamaño de partícula en el secado de fibra, se debe principalmente a que existen más espacios huecos en la cama de fibras a secar (tabla 4.4), favoreciendo una transferencia de masa por evaporación.

En el caso de la médula las curvas de secado tienen el mismo comportamiento que para la fibra, en este caso la fracción de huecos es muy diferente entre tamaños de partícula por lo que se puede suponer un mayor efecto debido al tamaño de partícula para el secado de médula.

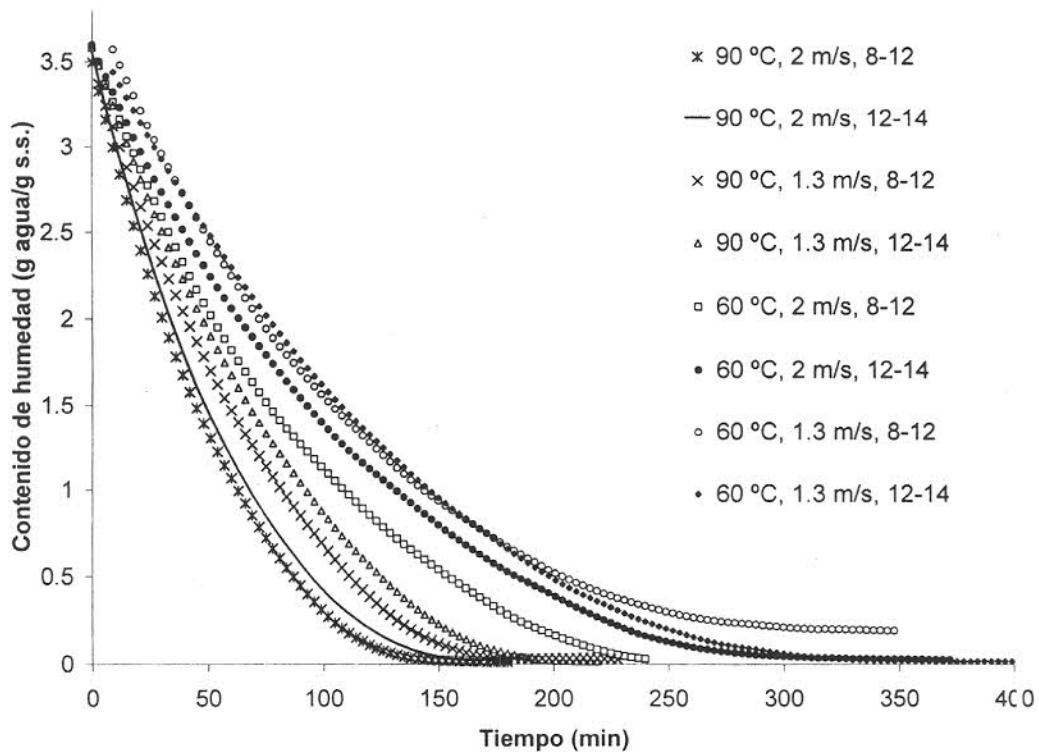


Fig. 4.11 Pérdida de humedad de fibra a diferentes condiciones de secado

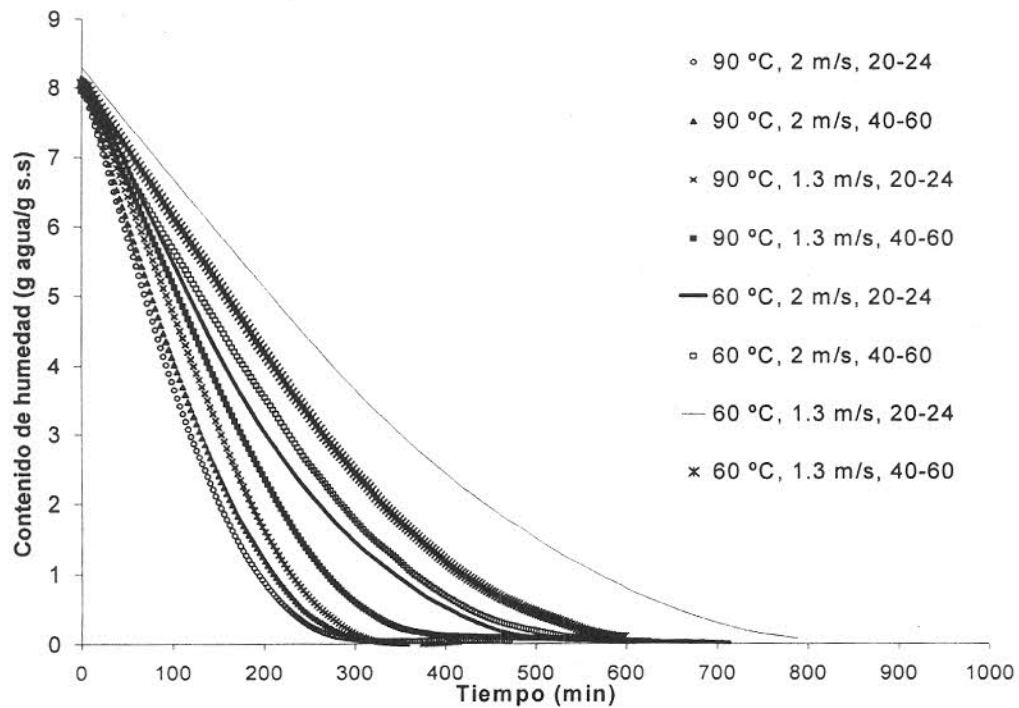


Fig. 4.12 Pérdida de humedad de médula a diferentes condiciones de secado

En la figura 4.13 y 4.14 se presentan las gráficas de pérdida de humedad con respecto al tiempo. Se observan los periodos de acondicionamiento, velocidad constante y decreciente. En médula se aprecia notablemente el periodo de velocidad constante. La comparación entre curvas se realizó dividiendo la pérdida de humedad entre el peso seco de la muestra.

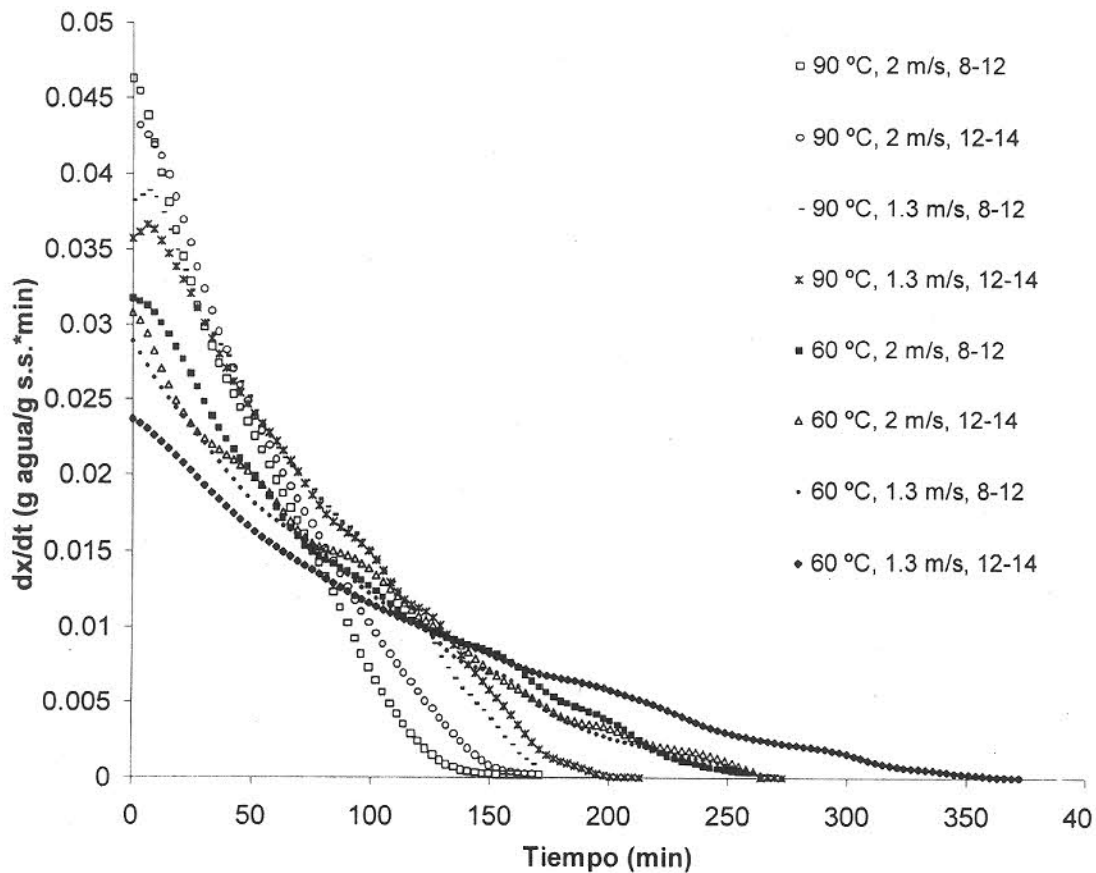


Fig. 4.13 Velocidad de secado de fibra

Las gráficas de pérdida de humedad con respecto al contenido de humedad de fibra y médula (figs.4.15 y 4.16) muestran claramente los periodos de velocidad constante y decreciente. A 60 °C y 1.3 m/s que son las más bajas condiciones de secado para médula, la pérdida de humedad es muy baja.

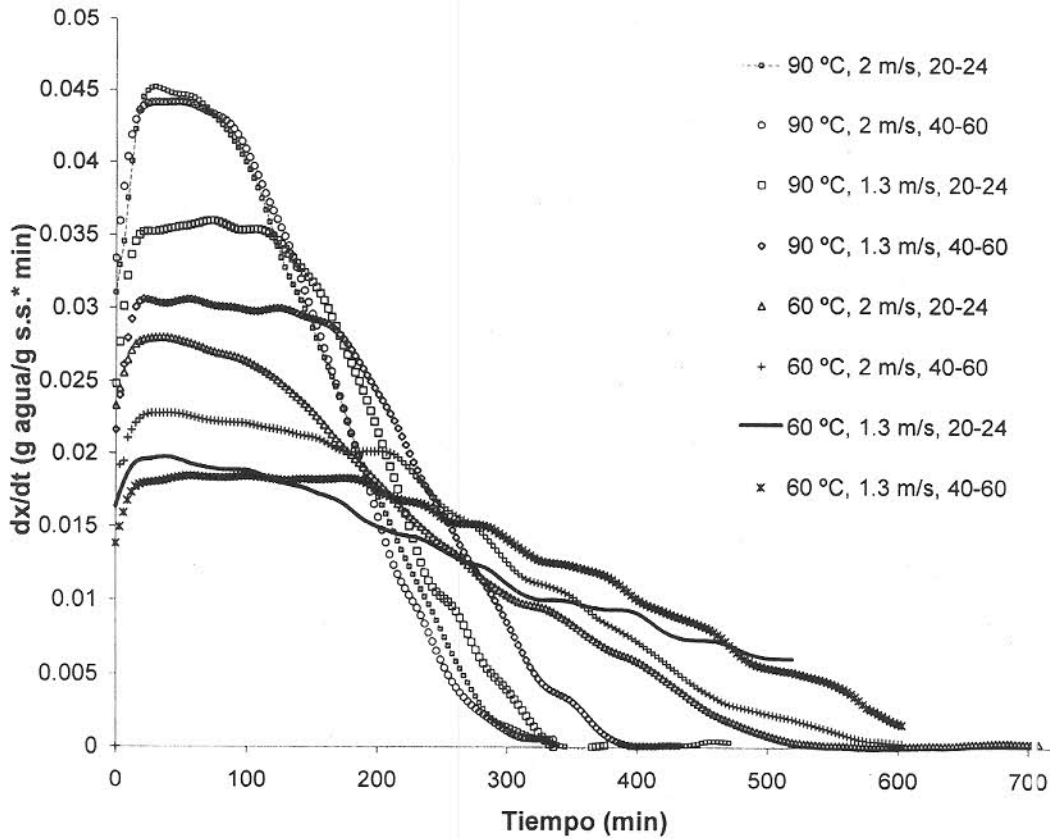


Fig. 4.14 Velocidad de secado de médula

Con ayuda de los datos graficados en las figuras 4.15 y 4.16 de pérdida de humedad con respecto al contenido de humedad se determinó la humedad crítica mediante regresión lineal considerando valores posteriores al periodo de velocidad constantes. Se consideraron los datos de manera de obtener coeficientes de regresión mayores a 0.97.

En todos los casos se obtuvo un coeficiente de regresión mayor a 0.98 para fibra y 0.97 para médula. El contenido de humedad crítica X_c determinado mediante una prueba de varianza de los datos obtenidos de todas las curvas es 3.3806 ± 0.43 g agua/g s.s. (77.16 % b.h.) para fibra y 3.666 ± 0.52 g agua/g s.s. (78.56 % b.h.) para médula. Estos valores son muy similares a los obtenidos por Grobart (1973) para bagazo de caña integral secado en un lecho fijo que fue de 80.71 % base húmeda.

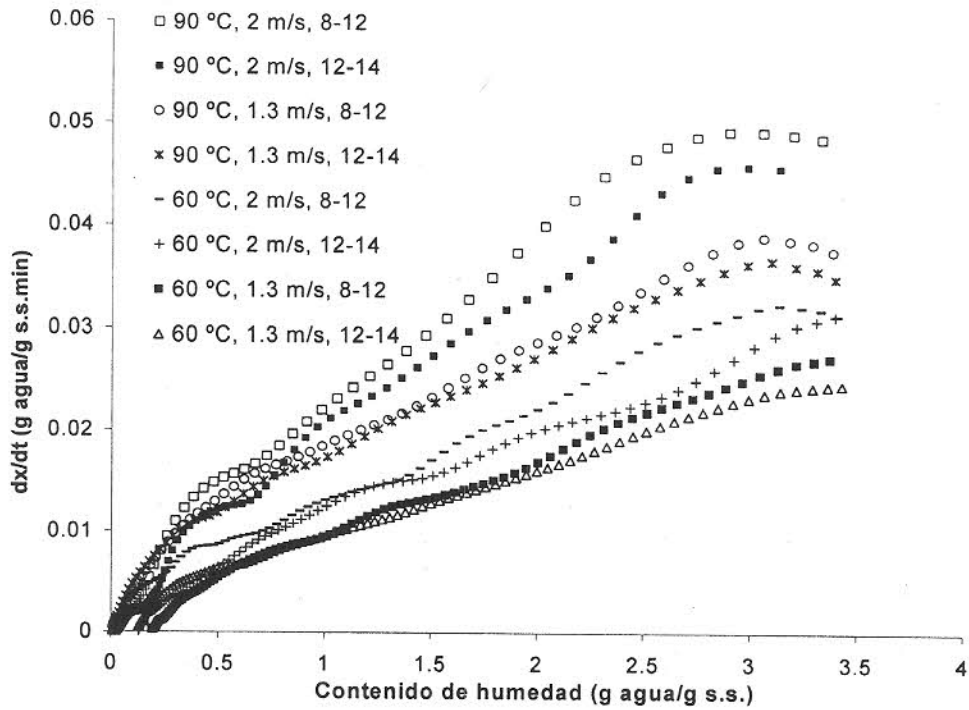


Fig. 4.15 Pérdida de humedad con respecto al contenido de humedad en fibra

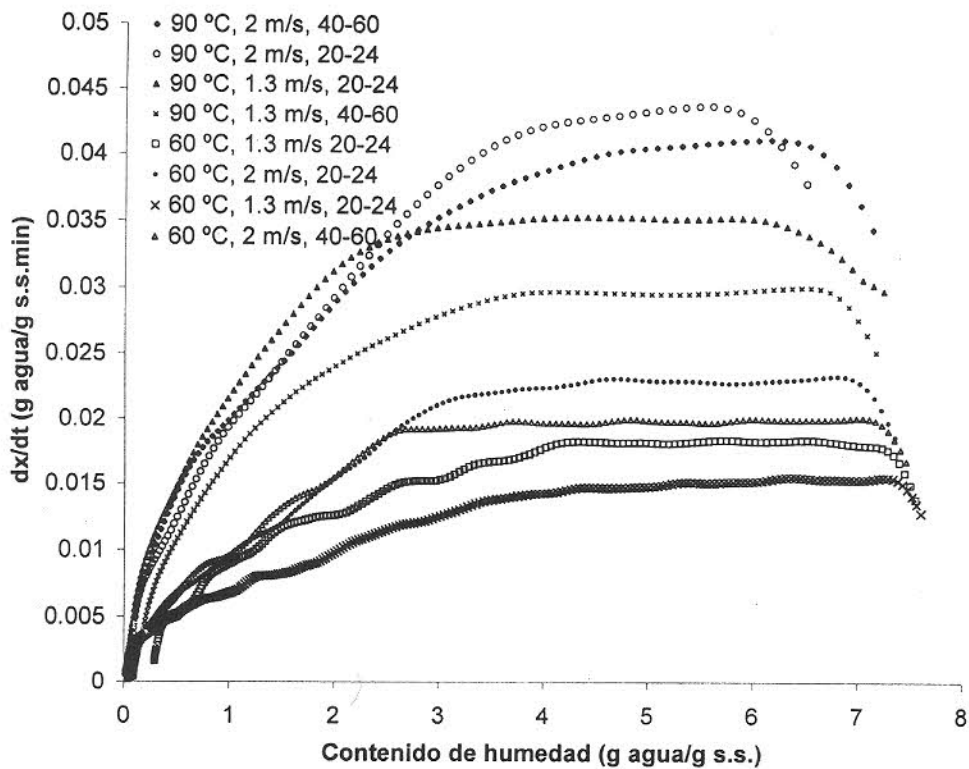


Fig. 4.16 Pérdida de humedad con respecto al contenido de humedad en médula

4.5.3 Evaluación estadística de resultados

Utilizando el primer momento como variable respuesta, reportado en la tabla 4.5 se realizó el análisis estadístico del modelo anidado. Primeramente se hicieron las pruebas de normalidad con gráficos de cajas, de puntos, de probabilidad e histograma, con el propósito de revisar la idoneidad del modelo estadístico utilizado.

Tabla 4.5 Resumen del diseño de experimentos y primer momento

CORRIDA	MATERIAL	TAMAÑO Mallas	TEMP °C	VELOCIDAD DE AIRE m/s	1° MOMENTO (g agua min/g s.s)	
					Réplica 1	Réplica 2
1	Médula	40-60	90	1.3	1206.7	1153.48
2	Médula	40-60	90	2	876.7	988.04
3	Médula	40-60	60	1.3	1814.5	1846.0
4	Médula	40-60	60	2	1779.1	1567.1
5	Médula	20-24	90	1.3	996.07	1108.28
6	Médula	20-24	90	2	906.28	831.86
7	Médula	20-24	60	1.3	2386.9	1479.38
8	Médula	20-24	60	2	1574.4	1405.97
9	Fibra	8-12	90	1.3	214.98	246.99
10	Fibra	8-12	90	2	159.29	157.13
11	Fibra	8-12	60	1.3	299.09	308.34
12	Fibra	8-12	60	2	320.47	270.06
13	Fibra	12-14	90	1.3	220.47	224.57
14	Fibra	12-14	90	2	158.42	169.76
15	Fibra	12-14	60	1.3	364.74	378.68
16	Fibra	12-14	60	2	342.09	283.31

El gráfico de puntos nos muestra la dispersión de datos (fig. 4.17). Un grupo de datos tienden hacia la izquierda sugiriendo una ligera asimetría. La mayoría de los datos tienden a estar al centro. Esto también se puede confirmar con el gráfico de caja que se encuentra en la misma figura.

El gráfico de probabilidad (fig. 4.17) muestra una curvatura en ambos lados de la gráfica que indican una distribución de cola larga o corta. Aunque existen dos puntos fuera de los límites de confianza, no es un fuerte indicativo de anormalidad.

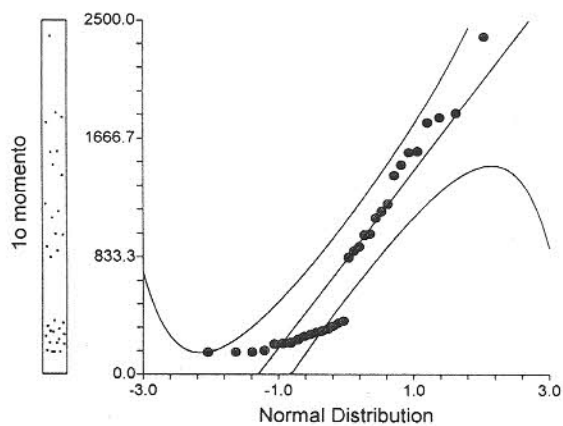


Fig. 4.17 Gráfico de probabilidad de los resultados experimentales

En el histograma (fig. 4.18) observamos la tendencia central, la dispersión y la forma general de la distribución de los datos confirmando las anteriores observaciones.

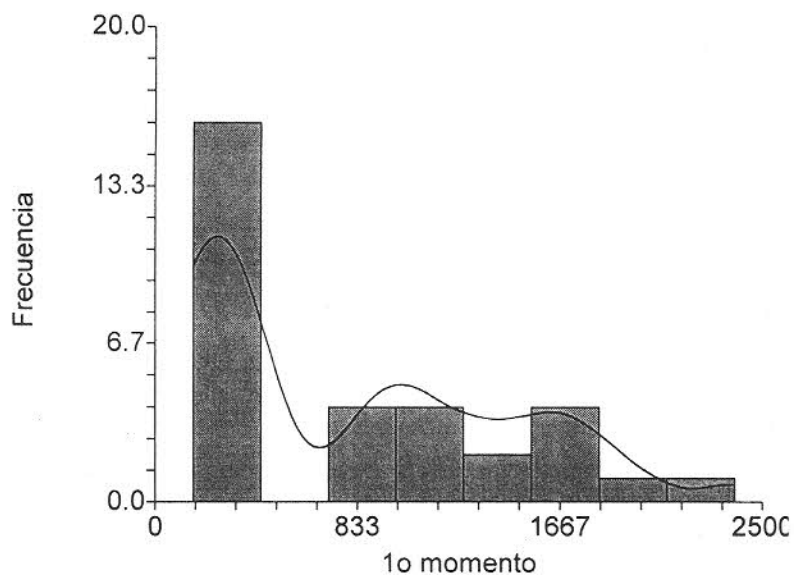


Fig. 4.18 Histograma de los resultados experimentales

Se realizaron pruebas numéricas (tabla 4.6) para verificar la normalidad de los datos utilizando 4 pruebas las cuales aceptan la normalidad.

El análisis estadístico de los datos (tabla 4.7) indica que el origen de mayor variabilidad en orden de significancia estadística es el tipo de material seguido de la temperatura, luego la interacción temperatura-material y finalmente el flujo de aire, a un nivel de confianza del 95%.

De esta manera descartamos el tamaño del material como efecto significativo en el proceso del secado de bagazo de caña. Sin embargo, esta conclusión estará restringida al intervalo de tamaño seleccionados en el diseño. Posiblemente otros tamaños seleccionados no den el mismo efecto.

El flujo de aire queda muy por debajo del efecto del material y la temperatura por lo que se concluye que el efecto del flujo de aire no es tan importante en el secado en charola de médula y fibra como lo es la proporción de fibra o médula presente en la muestra a secar y la temperatura de la cámara de secado. Esto sugiere que el efecto interno y el externo son importantes.

Tabla 4.7 Análisis de varianza

Origen	G.L.	Suma de Cuadrados	Media de cuadrados	Relación F	Nivel de prob. Alfa=0.05	Poder
A (material)	1	9903840	9903840	984.99	0.001014*	0.997651
B(A)	2	20109.48	10054.74	0.34	0.714894	
C (temp)	1	1445456	1445456	575.12	0.001734*	0.971445
AC	1	711269	711269	283.00	0.003515*	0.830657
BC(A)	2	5026.628	2513.314	0.09	0.918308	
D (flujoaire)	1	188993.8	188993.8	30.10	0.031658*	0.209184
AD	1	86579.17	86579.17	13.79	0.065487	0.126553
BD(A)	2	12559.48	6279.74	0.21	0.809565	
CD	1	1391.651	1391.651	0.09	0.795086	0.050507
ACD	1	6788.805	6788.805	0.43	0.580297	0.052472
BCD(A)	2	31751.03	15875.51	0.54	0.592344	
S	16	469353.3	29334.58			
Total (Ajus.)	31	0.288312E+07				
Total	32					

* Términos significativos para un alfa= 0.05

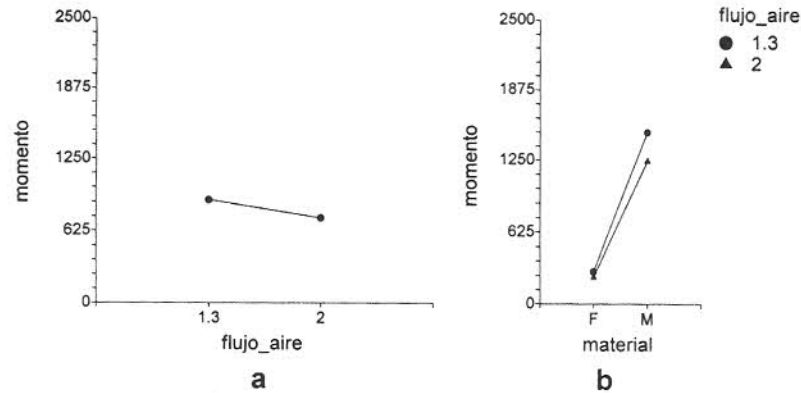


Fig. 4.19 Gráficos de medias de los efectos

El gráfico de medias de cada uno de los factores en la variable de respuesta primer momento se observan en las figs. 4.19 y 4.20. Se confirma que el flujo de aire tiene un efecto menor sobre la variable de respuesta (fig. 4.19a), aún en combinación con el factor material (fig. 4.19b).

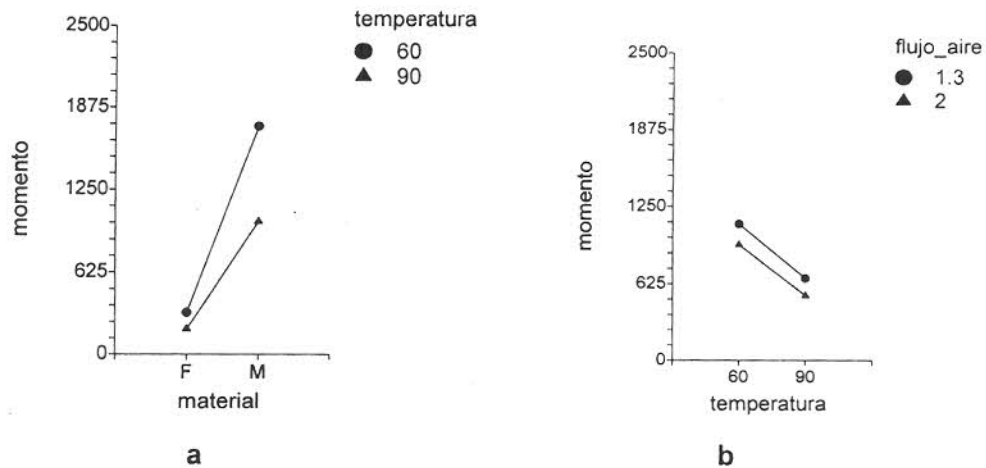


Fig.4.20 Gráficos de medias de los efectos

La fig. 4.20a muestra que a una mayor temperatura y con fibra como material obtenemos los más bajos valores de la variable respuesta. Esto significa que bajo estas condiciones se tendría el secado más rápido.

Un flujo de aire de 2 m/s y una temperatura de 90 °C mayor temperatura (fig. 4.20 b) tiene un mayor efecto sobre la variable respuesta, en esta condición el primer momento es menor y el secado más rápido, ya que el primer momento tiene una relación lineal con la pérdida de humedad.

4.5.4 Determinación de los coeficientes convectivos de masa y calor

En las tablas 4.8 y 4.9 se presentan las propiedades y condiciones de operación utilizados en la ecuación 2.6 y 2.1 para determinar el coeficiente de transferencia de calor experimental y teórico, así como los coeficientes de transferencia de masa (tabla 4.10).

El área es calculada de acuerdo al número de charolas utilizadas en la corrida, la temperatura promedio de la charola en el periodo de velocidad constante, fue determinada directamente en cada corrida. La temperatura del sólido es una promediación desde el inicio hasta el término del periodo de velocidad constante. Las propiedades del aire y del material utilizados en los cálculos se presentan en la tabla 4.9.

Tabla 4.8 Propiedades y condiciones de operación utilizadas en cada corrida

Corrida	Densidad aire húmedo	Rc	Area	Temp. material	Temp. charola	Peso seco
	Kg/m ³	kg/m ² s	m ²	°C	°C	g s.s.
1	0.91	3.297 x 10 ⁻⁴	0.1944	36±4	40	129.62
2	0.832	1.295 x 10 ⁻³	0.0972	31±3	36	183.35
3	1.024	2.252 x 10 ⁻⁴	0.1944	27.5±2.5	33	142.29
4	1.049	5.36 x 10 ⁻⁴	0.0972	19±2.5	30	137.27
5	0.91	5.513 x 10 ⁻⁴	0.0972	39±5	38	90.95
6	0.832	6.655 x 10 ⁻⁴	0.0972	38±5	36	86.907
7	0.803	3.172 x 10 ⁻⁴	0.0972	27.6±1	32	96.25
8	0.714	4.226 x 10 ⁻⁴	0.0972	29±3	32	89.34
9	0.915	4.848 x 10 ⁻⁴	0.1944	38±4.5	40	146.83
10	0.882	5.73 x 10 ⁻⁴	0.1944	33.5±3	38	134.01
11	0.983	4.884 x 10 ⁻⁴	0.1458	32±2	32	152.33
12	1.009	2.596 x 10 ⁻⁴	0.1944	31±4	33	94.407
13	0.88	4.27 x 10 ⁻⁴	0.1944	40.8±2	40	141.9
14	0.904	5.556 x 10 ⁻⁴	0.1944	34.5±4.5	38	142.99
15	1.019	3.255 x 10 ⁻⁴	0.1458	30±3.5	31	117.33
16	1.017	4.579 x 10 ⁻⁴	0.1458	34.8±3.3	34	124.07

Los coeficientes de transferencia de calor calculados experimentalmente (tabla 4.10) presentan una desviación con respecto a los calculados mediante correlaciones empíricas para el caso de una placa plana sobre la cual pasa aire en forma paralela.

Tabla 4.9 Propiedades del aire y del material

Calor de vaporización del agua (m^2s^{-2})	$2.428 \times 10^6 @ 30 \text{ }^\circ\text{C}$
Espesor de la cama (m)	0.014
Conductividad térmica del bagazo ($\text{watt m}^{-1}\text{K}^{-1}$)	0.048
Difusividad molecular del agua en aire ($\text{m}^2\text{seg}^{-1}$)	$3.573 \times 10^{-5} @ 45 \text{ }^\circ\text{C}$
Densidad del aire (kg m^{-3})	$0.973 @ 80 \text{ }^\circ\text{C}$

Una posible explicación de éstas desviaciones está relacionada con la imposibilidad de medir con exactitud la temperatura del sólido.

Tabla 4.10 Coeficientes de transferencia de masa y calor

Corrida	Coeficiente de transferencia de masa $\text{mol/m}^2\text{seg}$	Coeficiente de transferencia de calor		
		$\text{watt/m }^\circ\text{K}$		
		Teórico	Experimental	% desviación
1	0.254	17.012	14.353	16.16
2	0.315	24.012	51.75	53.6
3	0.283	18.227	16.609	8.8
4	0.351	25.727	31.463	22.3
5	0.254	17.012	25.369	49.08
6	0.315	24.012	30.052	25.15
7	0.283	18.227	23.464	28.75
8	0.351	25.727	32.654	26.92
9	0.254	17.012	21.893	28.69
10	0.315	24.012	23.869	0.59
11	0.283	18.227	41.71	15.93
12	0.351	25.727	23.946	6.92
13	0.254	17.012	20.348	19.62
14	0.315	24.012	23.549	1.95
15	0.283	18.227	25.951	42.3
16	0.351	25.727	37.78	46.88

Además el área de la charola no representa necesariamente el área de transferencia. La superficie de la placa de material es irregular debido al acomodo de las partículas, particularmente notable en este tipo de material conformado por fibras.

También se calcularon los números adimensionales de Biot y Reynolds en forma experimental (tabla 4.11). El número de Biot se encuentra entre 1 y 50, por lo tanto las condiciones internas como externas deben ser consideradas para describir el secado de bagazo de caña. La velocidad de secado en el periodo de velocidad constante fue determinada de las curvas experimentales.

Tabla 4.11 Números adimensionales

Corrida	Número de Biot	Número de Reynolds
1	4.186	$1.576 \cdot 10^4$
2	15.596	$2.424 \cdot 10^4$
3	4.844	$1.795 \cdot 10^4$
4	9.177	$2.761 \cdot 10^4$
5	7.399	$1.576 \cdot 10^4$
6	8.765	$2.424 \cdot 10^4$
7	6.844	$1.795 \cdot 10^4$
8	9.524	$2.761 \cdot 10^4$
9	6.385	$1.576 \cdot 10^4$
10	6.962	$2.424 \cdot 10^4$
11	13.995	$1.795 \cdot 10^4$
12	6.984	$2.761 \cdot 10^4$
13	5.935	$2.761 \cdot 10^4$
14	6.869	$2.424 \cdot 10^4$
15	7.575	$1.795 \cdot 10^4$
16	12.658	$2.761 \cdot 10^4$

4.5.5 Determinación de la difusividad efectiva

La difusividad en fibra se muestra en la figura 4.21 y la de médula en la figura 4.22. Se observa que las curvas obtenidas tienen tendencias similares. La difusividad calculada es función del tamaño de partícula, la temperatura de secado y la velocidad del aire;

confirmando que la difusividad determinada explica adecuadamente el transporte interno de masa.

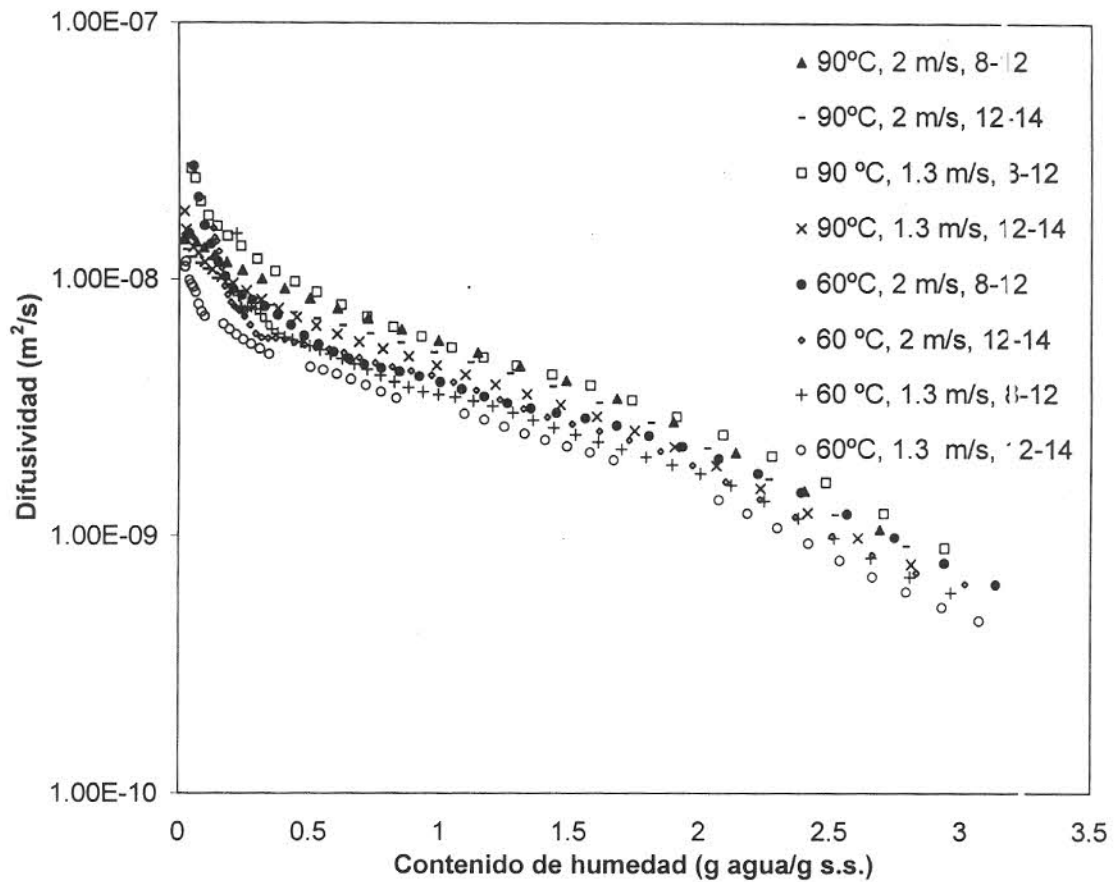


Fig. 4.21 Difusividad con respecto a la humedad de fibra

Los datos siguen un comportamiento exponencial con relación al contenido de humedad. Este tipo de comportamientos está relacionado con la variación de la temperatura siguiendo una funcionalidad tipo Arrhenius (Rodríguez y col. 1998b)

De las funcionalidades reportadas en la literatura se encontró que la funcionalidad:

$$D = A \cdot \exp(B \cdot X)$$

ajusta adecuadamente en un intervalo amplio de contenidos de humedad X, los valores de los coeficientes A y B se presentan en la tabla 4.12 y 4.13.

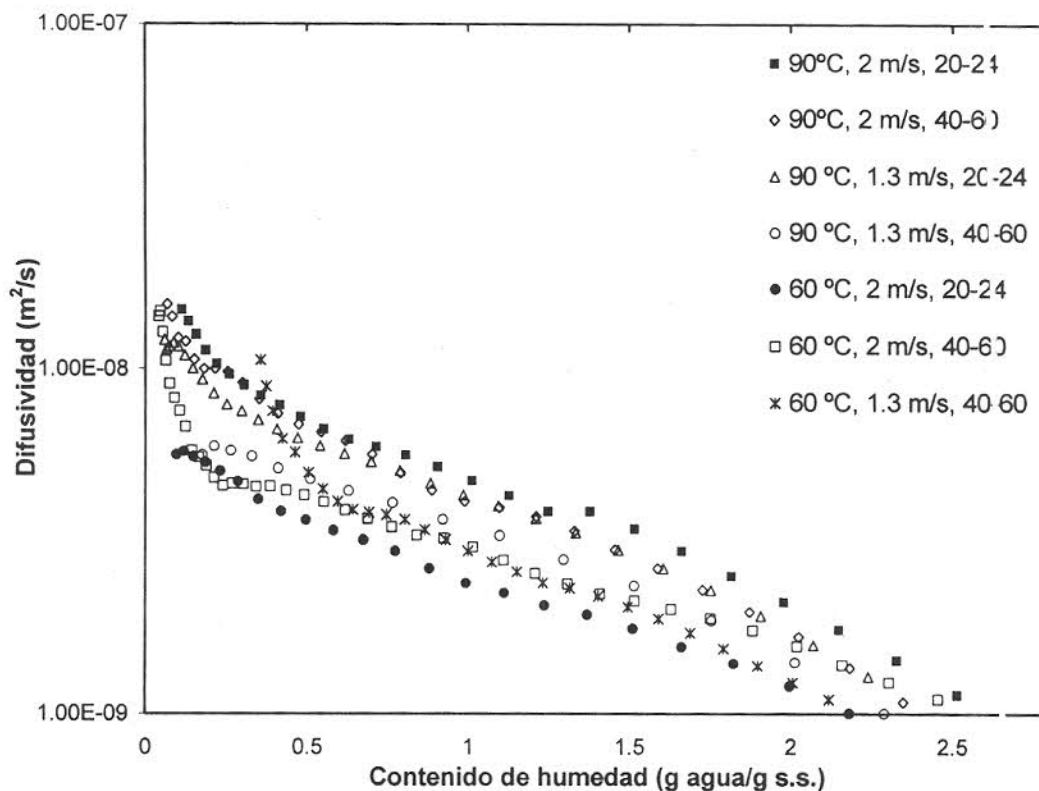


Fig. 4.22 Difusividad con respecto a la humedad de médula

La difusividad a contenidos de humedad bajos se incrementa drásticamente debido a que la temperatura incrementa de la misma manera (fig. 4.23).

Tabla 4.12 Coeficientes de la ecuación exponencial para fibra

Condiciones de operación	A	B	Coef. de regresión
90 °C, 2 m/s, 8-12	1×10^{-8}	-0.9159	0.992
90 °C, 1.3 m/s, 8-12	2×10^{-8}	-1.003	0.966
90 °C, 2 m/s, 12-14	1×10^{-8}	-0.864	0.988
90 °C, 1.3 m/s, 12-14	1×10^{-8}	-0.9701	0.979
60 °C, 2 m/s, 8-12	1×10^{-8}	-0.927	0.919
60 °C, 1.3 m/s, 8-12	9×10^{-9}	-0.894	0.971
60 °C, 2 m/s, 12-14	1×10^{-8}	-0.910	0.947
60 °C, 1.3 m/s, 12-14	8×10^{-9}	-0.921	0.980

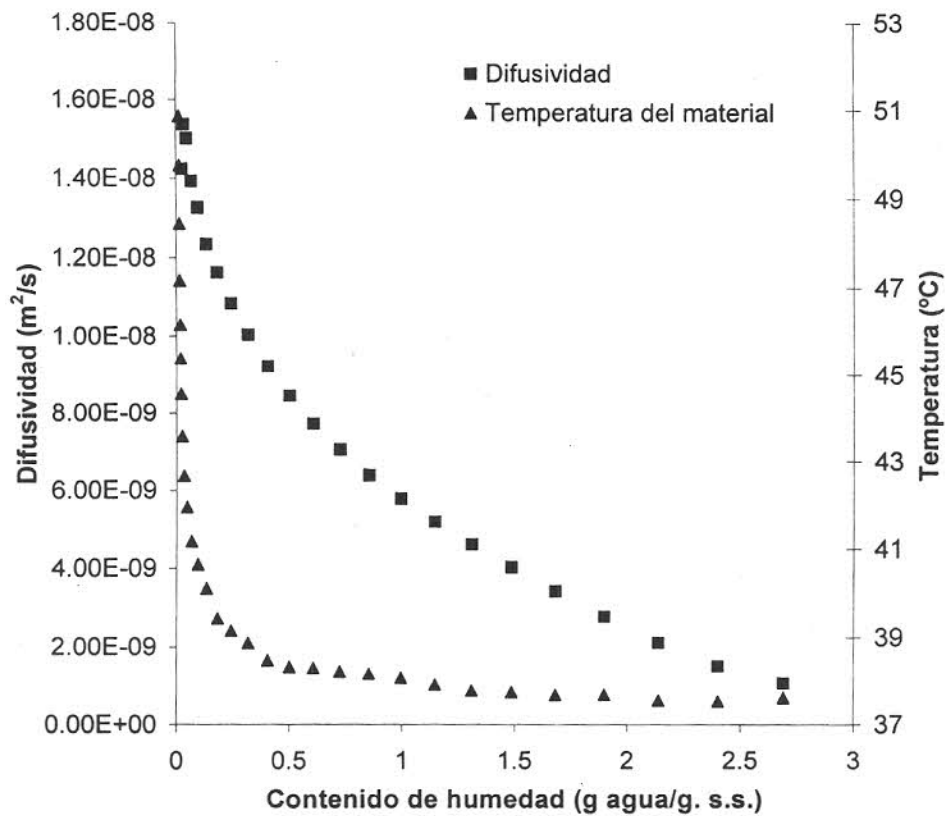


Fig. 4.23 Comportamiento de la difusividad del material en fibra para las condiciones de operación 90°C, 2 m/s, 8-12

Para el caso de médula no se observa una diferenciación clara entre el efecto de tamaño de partícula y de velocidad de aire. Posiblemente sea debido a que los niveles utilizados sean muy cercanos o debido a error experimental.

Tabla 4.13 Coeficientes de la ecuación exponencial para médula

Condiciones de operación	A	B	Coef. de regresión
90 °C, 2 m/s, 20-24	1×10^{-8}	-0.9556	0.9851
90 °C, 1.3 m/s, 20-24	1×10^{-8}	-0.9414	0.986
90 °C, 2 m/s, 40-60	1×10^{-8}	-1.0441	0.987
90 °C, 1.3 m/s, 40-60	8×10^{-9}	-0.8761	0.983
60 °C, 2 m/s, 20-24	6×10^{-9}	-0.8374	0.992
60 °C, 2 m/s, 40-60	7×10^{-9}	-0.7742	0.986
60 °C, 1.3 m/s, 40-60	8×10^{-9}	-0.9799	0.992

4.6 Isotermas de sorción

En los métodos probados experimentalmente para la determinación de las isotermas de sorción se analizaron las ventajas y desventajas de cada método que se reportan a continuación.

La celda de proximidad al equilibrio (fig. 4.24) requiere muestras con un peso suficientemente grande para que el error por la pérdida o ganancia de peso debido a la tendencia hacia el equilibrio pueda ser medido adecuadamente y además sea mínimo.

Debido a que el material trabajado tiene una densidad de 0.22 kg/cm^3 y el espacio disponible para colocar la muestra es muy pequeño no es posible apreciar la pérdida o ganancia de peso debido a que el cambio de peso entre mediciones es de milésimas de gramo.

Otra desventaja es que a altas temperaturas el recipiente se satura de humedad, que al condensarse humedece la muestra.

La ventaja de este método es que, debido al tamaño de la celda se requiere poca cantidad de sal, por lo que se alcanza con más rápidamente el equilibrio con respecto a los otros métodos. Además que, al hacerse una modificación para pesar sin abrir la celda mediante un alambre que atraviesa el tapón de hule sin rozarlo y que sostiene en un extremo el portamuestra y en el otro se coloca en el ganchillo de pesada inferior de la balanza, el equilibrio no se rompe.

Se seleccionó el método donde se utiliza sales saturadas para evaluar las isotermas a $70 \text{ }^\circ\text{C}$ y el método de ácido sulfúrico de diferentes concentraciones con actividad de agua conocidos para evaluar las isotermas a $28 \text{ }^\circ\text{C}$. Las celdas fueron desecadores de 15 cm de diámetro y donde es medida la ganancia o pérdida de peso en la muestra. Entre las ventajas de los métodos seleccionados está la mínima y económica cantidad de material requerido, la gran cantidad de muestra que es posible colocar en el desecador, que en este caso es muy necesario para poder detectar los cambios de peso con el menor error posible y que, debido al tamaño de la celda no existe una formación notable de condensados a altas temperaturas.

Entre sus desventajas está el efecto que sobre la muestra tienen el medio ambiente al cual se expone la muestra al momento de abrir la celda y realizar la pesada.

La muestra tiende inmediatamente a alcanzar el equilibrio con la humedad del ambiente por lo que se requiere pesar muy rápidamente y que en este caso se requirió

la ayuda de una computadora y la elaboración de un software para la adquisición y almacenado de los datos.

Además al momento de abrir la celda se pierde el ambiente creado por las sales, requiriendo un mayor tiempo para que la muestra llegue al equilibrio.

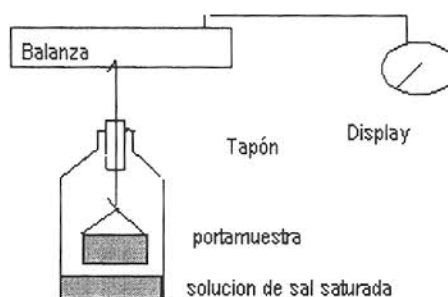


Fig 4.24 Celda de proximidad al equilibrio

Por otro lado el uso de soluciones de ácido sulfúrico tiene la desventaja que se pierde la concentración inicial del ácido utilizado debido a que los recipientes son abiertos cada vez que se pesa la muestra. Esto obliga a determinar la concentración al finalizar el experimento midiendo la densidad de las soluciones de ácido. Sin embargo las soluciones con actividad de agua muy baja tienden a aumentar la concentración de las soluciones de ácido debido a evaporación de agua al finalizar el experimento, mientras que las de actividad de agua alta tienden a disminuir, siendo muy difícil determinar los puntos extremos de la curva usando ácidos de humedad relativa conocida. Este efecto es más notable cuando se requiere determinar isotermas a temperaturas mayores de 25 °C.

4.6.1 Evaluación del método

La figura 4.25 muestra la curva de calibración con papel filtro a 28 °C. Se utilizaron soluciones de ácido sulfúrico para evaluar el método. En el análisis de regresión se obtuvo una línea recta con valores que se presentan en la tabla 4.14 siendo muy semejante a la calculada por Mc Cune y col. (1981), por lo que se considera que el método utilizado para la determinación de actividad de agua en el bagazo de caña es bueno.

Tabla 4.14. Constantes de la regresión de la curva de calibración de pape filtro

	a	b	Coef. de correlación
Experimental	1.204	-10.1932	0.985
Referencia (Mc Cune y col. 1981)	1.379	-9.856	0.99

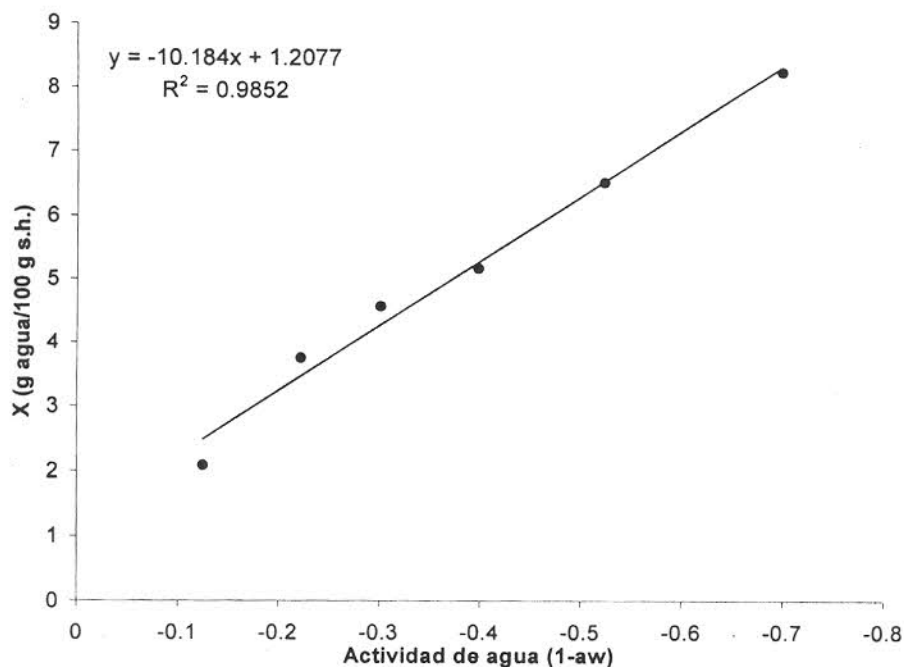


Fig. 4.25. Curva de calibración de papel filtro a 28 °C

4.6.2 Isotermas de adsorción de fibra y médula

Las gráficas 4.26 y 4.27 presentan las isotermas de adsorción de fibra y médula a 25 y 70°C, los porcentajes de humedad están expresados en base seca, en la tabla 4.15 se presentan las constantes obtenidas para la ecuación GAB. En la tabla 4.16 se presentan los valores de k y c que son los factores de corrección de propiedades de las moléculas en la multicapa, de acuerdo a las ecuaciones 2.13 y 2.14.

La forma de las gráficas son sigmoides, tipo II concordando con moderados valores de C que según Gal (1981) se observan en isotermas de este tipo. De acuerdo a la determinación del contenido de azúcares previamente evaluado, no se consideran efectos de azúcares en la isoterma.

Tabla 4.15 Constantes de la ecuación GAB y ajuste.

Material	Xm	C	K	Coefficiente de regresión
Fibra a 25 °C	3.6511	4.2061	82.57×10^{-4}	0.9973
Fibra a 70 °C	1.6679	5.4379	103.73×10^{-4}	0.9882
Médula a 25 °C	2.6977	5.5689	96.01×10^{-4}	0.9949
Médula a 70 °C	2.6	1.7266	98.19×10^{-4}	0.9742

La constante C de la ecuación GAB, muestra una mayor dependencia de la temperatura que la constante K en el caso de médula. En el caso de fibra Xm varía significativamente con la temperatura. En médula C disminuye cuando la temperatura aumenta indicando que las moléculas de la monocapa están más fuertemente enlazadas a 20 °C que a 70°C. Como se observa en la figura 4.26 para fibra y 4.27 para médula donde el contenido de humedad alcanzado para una actividad de agua de 80 % es menor de 11 g agua/100 g de s.s., en ambos casos las propiedades de adsorción son pobres en comparación con otros materiales estudiados.

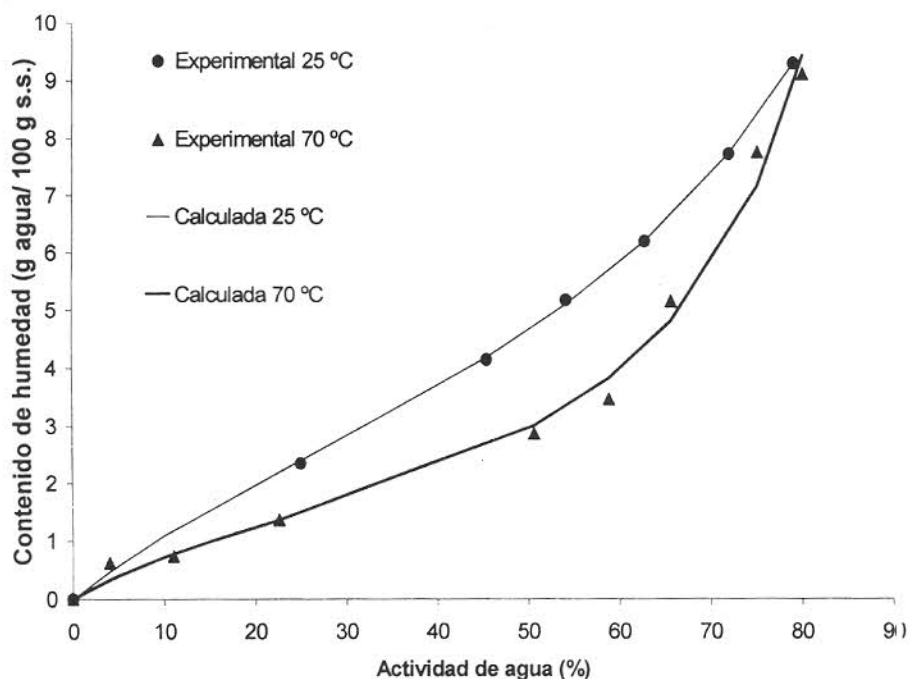


Fig. 4.26 Isotherma de adsorción de fibra a 25 y 70 °C

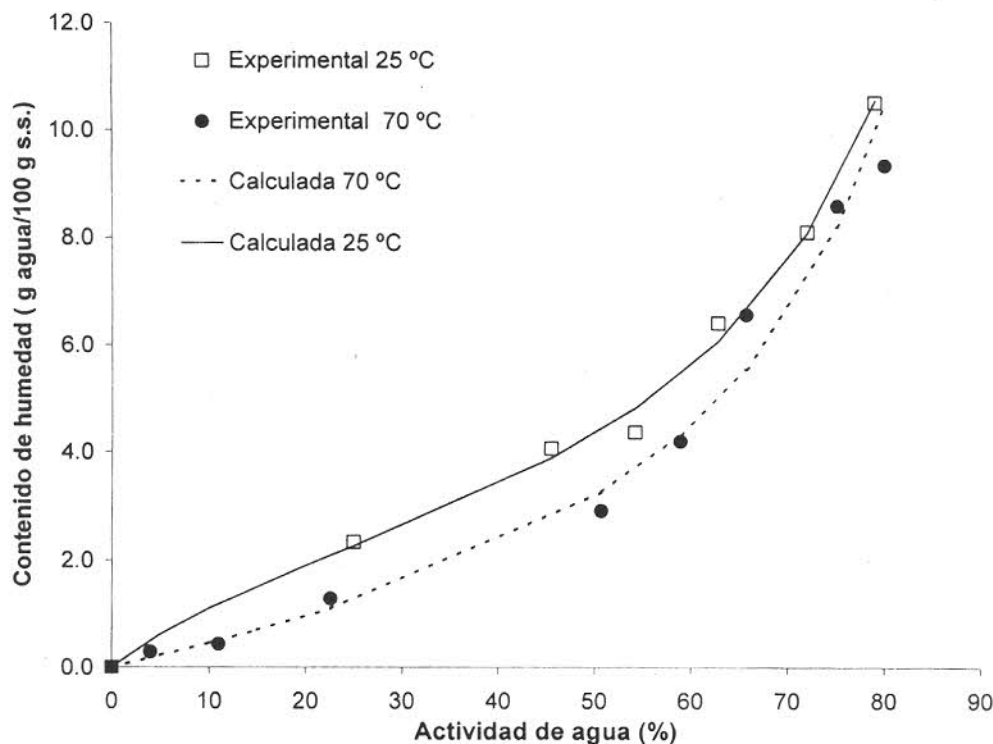


Fig. 4.27 Isoterma de adsorción de médula a 25 y 70 °C

En la tabla 4.16 se presentan los valores de k y c que son los factores de corrección de propiedades de las moléculas en la multicapa, de acuerdo a las ecuaciones 2.13 y 2.14.

Tabla 4.16. Factores de corrección de la ecuación GAB

Material	c	k
Fibra	29.8235	0.04702
Médula	73.73×10^{-5}	11.39×10^{-3}

La forma de las gráficas son sigmoides, tipo II concordando con moderados valores de C que según Gal (1981) se observan en isothermas de este tipo. De acuerdo a la determinación del contenido de azúcares previamente evaluado, no se consideran efectos de azúcares en la isoterma.

Las isothermas de adsorción de fibra y médula son comparadas con la obtenida por Labuza y Vos (1974) de celulosa microcristalina, considerando que el bagazo de caña esta formado principalmente por celulosa (fig. 4.28). En esta gráfica se observa el

mismo tipo de isoterma que el obtenido para la fibra y médula y con propiedades de adsorción parecidas.

En la isoterma de adsorción de fibra y médula (fig. 4.26 y fig. 4.27) se observa que el contenido de humedad disminuye cuando la temperatura incrementa de 25°C a 70°C. En general se espera que el contenido de humedad disminuya con el incremento de la temperatura a una determinada actividad de agua (Ayranci y col. 1990).

La ecuación GAB proporciona un buen ajuste de los datos experimentales sobre el intervalo de a_w de 0 a 80 % para fibra y médula a 70 °C, y de 25 a 80 % en fibra y médula a 25 °C. El error experimental para el modelo GAB fue entre 0.018 y 3.72 % indicando un buen ajuste por lo que el uso de la ecuación GAB resulta en un buen modelo para los datos experimentales.

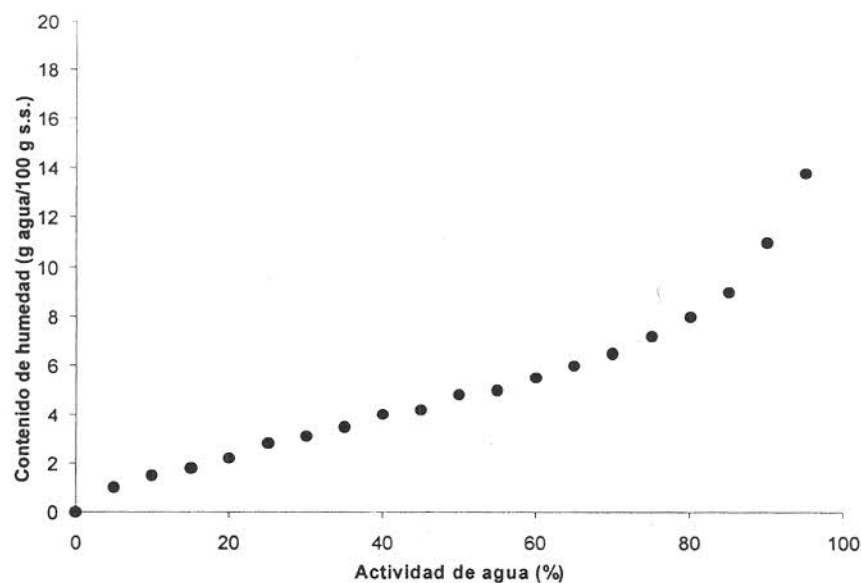


Fig. 4.28 Isoterma de adsorción de celulosa microcristalina a 28 °C

4.6.3 Área superficial

En la tabla 4.17 se presenta el área superficial. Se comparó con valores obtenidos mediante técnicas de adsorción de nitrógeno los cuales fueron de 1.2 m²/g s.s. para fibra a 25 °C y 1.8 m²/g s.s. para médula a 25 °C (Arzate y col. 1997). Las diferencias pueden deberse a las técnicas utilizadas en la evaluación del área. Esta situación fue observada por Berlin y Kliman (1966) el cual encontró que la superficie así calculada para adsorción de agua en alimentos es del orden de 10 a 100 veces mayor que la calculada por adsorción de nitrógeno.

Tabla 4.17. Area superficial

Material	Temperatura °C	Area (m ² /g s.s.) *
Fibra	25	127.790
Fibra	70	58.376
Médula	25	94.422
Médula	70	91.000

Por otra parte se observa que el área superficial disminuye cuando incrementa la temperatura. Debido a que el área superficial se refiere al área superficial total disponible para enlaces hidrofílicos se puede decir que a mayor temperatura existe una menor área disponible para éstos enlaces confirmándose con los resultados encontrados en la isoterma de adsorción.

4.6.4 Efecto de la temperatura

La gráfica 4.29 presenta el calor isostérico de sorción (Q_{st}). Para médula, muy altos valores de Q_{st} corresponden a muy bajos valores de contenido de humedad disminuyendo rápidamente a medida que aumenta el contenido de humedad, es decir que a mayor contenido de humedad, menor energía es requerida para remover moléculas de agua del sólido. Esto concuerda con el comportamiento de las curvas de pérdida de humedad a contenidos de humedad menores de 0.1 g agua/g s.s.

Tabla 4.18. Calores de sorción para fibra y médula

Material	Temperatura °C	H_n (kJ/mol)	H_o (kJ/mol)	H_L (kJ/mol)
Fibra	25	43.91	39.597	34.742
Fibra	70	42.00	37.680	32.830
Médula	25	43.91	43.480	65.620
Médula	70	42.00	41.570	63.711

Solo cuando se alcanzan muy bajos valores de contenido de humedad la energía requerida incrementará significativamente arriba de este valor.

El parámetro Q_{st} es de fundamental importancia en el modelamiento de secado (Rotstein and Cornish, 1978), por el papel que juega en la ecuación de energía.

Una indicación de los fuertes enlaces de las últimas moléculas de agua remanentes en el sistema son los altos valores del calor isostérico de sorción conforme el contenido de humedad disminuye (Thomas y Thomas, 1967).

Para el caso de fibra se presentan valores de calor isostérico de sorción menores a bajo contenido de humedad, sin embargo también disminuye rápidamente a medida que aumenta el contenido de humedad.

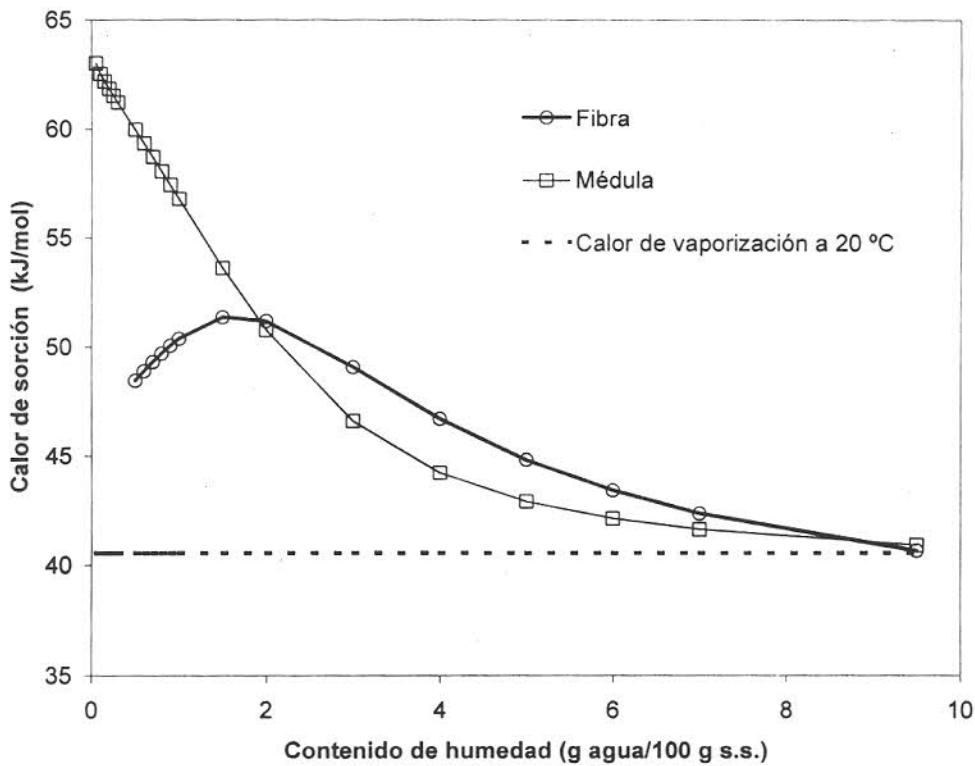


Fig. 4.29 Calor isostérico de sorción

En la figura 4.29 se puede observar que se puede alcanzar un contenido de humedad muy bajo (1 g agua/100 g s.s.) con la misma cantidad de energía que el requerido para un contenido de humedad mayor (cerca de 3 g/100 g s.s.). En el caso de fibra los enlaces de las últimas moléculas de agua remanentes en el sistema son más débiles que para médula.

Capítulo 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones están basadas en el secado de fibra y médula colocadas en una charola sobre la cual se hace pasar aire caliente para secar el material y en el análisis de las propiedades determinadas.

5.1 Conclusiones

- El material está conformado por estructuras huecas y con múltiples poros. El tamaño de poro determinado mediante fotografía electrónica, se encuentra en el rango de macroporos.
- La adsorción de agua en fibra y médula es muy semejante y en comparación con otros materiales es mínima.
- El área superficial de la fibra es mayor que el área de la médula a temperatura ambiente.
- La diferencia entre la velocidad de secado de fibra y médula está apoyada principalmente en la diferencia en la fracción de huecos. La fracción de huecos es un indicador de como se coloca el material a secar en la charola y favorece o impide la transferencia de masa por evaporación.
- El calor isostérico de sorción para médula es mayor para bajos contenidos de humedad concordando con el comportamiento de las curvas de pérdida de humedad a contenidos de humedad menores de 0.1 g agua/g s.s.
- Los factores significativos estadísticamente en el secado del bagazo fueron el material, la temperatura, la interacción de éstas y el flujo de aire. La relevancia estadística que el material tiene, además de la diferencia que se observa en las propiedades de la fibra y médula, indica una diferencia entre materiales.
- La relación de los principales componentes de un lote de bagazo de caña es de 51 % para fibra y 48 % para médula y concuerda con valores de literatura.
- El contenido de azúcares en bagazo de caña no afecta al transporte de humedad durante el secado de bagazo de caña.
- La difusividad obtenida para fibra y médula sigue un comportamiento exponencial con relación al contenido de húmeda y es afectada por la temperatura.

- Los datos obtenidos en las isotermas de adsorción para fibra y médula a dos temperaturas, ajustan a un modelo GAB en un intervalo de 0 a 80 % para fibra y médula a 70 °C y en un intervalo de 25 a 80 % para fibra y médula a 25 °C, con un error experimental menor al 3.72 %.

5.2 Recomendaciones

- Diseñar y llevar a cabo un experimento con un intervalo más amplio de n veces a estudiar, eliminando los factores que se ha comprobado que no son importantes estadísticamente. Evaluar si se llega a las mismas conclusiones.
- Determinar la temperatura de bulbo húmedo a la entrada y la salida del secador a la temperatura de operación para determinar con precisión la humedad absoluta.
- Determinar las isotermas de desorción a la 25 °C y 70 °C para identificar posibles comportamientos de histéresis del material, así como a otras temperaturas.
- Seleccionar un mejor método para determinar las isotermas de sorción que permita un preciso y más rápido equilibrio de las muestras.
- Analizar el efecto del tamaño de partícula en las isotermas de sorción.

BIBLIOGRAFIA

- Anderson R.B. (1946), Modifications of BET equation. *J. Am. Chem.Soc.* **68**:686-691.
- AOAC (1984), Official methods of analysis 14th Ed.
- Arrascaeta A. y Friedman P.(1984), Bagasse drying: past, present and future, *Ins. Sugar JNL*, **86**(1021):3-6.
- Arzate S. C., Flores R. M.A., y Mar M. B. (1997), Informe de resultados de análisis de médula y fibra de bagazo de caña, CA-872/873, Instituto Mexicano del Petróleo Reporte Interno.
- Atchicson J.E. (1971), Review of progress whit bagasse for use in industrial. *Proc. XIV Int. Soc. Sugar Cane.* 1189-1229.
- Atchicson J.E. (1974), Present status and future potential for utilization of bagasse in the pulp, paper and paperboard. *Proc. XV Int. Soc. Sugar Cane.* **3**:1851-1863.
- Ayranci E., Ayranci G. y Doganten Z. (1990), Moisture sorption isotherms of dried apicot fig and raisin at 20°C and 36 °C, *J. Food Sci.* **55**(6):1591-1593.
- Berlin E., Kliman, P.G. y Pallansch, M.J. (1966), Surface areas and densities of freeze-dried food. *J. Agr. Food. Chem.* **14**:15.
- Bizot H.(1983), Using the "G.A.B." model to construct sorption isotherms. In physical properties of foods. Jowitt y col. (Eds.), pp. 43-54. Ed. Applied Science Publishers, London and New York.
- Brunauer S., Emmett, P.H., y Teller, E. (1938), Adsorption of gases in multimolecular layers. *Am. Chem. Soc. J.* **60**:309-319.
- Cadden A. (1988), Moisture sorption characteristics of several food fibers. *J. Food Sci.* , **53**(4):1150-1155.
- Carr D.S. y Harris B.L. (1949), Solutions for maintaining constant relative humidity, *Ind. Eng. Chem.* **41**:2015-2016.
- Chen J.C.P. y Chow C.C.(1993), Cane Sugar Handbook, 12^a ed. Capítulo 10, pp.375-397. Ed. Wiley.
- Comings E.W. (1984), Contributions of T.K. Sherwood and associates to the field of drying, *Drying Tech.*, **1**(2):249-273.
- De Boer J. H. (1953), The dynamical character of adsorption. Ed. Clarendon Press, Oxford.
- Dean J. A. (1992), Lange's handbook of chemistry, 14a ed., McGraw Hill Inc.
- Gal S. (1981), Water Activity: Influences on food quality, Eds. Rockland L. B., Stewart G.F., Ed. Academic Press, pp. 89-110.
- García-Figueroa M.E. y Flores R. M.A. (1997), Análisis morfológico por microscopía electrónica de barrido, ME-175, ME-176, Instituto Mexicano del Petróleo, Reporte Interno.

- Geankoplis C.J. (1993), Transport processes and unit operation. Ed. Printice H., pp. 543.
- Grobart F. (1973), Determinación experimental de la humedad crítica de bagazo, Revista ICIDCA, 7(1).
- Guggenheim E.. (1966), Applications of statistical mechanics. Ed. Clarendon Press. Oxford.
- Halsey G. (1948), Physical adsorption on non-uniform surfaces. J. Chem Physics 16:931-937.
- Henderson S.M. (1952), A basic concept of equilibrium moisture. Agric. Eng. 33:29-32.
- Iglesias H.A. y Chirife, J. (1976), A model for describing the water sorption behavior of foods. J. Food Sci. 41:984-992.
- Kanade P.B. y Pai J.S.(1988), Moisture sorption method for hygroscopic samples using a modified proximity equilibration cell. J. Food Sci., 52(4):1218-1219.
- Karathanos V.T, Villalobos G. y Saravacos G.D. (1990), Comparison of two methods of estimation of the effective moisture diffusivity from drying data, J. Food Sci., 55(1).
- Kumar M. (1974), Water vapour adsorption on whole corn flour, degermed corn flour, and germ flour. J. Food. Technol., 9:433-444.
- Labuza T.P.y Vos P.T. (1974), Technique for measurement of water activity in the high a_w range. , J. Agr. Food Chem, 22(2):326-327.
- Luna R. R. (1991), Fundamentos de química analítica. Ed. Limusa, 2ª.ed.
- Mc Cune T.D., Lang K.W. y Steinberg M.P. (1981), Water activity determination with the proximity equilibration cell. J. Food Sci. , 46:1978-1979.
- Montgomery D.C. (1991), Diseño y análisis de experimentos. Ed. Iberoamericana.
- Moss, N.. (1983), El secado de sólidos en la industria química, Ed. Reverté.
- Mujumdar A.S.(ed) (1995), Handbook of Industrial Drying, 2ª ed., Ed. Marcel Dekker.
- NOVASINA (1990), Teoría de la tecnología de la medición de humedad y temperatura., Manual del equipo para la determinación de actividad de agua.
- Papadakis, R.E., Bahu R.E., McKenzie K.A. y Kemp L.C. (1993), Correlations for the equilibrium moisture content of solids. Drying Tech. , 11(3):543-553.
- Rao M.A y Rizvi S.S.H., (1986), Engineering Properties of Foods. Ed. Marcel Dekker, Inc.
- Rockland L. y Stewart G.(1981), Water activity: Influences on food quality, Ed. Academic Press.
- Rodríguez R.J. (1998) Modelamiento del transporte de humedad de bagazo de caña. Reporte Interno, Instituto Tecnológico de Celaya, Depto. de Ing. Química.
- Rodríguez R.J., Quintana P.A. y Méndez L.L. (1998), Evaluación de factores que afectan la difusividad en fibras de bagazo de caña. XIX Encuentro Nacional AMIDIQ, Memorias.
- Rotstein E. y Cornish, A.R.H. (1978), A transport phenomena analysis of air drying of foodstuffs. In "Proceedings of the First International Symposium on Drying", pp.24. Ed.Science Press, Princeton.

- Strumillo C. (1987), *Drying: Principles, applications and design*, Ed. Gordo.
- Thomas J.M. y Thomas W.J. (1967), *Introduction to the Principles of Heterogeneous Catalysis*, Ed. Academic Press, London and New York.
- Treybal R. E. (1980), *Mass Transfer Operations*, Ed. McGraw Hill.
- Vaccarezza L.M., Lombardi, J.L. y Chirife, J. (1974), Kinetics of moisture movement during air drying of sugar beet root, *J. Food Technol.* , 9:317-327.
- Van der Berg, C. y Bruin, S.(1981), *Water activity and its estimation in food systems: theoretical aspects. Water activity: Influences on food quality*, L.B. Rockland and G.F. Stewart (Eds.), Ed. Academic Press, New York.

ANEXOS

- A. Diseño y adaptaciones al equipo.
 - B. Desmedulador.
 - C. Manejo del secador.
 - D. Puntos de seguridad en el manejo del secador
 - E. Determinación de coeficientes de transferencia de masa y calor.
-

A. DISEÑO Y ADAPTACIONES AL EQUIPO

Secador de charolas

- Aislamiento del ducto con fibra de vidrio con cubierta de aluminio de 1 pulgada de espesor montada sobre un soporte de tela que permite fijar el material aislante sobre el ducto como se aprecia en la figura A1.

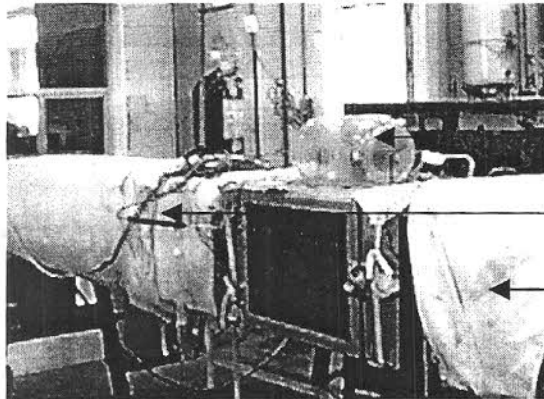


Fig. A1 Secador de charolas

Celda de carga

Sensor RTD

Aislante de fibra de vidrio

Instalación de un control digital de temperatura PID (control proporcional integral) marca FAITHFUL modelo BTC403 con un intervalo de 0 a 99.9 °C con sensor de platino RTD de 100 Ω con un intervalo de -101 a 538 °C y un tiempo de respuesta de 8 segundos, instalado en la cámara de secado antes de las charolas portamuestra; el cual permite un control más preciso y mantiene estable la temperatura en el ducto. El control con una precisión de $\pm 1^\circ$ C está instalado como se describe en la figura A2 y A3.

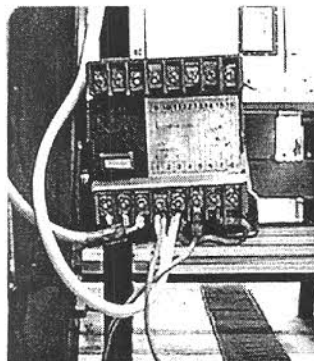


Fig. A2 Control PID

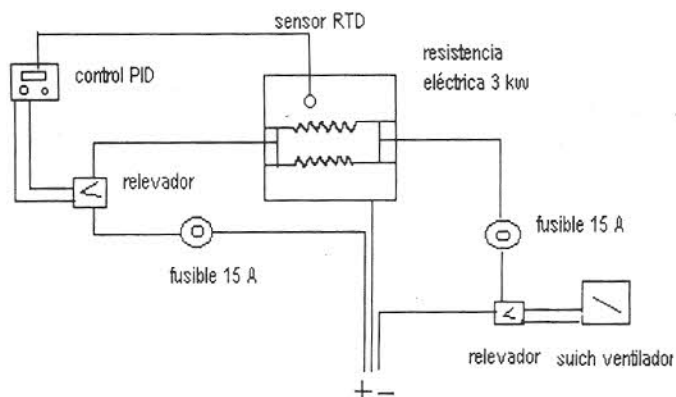


Fig. A3 Diagrama esquemático del sistema de calentamiento y control

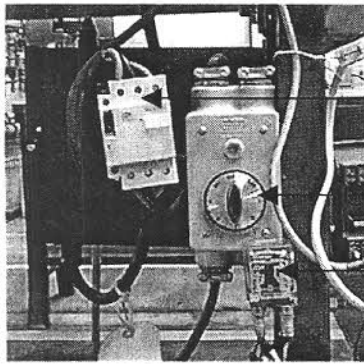


Fig. A4 Guardamotor, control de temperatura de la resistencia adicional y relevador

Guardamotor

Control de temperatura de resistencia auxiliar

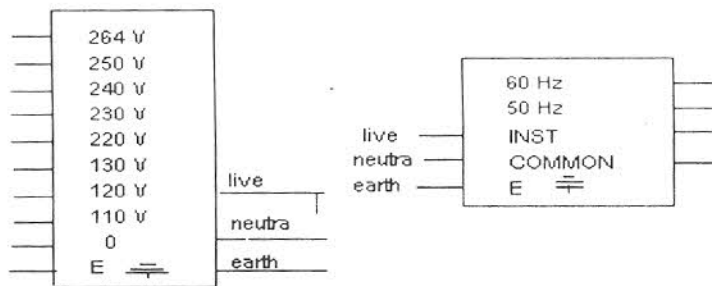
relevador

- Instalación de resistencia de 3 Kw montada sobre la cara posterior del soporte de la resistencia original, esta resistencia tiene un control independiente (fig.A4), el cual cuenta con un sistema de seguridad que consta de fusible de 15 A (b) en la entrada de corriente y fusible de 15 A entre el relevador de 220 A y la resistencia auxiliar como se describe en el diagrama, que permite, en caso de que falle la corriente en el ventilador, se apague automáticamente la resistencia auxiliar. De esta manera se evitará cualquier daño al secador.

Instalación eléctrica:

-Eliminación del fusible que se encontraba entre el transformador y el sistema electrónico y en su lugar se instaló un guardamotor (fig. A4) marca SIEMENS con un rango de 10 a 16 amp. que permite una protección más adecuada al equipo y elimina la necesidad de fusible que no son posibles de obtener en México. El nivel en el que debe permanecer al amperaje es de 15 A.

Las conexiones eléctricas del transformador pueden ser corregidas para obtener un



mayor amperaje de acuerdo al voltaje proporcionado por la línea de suministro de corriente eléctrica como se muestra en el diagrama de la figura A5.

Fig. A5 Instalación eléctrica

B. DESMEDULADOR

Se diseñó y construyó un desmedulador como se describe en la figura A6, que consta de recipiente perforado de lámina calibre 18, y perforaciones de 1/3 de pulgada colocada dentro de un tanque de agitación de acero inoxidable.

El agitador de paletas cuenta con un motor con una potencia de 1/2 h.p., un reductor de velocidad y un variador de voltaje.

A ambos lados del tanque se encuentran soldados dos deflectores de 5.5 cm de ancho por 47 cm de largo, que permiten una mejor agitación del agua.

Al fondo del tanque, una llave de paso permite la eliminación del líquido al término de la agitación. En el recipiente perforado queda atrapada la fibra, mientras que en el fondo del tanque se deposita la médula.

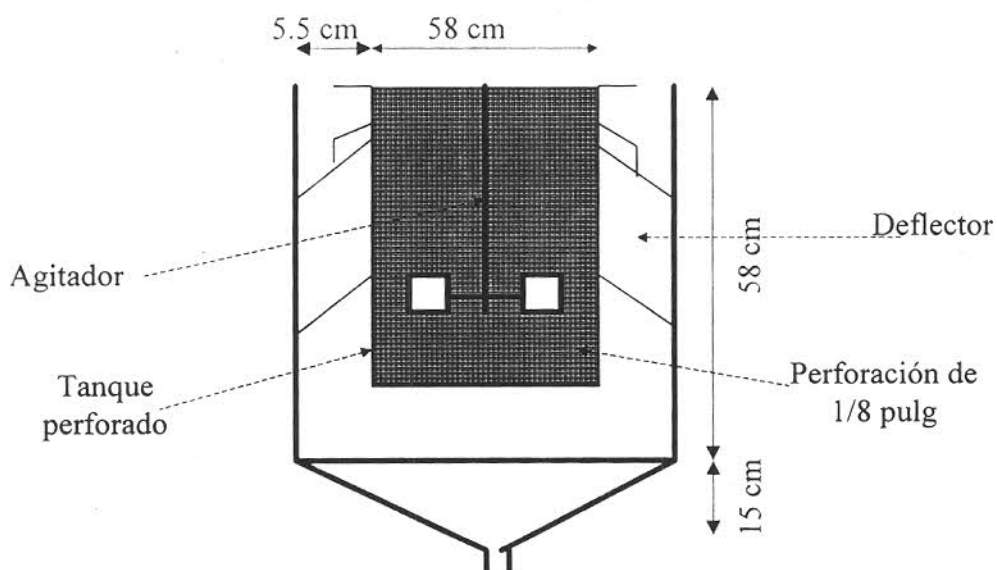


Fig. B1 Diagrama esquemático del desmedulador

C. MANEJO DEL SECADOR

Operación del secador

Antes de hacer cualquier conexión se debe revisar que todos los controles se encuentren apagados. Conectar los cables de suministro de energía del ventilador y resistencias, control PID y regulador de voltaje. En el regulador de voltaje se deben conectar los cables de suministro de energía a la computadora y al equipo de adquisición de datos con el propósito de proteger de posibles variaciones de voltaje a este equipo.

De preferencia, el suministro de energía del ventilador y resistencia original y el regulador de voltaje se debe de tomar del mismo tomacorriente. Mientras que la resistencia auxiliar y el control PID se deben de conectar a un tomacorriente diferente. Lo anterior con el propósito de equilibrar las cargas en las líneas de alimentación de corriente eléctrica.

Una vez conectado el control PID se activará el display digital. Ahora se deberá establecer la temperatura de trabajo.

Con el control de flujo de aire y temperatura se pondrán las condiciones de operación del secador. El flujo de aire deberá medirse a la salida del ducto con un anemómetro. La temperatura que se alcance con el control principal deberá ser menor que la de trabajo con el propósito de permitir que el control PID regule la temperatura con la resistencia auxiliar. Por último se conectará la resistencia auxiliar, que será la que controle la temperatura. Esta resistencia se conectará y apagará automáticamente para mantener la temperatura de trabajo previamente establecida.

Operación del software

En la computadora se encuentra instalado en un subdirectorío el software MAC 1.1. Una vez accesado a este subdirectorío teclear ACQCOMP para ejecutar el paquete. Aparecerán las ventanas de bienvenida que se pasaran con la tecla retorno hasta la ventana MAIN MENU.

Seleccionar el punto 8>SET CLOCK entrando al menú de tiempo y fecha. Seleccionar cualquiera de ellos y poner el tiempo o fecha siguiendo el formato que:

se indica en el ejemplo, aceptar con la tecla retorno, regresará al menú principal. Volver a seleccionar esta opción y colocar fecha u hora según lo que falte y volver a aceptar.

Para hacer la plantilla es necesario que el secador se encuentre estable a las condiciones de operación que se va a trabajar, acceder a la opción 2> del menú principal, seguir las instrucciones conforme van apareciendo. Aquí se colocará el número de sensores que se encuentren instalados, el nombre que se desee dar a cada sensor, el tipo de sensor (K,S,D,G) el cual estará indicado en el empaque o catálogo del sensor, unidades de medida, escala que será indicada en la hoja de calibración que acompaña cada sensor al adquirirse y cero que funciona igual que una tara. El cero podemos ajustarla según las necesidades como se describe a continuación en calibración de sensores. Al terminar con la tecla ESC se regresará al menú principal. Ahora se seleccionará la opción 5> para guardar esta plantilla con un nombre en disco. Cada vez que se haga una corrida puede volverse a llamar con la opción 6> a la plantilla dando el nombre que se le asignó.

Para iniciar a tomar las lecturas se accesa a la opción 1> Star Measuring, la información puede ser guardada en disco o no. Por ejemplo cuando se está calibrando no es necesario guardar en disco.

En esta opción se indicará el número de canales a medir, el intervalo en que se hará cada lectura, el nombre del archivo donde se guardarán los datos y un párrafo de identificación de la corrida.

En caso de que se este calibrando se pueden saltar todos estos puntos con la tecla Enter. Para regresar al menu principal se usa la tecla ESC.

Una vez que se inicia una corrida y se ha dado nombre al archivo donde se guardarán los datos no debe salirse de la opción o se perderá la secuencia de adquisición de datos.

Calibración de los sensores

Antes de empezar la operación de secador por primera vez y por lo menos una vez al mes para los sensores de temperatura y en cada corrida para la celda de carga, se debe realizar la calibración de los sensores.

Para ello se debe de contar un termómetro de mercurio de alta precisión y con un rango de temperatura lo más cercano posible al que se desee trabajar. Además, para calibrar la celda de carga se requiere de un juego de pesas de calibración.

Para calibrar los sensores de temperatura se colocaran todos juntos en una área donde sea posible mantener una temperatura uniforme y estable, pudiendo ser la misma cámara del secador de charolas. En el mismo lugar se colocará el termómetro de mercurio de manera que sea posible la lectura del mismo.

Una vez abierta la plantilla previamente elaborada en la computadora se determinan las diferencias entre los sensores y el termómetro. Ajustar estas diferencias en la plantilla (opción 2>) hasta que las lecturas de los sensores sean iguales a del termómetro de mercurio. Pequeñas diferencias de temperatura de ± 0.01 °C son difíciles de eliminar.

Para calibrar la celda de carga se debe asegurar que las charolas se encuentren bien colocadas en el soporte. El peso total de la charola y el soporte es de aproximadamente 2400 g que se ocupará como tara inicial. Este valor se colocará en el cero de la opción 2> y en el renglón correspondiente a peso. A partir de este peso se harán las modificaciones en la opción 2> hasta obtener cero en el valor correspondiente a peso en la opción 1> y en el renglón correspondiente.

Las lecturas se realizan en la opción 1> Star Measuring y una vez obtenida la tara cero en el renglón peso se colocaran pesas de calibración sobre las charolas y se verificara que el peso se encuentre en un rango aceptable de precisión. El equilibrio es difícil de alcanzar y hay continuas variaciones por lo que hay que esperar hasta 15 minutos para permitir que ya no haya variaciones en la lectura. Variaciones de centésimas de gramo no pueden ser corregidas.

Se recomienda hacer la verificación del peso con las pesas se calibran en el rango aproximado en que se trabajarán las muestras y calibrar en la columna cero de la plantilla (opción 2>) previamente preparada o una nueva que se este elaborando.

Es sumamente importante no rebasar el peso permitido por la celda de carga que es de 5 kg. en total. Hay que considerar el peso del soporte y charolas dentro de este peso por lo que aproximadamente quedan libres 2.5 kg. para muestra.

Si se llega a rebasar el límite permitido por la celda de carga ésta se dañara permanentemente.

D. PUNTOS DE SEGURIDAD EN EL MANEJO DEL SECADOR

Asegurarse que el ventilador se encuentre prendido y proporcionando una corriente de aire suficiente para evitar que las resistencias se pongan al rojo vivo. El flujo de aire deberá ser proporcional a la temperatura de trabajo para evitar que un exceso de temperatura y un bajo flujo de aire ocasione daño permanente a las resistencias. Exceder el peso permitido por la celda de carga, tanto en las charolas como sobre la misma causará daño permanente. Se debe evitar que se apoye cualquier peso o golpes sobre el brazo de la celda de carga.

Conectar directamente el equipo de adquisición de datos o computadora a la línea de corriente eléctrica podría causar sobrecarga a estos equipos ya que la variación de voltaje en el laboratorio es muy frecuente.

Mantener limpio el equipo y cubierto cuando no se este usando. Partículas de polvo en los sensores darán valores alterados.

Todos los sensores son delicados pero el sensor de temperatura para introducir en el material a secar denominado microprobador tipo T para implantes debe tener cuidados especiales ya que un estiramiento puede ocasionar daño permanente.

E. DETERMINACION DE COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE MASA Y CALOR

Para el cálculo de los coeficientes de transferencia de masa y calor se determinaron las propiedades mediante las ecuaciones 1 a 16. Los datos utilizados en los cálculos se describen en la tabla 1 y 2.

Tabla 1 Propiedades de aire y características de la charola.

Propiedades	Símbolo	
Humedad absoluta del aire (kg agua/kg sólido seco)	Y	0.01
Difusividad molecular del agua en aire (m ² /s)	D _{AB}	0.00003573
Longitud de la charola (m)	l	0.27
Espesor de la charola (m)	e	0.014
Presión total (atm)	P	0.802638
Constante de los gases (kg · m ² /s ² · °K · mol)	Rg	8.315
Conductividad térmica del bagazo (kg · m/s ³ · °K)	k _{bag}	0.048

Velocidad de secado:

$$R_c = \frac{P_h \cdot P_s}{\text{área}} \quad (')$$

Tabla 2 Cálculo de velocidad de secado.

Corrida	Pérdida de humedad g agua/g sólido seco	Peso seco g	Area m ²	Rc kg/m ² s
1	0.02967	129.62	0.1944	3.297 · 10 ⁻⁴
2	0.04118	183.35	0.0972	1.295 · 10 ⁻³
3	0.018462	142.29	0.1944	2.252 · 10 ⁻⁴
4	0.0227226	137.27	0.0972	5.36 · 10 ⁻⁴
5	0.03535	90.95	0.0972	5.513 · 10 ⁻⁴
6	0.04466	86.907	0.0972	6.655 · 10 ⁻⁴
7	0.01922	96.25	0.1458	3.172 · 10 ⁻⁴
8	0.02759	89.34	0.0972	4.226 · 10 ⁻⁴
9	0.0385135	146.83	0.1944	4.848 · 10 ⁻⁴
10	0.04987	134.01	0.1944	5.73 · 10 ⁻⁴
11	0.02805	152.33	0.1458	4.884 · 10 ⁻⁴
12	0.032074	94.407	0.1944	2.596 · 10 ⁻⁴

Tabla 2 (cont.) Cálculo de velocidad de secado.

13	0.035097	141.9	0.1944	$4.27 \cdot 10^{-4}$
14	0.04532	142.99	0.1944	$5.556 \cdot 10^{-4}$
15	0.0242667	117.33	0.1458	$3.255 \cdot 10^{-4}$
16	0.032289	124.07	0.1458	$4.579 \cdot 10^{-4}$

Temperatura promedio:

$$T_p = \frac{T_{\text{sólido}} + T_{\text{aire}}}{2} \quad (2)$$

Tabla 3 Cálculo de la temperatura promedio.

Corrida	T. sólido °K	T. aire °K	T.prom °K
1	309.16	363.16	336.16
2	304.16	363.16	334.66
3	300.66	333.16	316.91
4	292.16	333.16	312.66
5	312.16	363.16	337.66
6	311.16	363.16	337.16
7	300.76	333.16	316.96
8	302.16	333.16	317.66
9	311.16	363.16	337.16
10	306.66	363.16	334.91
11	305.16	333.16	321.01
12	307.26	333.16	320.21
13	313.96	363.16	338.56
14	307.66	363.16	335.41
15	303.16	333.16	318.16
16	304.16	333.16	320.56

Propiedades que afecta la temperatura

Calor de vaporización:

$$\Delta H_v = \left[2.792 \cdot 10^6 - 160 \cdot T_p - 3.43 \cdot T_p^2 \right] \frac{\text{joule}}{\text{kg} \cdot \text{K}} \quad (3)$$

Viscosidad del aire:

$$\mu = \left[(-8.133 \cdot 10^{-13} \cdot T^3) + (1.028 \cdot 10^{-9} \cdot T^2) - (3.892 \cdot 10^{-7} \cdot T) + 6.605 \cdot 10^{-5} \right] \frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}} \quad (4)$$

Conductividad térmica del aire:

$$K = \left[7.064 \cdot 10^{-5} \cdot T + 5.218 \cdot 10^{-3} \right] \frac{\text{watt}}{\text{m} \cdot ^\circ\text{K}} \quad (5)$$

Densidad del aire húmedo:

$$\rho = \left[(0.00283 + 0.00456 \cdot Y) T \right]^{-1} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad (6)$$

Capacidad calorífica del aire:

$$c_p = \left[\frac{28.09 + 0.001965 \cdot T + (4.799 \cdot 10^{-6} \cdot T^2) - (1.965 \cdot 10^{-9} \cdot T^3)}{0.029} \right] \frac{\text{joule}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{K}} \quad (7)$$

Tabla 4 Cálculo de las propiedades que afectan la temperatura.

Corrida	Calor de vaporización joule/kg	Viscosidad del aire Pa·s	Conductividad térmica del aire watt/m·°K	Densidad del aire húmedo kg/m ³	Cap. calorífica del aire joule/kg·°K
1	2.351·10 ⁶	2.133·10 ⁻⁵	0.031	0.958	1.012·10 ³
2	2.354·10 ⁶	2.133·10 ⁻⁵	0.031	0.958	1.012·10 ³
3	2.397·10 ⁶	2.041·10 ⁻⁵	0.029	1.044	1.007·10 ³
4	2.407·10 ⁶	2.041·10 ⁻⁵	0.029	1.044	1.007·10 ³
5	2.347·10 ⁶	2.133·10 ⁻⁵	0.031	0.958	1.012·10 ³
6	2.348·10 ⁶	2.133·10 ⁻⁵	0.031	0.958	1.012·10 ³
7	2.397·10 ⁶	2.041·10 ⁻⁵	0.029	1.044	1.007·10 ³
8	2.395·10 ⁶	2.041·10 ⁻⁵	0.029	1.044	1.007·10 ³
9	2.348·10 ⁶	2.133·10 ⁻⁵	0.031	0.958	1.012·10 ³
10	2.354·10 ⁶	2.133·10 ⁻⁵	0.031	0.958	1.012·10 ³
11	2.387·10 ⁶	2.041·10 ⁻⁵	0.029	1.044	1.007·10 ³
12	2.389·10 ⁶	2.041·10 ⁻⁵	0.029	1.044	1.007·10 ³
13	2.345·10 ⁶	2.133·10 ⁻⁵	0.031	0.958	1.012·10 ³
14	2.352·10 ⁶	2.133·10 ⁻⁵	0.031	0.958	1.012·10 ³
15	2.394·10 ⁶	2.041·10 ⁻⁵	0.029	1.044	1.007·10 ³
16	2.388·10 ⁶	2.041·10 ⁻⁵	0.029	1.044	1.007·10 ³

Coefficiente convectivo de transferencia de calor experimental:

$$h = \frac{R_c \cdot \Delta H_v}{T_{aire} - T_{sólido}} \quad (8)$$

Tabla 5 Cálculo del coeficiente convectivo de transferencia de calor experimental.

Corrida	Rc	Calor de vaporización	T.prom	Coefficiente de transferencia de calor
	kg/m ² s	joule/kg	°K	watt/m ² ·°K
1	3.297 · 10 ⁻⁴	2.351 · 10 ⁶	336.16	14.353
2	1.295 · 10 ⁻³	2.354 · 10 ⁶	334.66	51.75
3	2.252 · 10 ⁻⁴	2.397 · 10 ⁶	316.91	16.609
4	5.36 · 10 ⁻⁴	2.407 · 10 ⁶	312.66	31.463
5	5.513 · 10 ⁻⁴	2.347 · 10 ⁶	337.66	25.369
6	6.655 · 10 ⁻⁴	2.348 · 10 ⁶	337.16	30.052
7	3.172 · 10 ⁻⁴	2.397 · 10 ⁶	316.96	23.464
8	4.226 · 10 ⁻⁴	2.395 · 10 ⁶	317.66	32.654
9	4.848 · 10 ⁻⁴	2.348 · 10 ⁶	337.16	21.893
10	5.73 · 10 ⁻⁴	2.354 · 10 ⁶	334.91	23.869
11	4.884 · 10 ⁻⁴	2.387 · 10 ⁶	321.01	41.71
12	2.596 · 10 ⁻⁴	2.389 · 10 ⁶	320.21	23.946
13	4.27 · 10 ⁻⁴	2.345 · 10 ⁶	338.56	20.348
14	5.556 · 10 ⁻⁴	2.352 · 10 ⁶	335.41	23.549
15	3.255 · 10 ⁻⁴	2.394 · 10 ⁶	318.16	25.951
16	4.579 · 10 ⁻⁴	2.388 · 10 ⁶	320.56	37.78

Gasto de aire:

$$G = V \cdot \rho \quad (9)$$

Reynolds:

$$Re = l \frac{G}{\mu} \quad (10)$$

Schmidt:

$$Sc = \frac{\mu}{\rho \cdot D_{AB}} \quad (11)$$

Sherwood:

$$Sh = 0.664 \cdot Re^{0.5} \cdot Sc^{1/3} \quad (12)$$

Tabla 6 Cálculo del gasto de aire y números adimensionales.

Corrida	Viscosidad del aire	Densidad del aire húmedo	Velocidad del aire	Gasto de aire	Números adimensionales		
	Pa · s	kg/m ³	m/s	Kg/m ² · s	Reynolds	Schmidt	Sherwood
1	2.133 · 10 ⁻⁵	0.958	1.3	1.245	1.576 · 10 ⁴	0.624	71.203
2	2.133 · 10 ⁻⁵	0.958	2	1.915	2.424 · 10 ⁴	0.624	88.316
3	2.041 · 10 ⁻⁵	1.044	1.3	1.357	1.795 · 10 ⁴	0.547	72.767
4	2.041 · 10 ⁻⁵	1.044	2	2.088	2.761 · 10 ⁴	0.547	90.256
5	2.133 · 10 ⁻⁵	0.958	1.3	1.245	1.576 · 10 ⁴	0.624	71.203
6	2.133 · 10 ⁻⁵	0.958	2	1.915	2.424 · 10 ⁴	0.624	88.316
7	2.041 · 10 ⁻⁵	1.044	1.3	1.357	1.795 · 10 ⁴	0.547	72.767
8	2.041 · 10 ⁻⁵	1.044	2	2.088	2.761 · 10 ⁴	0.547	90.256
9	2.133 · 10 ⁻⁵	0.958	1.3	1.245	1.576 · 10 ⁴	0.624	71.203
10	2.133 · 10 ⁻⁵	0.958	2	1.915	2.424 · 10 ⁴	0.624	88.316
11	2.041 · 10 ⁻⁵	1.044	1.3	1.357	1.795 · 10 ⁴	0.547	72.767
12	2.041 · 10 ⁻⁵	1.044	2	2.088	2.761 · 10 ⁴	0.547	90.256
13	2.133 · 10 ⁻⁵	0.958	2	2.088	2.761 · 10 ⁴	0.547	71.203
14	2.133 · 10 ⁻⁵	0.958	2	1.915	2.424 · 10 ⁴	0.624	88.316
15	2.041 · 10 ⁻⁵	1.044	1.3	1.357	1.795 · 10 ⁴	0.547	72.767
16	2.041 · 10 ⁻⁵	1.044	2	2.088	2.761 · 10 ⁴	0.547	90.256

Coefficiente de transferencia de masa:

$$k = \frac{Sh \cdot P \cdot D_{AB}}{Rg \cdot T \cdot l} \quad (13)$$

Tabla 7 Cálculo de los coeficientes de transferencia de masa.

Corrida	Sherwood	Temperatura de aire	Coefficiente de transferencia de masa
		°K	mol/m ² ·s
1	71.203	363.16	0.254
2	88.316	363.16	0.315
3	72.767	333.16	0.283
4	90.256	333.16	0.351
5	71.203	363.16	0.254
6	88.316	363.16	0.315
7	72.767	333.16	0.283
8	90.256	333.16	0.351
9	71.203	363.16	0.254
10	88.316	363.16	0.315
11	72.767	333.16	0.283
12	90.256	333.16	0.351
13	71.203	363.16	0.254
14	88.316	363.16	0.315
15	72.767	333.16	0.283
16	90.256	333.16	0.351

Número de Biot:

$$Bi = \frac{h \cdot e}{k_{\text{bag}}} \quad (14)$$

Coefficiente de transferencia de calor utilizando la correlación:

$$h_t = 0.0204 \cdot G^{0.8} \quad (15)$$

Tabla 8 Cálculo del coeficiente de transferencia de calor teórico.

Corrida	Biot	Gasto de aire	Coeficiente de transferencia de calor
		kg/m ² ·s	watt/m ² ·°K
1	4.186	1.245	17.012
2	15.596	1.915	24.012
3	4.844	1.357	18.227
4	9.177	2.088	25.727
5	7.399	1.245	17.012
6	8.765	1.915	24.012
7	6.844	1.357	18.227
8	9.524	2.088	25.727
9	6.385	1.245	17.012
10	6.962	1.915	24.012
11	13.995	1.357	18.227
12	6.984	2.088	25.727
13	5.935	2.088	17.012
14	6.869	1.915	24.012
15	7.575	1.357	18.227
16	12.658	2.088	25.727

Nomenclatura utilizada en éste anexo

- ρ Densidad del aire húmedo (kg/m³)
 μ Viscosidad del aire (kg/m·s)
 ΔH_v Calor de vaporización (J/kg °K)
 C_p Capacidad calorífica del aire (J/kg °K)
 e Espesor de la charola (m)
 G Gasto de aire (kg/m²·s)
 h Coeficiente convectivo de transferencia de calor experimental (watt/m²·°K)
 h_t Coeficiente convectivo de transferencia de calor teórico (watt/m²·°K)
 k Coeficiente de transferencia de masa (mol/m²·s)
 K Conductividad térmica del aire (watt/m °K)
 Ph Pérdida de humedad (g agua/g sólido seco·min)
 Ps Peso seco (g)
 R_c Velocidad de secado
 T Temperatura del aire
 T_p Temperatura promedio (°K)
 T_s Temperatura del sólido
 V Velocidad de aire (m/s)
 Y Humedad absoluta (kg agua/kg sólido seco)