

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la
Producción**

“Implementación de un equipo de secado para alimentos”

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del título de:

INGENIERO DE ALIMENTOS

Presentada por:

Juan Carlos Merino Plaza

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2006

DEDICATORIA

MIS PADRES

MIS HERMANOS

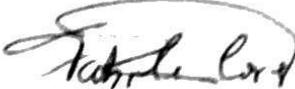
MIS ABUELITAS

A g r a d e c i m i e n t o

A Dios, a la MSc. Fabiola Cornejo Zúñiga, al CICYT, a mis vocales, a mis padres especialmente a mi Madre, a mis hermanos, a mi novia y a todas las personas que han servido de guía y apoyo en la realización de este proyecto.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Eduardo Rivadeneira P.
Decano de la FIMCP
PRESIDENTE



MSc. Fabiola Cornejo Z.
DIRECTOR DE TESIS



M.Ed. Ana Maria Costa V.
VOCAL



Ing. Manuel Helguero G.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)



Juan Carlos Merino Plaza

RESUMEN

En la actualidad se esta estudiando mucho sobre la disminuci3n de la actividad de agua de los alimentos, 3sta tecnolog3a impide el crecimiento microbiano y por lo tanto aumenta el tiempo de vida 3til del alimento. La reducci3n de la actividad de agua puede ser obtenida por medio del secado. El proceso de secado es el m3s sencillo y econ3mico que existe.

El objetivo de esta tesis fue implementar un equipo de secado que permitir3 una mejor comprensi3n de lo que representan diversos procesos de operaciones unitarias durante el proceso de secado.

El prop3sito de la construcci3n del secador de bandejas es potenciar a la ESPOLE y a la carrera de Ingenier3a en Alimentos en la preparaci3n de sus estudiantes. Se pretende desarrollar pr3cticas para las materias en donde se pueda utilizar el secador, como Introducci3n a la Ingenier3a en alimentos, Balance de materia y energ3a, Operaciones Unitarias 1, Operaciones Unitarias 2, Operaciones Unitarias 3 y Deshidrataci3n y Secado de alimentos. Adicionalmente en materias en donde se realizan proyectos que consisten en

crear nuevos productos como Procesamiento de alimentos 1 y 3 que tratan de la manipulación con frutas y hortalizas y de carnes y pescados respectivamente, el secador podría representar una variante para estos estudiantes.

En el primer capítulo de la tesis se detallaran los fundamentos teóricos necesarios para la elaboración de esta tesis en donde se incluyen conceptos y formulas básicas. Con el objetivo de comprender cada uno de los mecanismos que ocurren durante la deshidratación y secado. En el segundo capítulo se mostrara los equipos que se utilizaran para la construcción del secador, la distribución y las características de cada uno de ellos. El tercer capítulo contendrá las prácticas que se desarrollaran en el equipo de secado. Cada una de las prácticas, que se desarrollaran para las materias anteriormente mencionadas, muestran una base teórica, objetivos, procedimiento, cálculos y análisis de resultados; así como preguntas para ser desarrolladas por los estudiantes.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	IV
SIMBOLOGÍA.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VI
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
INDICE DE FOTOS.....	VIII
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1	
1. Fundamentos de deshidratación y secado de alimentos.....	3
1.1 Características químicas, físicas y microbiológicas de los alimentos deshidratados.....	4
1.1.1 Actividad de agua.....	4
1.1.2 Estabilidad de alimentos.....	5

1.1.2.1 Proliferación de microorganismos.....	5
1.1.3 Fenómenos físicos y estructurales.....	6
1.2 Aplicación del proceso de secado.....	6
1.3 Psicometría.....	7
1.3.1 Curva o diagrama psicrométrico.....	7
1.4 El proceso de secado.....	8
1.4.1 Determinación de la velocidad de secado.....	14
1.4.1.1 Periodo de velocidad constante.....	14
1.4.1.2 Periodo de velocidad decreciente.....	19
1.4.1.2.1 Teoría de difusión (Difusión del liquido)..	20
1.4.1.2.2 Movimiento capilar de la humedad	
durante el secado.....	24
1.5 Contenido de humedad critica.....	27
1.6 Comportamiento de los sólidos durante el secado.....	27
1.7 Desarrollo de deshidratación.....	28

1.7.1 Primera Generación.....	28
1.7.1.2 Secador de bandejas.....	29
1.7.2 Segunda generación.....	32
1.7.2.1 Secador de tambor.....	33
1.7.3 Tercera Generación.....	33
1.7.3.1 Liofilización.....	33
1.7.3.2 Deshidratación osmótica.....	34
1.7.4 Cuarta Generación.....	34

CAPITULO 2

2. Construcción del secador de Bandejas.....	35
2.1 Componentes del secador de bandeja.....	37
2.1.1 Estructura externa del secador y sus dimensiones.....	39
2.1.2 Blower.....	39
2.1.3 Instrumentos de medición.....	41
2.1.4 Instrumentos de control.....	44

2.2 Esquema del secador de bandeja.....	48
2.3 Método de operación del secador de bandeja.....	49

CAPITULO 3

3. Practicas de laboratorio en el secador de bandeja.....	51
3.1 Familiarización con un secador de bandeja.....	51
3.1.1 Uso de la carta psicrométrica.....	51
3.2 Balance macroscópico de materia en un proceso de secado.....	56
3.2.1 Influencia del tamaño de la partícula.....	66
3.3 Balance macroscópico de energía en un proceso de secado....	70
3.4 Tipos de fluido de aire y número de Reynolds.....	79
3.5 Determinación de coeficiente de transmisión de calor por convección en un secador de bandeja.....	84

3.5.1 Influencia de la velocidad de aire.....	88
---	----

3.6 Aplicación de la ley de Fick para determinar el coeficiente de difusión en el secado de alimentos.....	93
3.7 Obtención de curva de velocidad de secado en frutas.....	98
3.7.1 Calculo de periodo de velocidad constante.....	99
3.7.2 Calculo del periodo de velocidad decreciente.....	107
3.7.3 Calculo de tiempo de secado.....	112
CAPITULO 4	
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	120
ANEXOS	
BIBLIOGRAFÍA	

ABREVIATURAS

A: área (m^2)

A1: área de la superficie donde tiene lugar el secado

A2: área de la salida del blower

cm: centímetro

Cp: calor específico

Cpa: calor específico del agua

Cps: calor específico del sólido

Cs. Calor específico del aire húmedo

D: diámetro (m)

d: diámetro característico (equivalente)

D_{AB} : difusividad molecular de la mezcla de aire agua

De: diámetro equivalente

Deff: coeficiente de difusión (m^2/h)

Dk: difusividad de Knudsen

Dr: ductos rectangulares

Fa: flujo de aire (Kg. de aire seco/h)

Fs: flujo de sólido (Kg. de sólido seco/h)

Fs: peso de sólidos secos

G: densidad de flujo másico de aire (Kg./m²h)

g: gramos

Gm: caudal másico de aire (Kg./s)

Gv: flujo volumétrico (m³/s)

H. humedad del aire

h: coeficiente de transmisión de calor por convección

h: hora

H1: humedad absoluta inicial

H2: humedad absoluta final

Ha: entalpía del aire (Kj/Kg. de aire seco)

hn: constante (2n-1)

Hr: humedad relativa de aire

Hs: entalpía del sólido

Hsup: humedad superficial

Hw: humedad a la temperatura de bulbo húmedo

k: conductividad térmica del material sólido

Kg: kilogramo

Ky: coeficiente de transferencia de masa

L: longitud del plato en la dirección del flujo

ln: logaritmo natural

m: metro

M: peso molecular del agua

m²: metro cuadrado

Ma: peso molecular del agua

M_B: peso molecular del aire

min: minuto

n: vector de normalidad

N: vector normal de unidades

Na: flujo de vapor de agua

Nm. Velocidad de transferencia de humedad

plg: pulgada

Pr: numero de Prandalt

Q: calor cedido por el aire

Q1: calor que se pierde al medio

Q_L: calor que se pierde al medio ambiente

R: constante de los gases

R: constante universal de los gases

R1: velocidad de secado

Rc: velocidad constante de secado

Re: numero de Reynolds

s: segundo

Sc: numero de Schmidt

T: temperatura absoluta

t: tiempo

Ta: temperatura del aire a la entrada

Tbd: tiempo de secado en el periodo de velocidad decreciente

Tbh: temperatura de bulbo húmedo

Tbs: temperatura de bulbo seco

tc: tiempo de secado constante

td: tiempo de secado decreciente

To: temperatura de referencia

Ts: temperatura de entrada del producto

Tts: tiempo total de secado

V: velocidad (m/s)

Vh: volumen húmedo

Vs: volumen específico

VTE: velocidad total de evaporación

Vts: velocidad total de secado

W: humedad (Kg. de agua/Kg. de aire seco)

Wt: peso total de la muestra

x: dimensión espacial (m)

X: humedad libre

X_1 : concentración inicial

x_1 : espesor

X_2 : concentración final

X_c : humedad crítica

X_{eq} : humedad en equilibrio

X_f : humedad final

X_o : humedad inicial

X_s : humedad de la superficie

X_t : humedad (peso agua/peso sólido seco)

Y : humedad del aire

Y_w : humedad del aire en la superficie del sólido

SIMBOLOGIA

$\%H_2O$: porcentaje de humedad

α : coeficiente de calor latente

β :factor de geometría

λ_0 : Calor latente del agua a la temperatura de referencia (2501.4 Kj/Kg. del agua usando aire y vapor de agua saturado a 0°C como punto de referencia)

λ_w : calor latente del vapor a la temperatura del bulbo húmedo

μ : viscosidad (C-poise)

π : 3.1416

ρ : densidad ($m^3/Kg.$)

Ψ : tortuosidad

ϵ : porosidad

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de una carta psicrométrica.....	7
Figura 2. Cambio de peso durante un proceso de secado.....	8
Figura 3. Contenido de humedad en función del tiempo de secado...	10
Figura 4. Curva de velocidad de secado.....	11
Figura 5. Determinación de la velocidad de secado.....	13
Figura 6. Transferencia de calor y materia durante el secado.....	15
Figura 7. Mecanismo de difusión superficial en el transporte de vapor de agua.....	22
Figura 8. Mecanismo de difusión de knudsen del transporte de vapor de agua.....	23
Figura 9. Esquema general de un secador de bandejas.....	30
Figura 10. Esquema del secador construido.....	49
Figura 11. Principios de entrada y salida en una operación unitaria.....	56
Figura 12. Componentes típicos de un balance de masa.....	57

Figura 13. Disminución del espesor vs. tiempo.....	68
Figura 14. Entradas y salidas de energía en un proceso o en una operación unitaria.....	71
Figura 15. Variación de h vs. V (m/s).....	91
Figura 16. Gráfico experimental para determinar $Deff$ a $65^{\circ}C$	96
Figura 17. Gráfica experimental para obtener $Deff$ a $75^{\circ}C$	96
Figura 18. Curva de velocidad de secado vs. humedad.....	98
Figura 19. Curva de velocidad de secado a $65^{\circ}C$	108
Figura 20. Curva de velocidad de secado a $75^{\circ}C$	109

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Valores obtenidos de la carta psicrometrica.....	55
Tabla 2. Valores de masa inicial y final del producto y del aire a diferentes temperaturas.....	64
Tabla 3. Valores de humedad final a diferentes espesores.....	68
Tabla 4. Valores de entalpía del aire.....	77
Tabla 5. Valores de entalpía del producto.....	77
Tabla 6. Calor que necesita el producto para secar.....	77
Tabla 7. Valores del numero de Reynolds.....	
Tabla 8. Valores del coeficiente de transferencia de calor y densidad del flujo másico.....	87
Tabla 9. Valores de densidad, densidad de flujo másico y coeficientes convectivos de transferencia de calor a diferentes velocidades.....	91
Tabla 10. Valores del coeficiente de difusión en el secado de plátano a 65 y 75 °C.....	97
Tabla 11. Valores de velocidad de secado y de velocidad total de evaporización a una misma área.....	105

Tabla 12.Valores de velocidad de secado en el periodo decreciente	111
Tabla 13.Valores de tiempo total de secado.....	118

ÍNDICE DE FOTOS

	Pág.
Foto 1. Botoneras.....	36
Foto 2. Perillas.....	36
Foto 3. Secador de bandeja	39
Foto 4. Ventilador (Blower).....	40
Foto 5. Balanza.....	42
Foto 6. Termohigrómetro.....	42
Foto 7. Termómetro bimetalico de bolsillo.....	44
Foto 8. Breque.....	45
Foto 9. Botoneras.....	46
Foto 10. Contactor.....	46
Foto 11. Termostato para horno	47
Foto 12. Swich infinito.....	48

INTRODUCCIÓN

La elaboración de guías de prácticas y la construcción de un secador de bandeja es de lo que se tratara en esta tesis. La cual consta de cuatro capítulos, el primero donde se da a conocer los fundamentos teóricos y las bases necesarias para entender las diferentes incógnitas en un proceso de secado.

En el segundo capítulo se incluyen las partes del secador y básicamente cuenta con sistemas generales como un soplante (blower), un generador de calor (resistencias eléctricas), medidores de humedad y temperatura (termo-higrometro), cuarto de secado y una balanza para medir pérdida de peso.

En el tercer capítulo y como objetivo principal de la construcción de este secador es la elaboración de guías de prácticas para las materias de Introducción a la Ingeniería en Alimentos, Balance de materia y Energía, Operaciones Unitarias 1, Operaciones Unitarias 2, Operaciones Unitarias 3 y Deshidratación y Secado de Alimentos que se encuentran el tercer capítulo.

Los materiales para la construcción del secador fueron otorgados por el Centro de Investigación Científica y Tecnológica (CICYT) y la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP).

La construcción del secador se debe a que en la FIMCP no se cuenta con un equipo de secado con aire que permita a los estudiantes analizar los diversos procesos que ocurren en el secado de alimentos y además familiarizarse con el uso del secador, por eso creemos que se ayudara en la formación de los futuros profesionales.

CAPÍTULO 1

1. FUNDAMENTOS DE DESHIDRACION Y SECADO DE ALIMENTOS

El proceso de secado consiste en la remoción de un líquido de un material por la aplicación de calor, llevándose a cabo por evaporación y no por procesos mecánicos. Este proceso se logra por la transferencia del líquido a un gas no saturado como aire. El objetivo del proceso de secado es detener o disminuir el crecimiento de microorganismo así como las reacciones químicas. En alimentos se suele hablar de deshidratación⁽¹³⁾.

Deshidratación y secado no es lo mismo; según el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos define productos deshidratados como aquellos que han sido expuestos a la remoción de agua y que poseen mas del 2.5 % de agua (base seca). Productos secos son aquellos con no mas del 2.5 % de agua (base seca)⁽¹³⁾.

1.1 Características químicas, físicas y microbiológicas de los alimentos deshidratados.

La deshidratación o secado de alimentos no solo afecta el contenido de agua de alimentos también altera otras propiedades físicas, químicas y microbiológicas como actividad enzimática, crecimiento microbiano, dureza, viscosidad, sabor, palatabilidad ⁽³⁾.

1.1.1 Actividad de agua

La actividad de agua es un parámetro que durante años se ha relacionado con la estabilidad de los alimentos. En términos simples la actividad de agua (A_w) es la medida de la presión relativa de las moléculas de agua en el espacio de cabeza por encima del alimento el cual está en un recipiente, comparado con la presión que

ejerce el agua pura a la misma temperatura

(2).

Se puede mencionar que Aw es un parámetro empírico que correlaciona el crecimiento microbiano y las reacciones químicas ⁽²⁾. A pesar de que se ha demostrado que no es un factor determinante continúa siendo una ayuda debido a que los costos del instrumento son bajos y sus mediciones son fáciles. La FDA así como otras agencias utilizan la Aw como uno de los factores de seguridad en los sistemas alimenticios. Así como el pH indica el grado de acidez la Aw indica el grado de disponibilidad de agua ⁽³⁾.

1.1.2 Estabilidad de alimentos:

Como se observa en las curvas de estabilidad de la proliferación de microorganismos, las reacciones químicas están relacionadas con la Aw. Los aspectos de estabilidad que se pueden relacionar a la Aw y contenido de humedad son cambios microbianos, reacciones enzimáticas y no enzimáticas, cambios estructurales y físicos, destrucción de nutrientes, aroma y sabor ⁽³⁾.

1.1.2.1 Proliferación de microorganismos

Las células vivas son sensibles al contenido de humedad en su medio ambiente. La habilidad de los microorganismos para crecer y producir toxinas se relaciona con la

actividad de agua del medio. La A_w mínima para la producción de toxinas es por lo general mayor que para el crecimiento microbiano ⁽³⁾.

1.1.3 Fenómenos físicos y estructurales

Cambios geométricos y estructurales en los alimentos durante el secado afecta las propiedades de transferencia de masa y la calidad del producto. Los defectos más comunes en productos deshidratados son dureza, textura como madera, rehidratación lenta e incompleta, pérdida de jugosidad (típica de alimentos frescos) y cristalización de polisacáridos como almidones. El encogimiento es uno de los cambios más comunes de la deshidratación y ocurre durante las primeras etapas del secado ⁽³⁾.

1.2 Aplicaciones del proceso de secado

En alimentos el secado es reducir el volumen y peso de los materiales obteniendo de esta manera la disminución del costo en el transporte y almacenamiento. Adicionalmente ayuda a la conservación y estabilidad de productos animales y vegetales para disminuir el crecimiento de hongos y bacterias. En definitiva, el secado permite obtener un producto más estable, especialmente en alimentos ⁽⁴⁾.

1.3 Psicometría

Psicometría es el estudio del comportamiento de las mezclas agua-aire. La tabla psicrométrica se basa en graficar la humedad del aire en función de la temperatura. La tabla psicrométrica involucra la ganancia o pérdida de humedad en aire. ⁽¹³⁾

1.3.1 Curva o diagrama psicrométrico

Es un diagrama de humedad que muestra las características de humedad del aire. Estas curvas son representaciones gráficas de la relación entre temperatura y humedad del vapor de agua en el aire en un sistema a presión constante. Las temperaturas y volúmenes específicos se muestran en el eje

horizontal, y en el vertical la humedad absoluta y la presión de vapor ⁽¹³⁾.

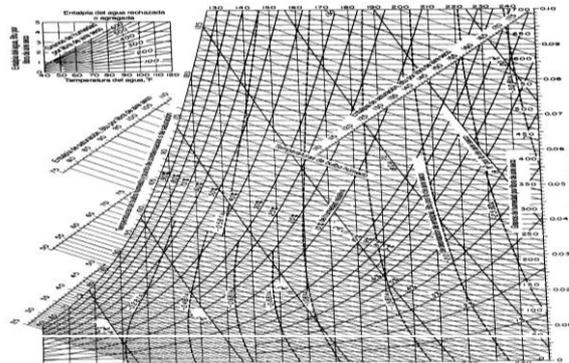


Figura 1.Esquema de una carta psicrométrica ⁽³⁾

1.4 El proceso de secado

En los procesos de secado, los datos suelen expresarse como la variación que experimenta el peso del producto que se esta secando con el tiempo observar la figura 2. Aunque a veces, los datos de secado pueden expresarse en términos de velocidad de secado ⁽³⁾.

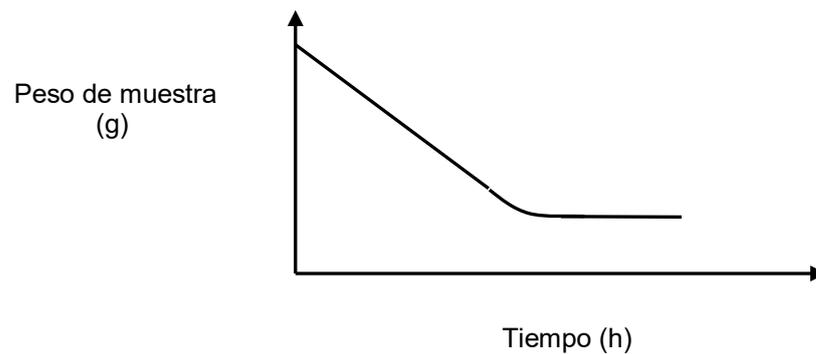


Figura 2. Cambio de peso durante un proceso de secado. ⁽³⁾

El contenido en humedad del producto se define como la relación entre la cantidad de agua en el alimento y la cantidad de sólidos secos y se expresa como:

$$(1)^{(4)} \quad X_t = (W_t - F_s) / F_s$$

En la que W_t es el peso total de material en un tiempo determinado, siendo F_s el peso de los sólidos secos, y X_t es la humedad expresada como peso de agua/peso de sólido seco. En los procesos de secado una variable muy importante es la denominada contenido de humedad libre, X . El contenido de humedad libre se puede evaluar si se considera el contenido de humedad de equilibrio:

$$(2)^{(4)} \quad X = X_t - X_{eq}$$

En la que X_{eq} es el contenido de humedad cuando se alcanza el equilibrio. Una típica curva de secado se obtiene al representar este

contenido de humedad libre X frente al tiempo de secado t observar la figura 3.

La velocidad de secado R_s es proporcional al cambio del contenido de humedad en función del tiempo (t):

$$(3) \quad R_s \propto dX/dt$$

Considerando la curva presentada en la figura 3, los valores individuales de dX/dt en función del tiempo, se pueden obtener a partir de la tangente trazada en la curva de X frente a t . Sustituyendo la condición de proporcionalidad en la ecuación 3 por F_s/A , la velocidad de secado se puede expresar como:

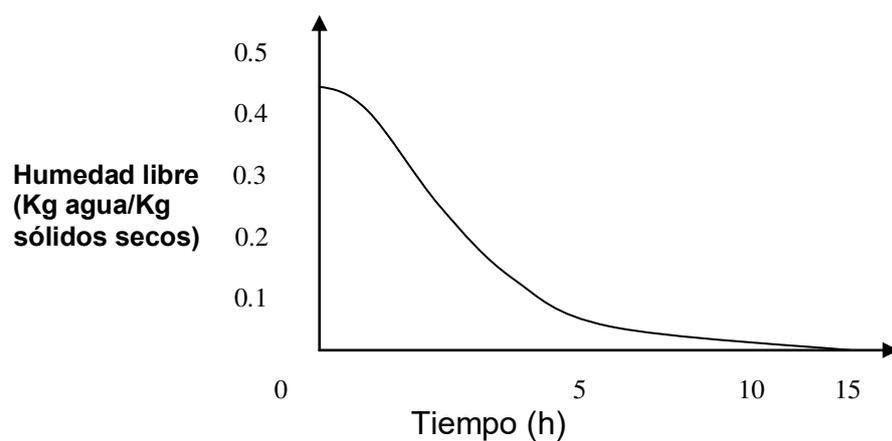


Figura 3. Contenido de humedad en función del tiempo de secado.

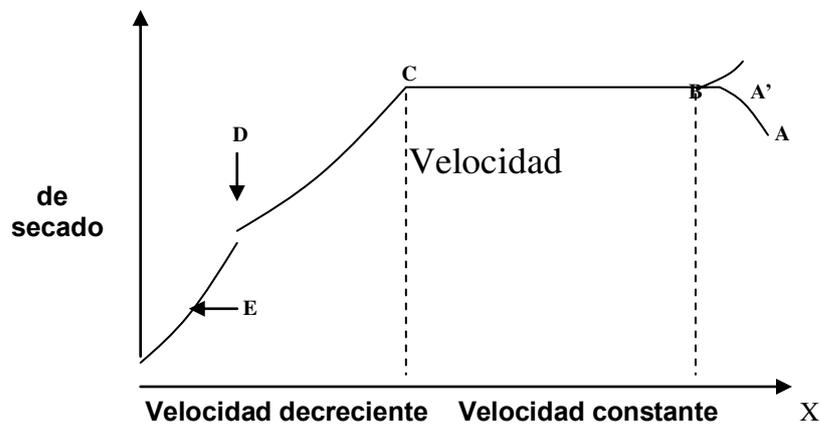
(3)

$$(4)^{(4)} \quad R_s = - (F_s/A_1) (dX/dt)$$

Donde R es la velocidad de secado y A1 es el área de la superficie donde tiene lugar el secado. Al representar R_s frente a t se obtiene una curva similar a la que se muestra en la figura 3.

El proceso de secado de un material puede describirse por una serie de etapas en las que la velocidad de secado juega un papel determinante. La figura 4 muestra una típica curva de velocidad de secado, en la que los puntos A y A' representan el inicio de secado para un material frío y caliente. El punto B

representa la condición de temperatura de equilibrio de la superficie del producto. El tiempo transcurrido para pasar de A o A' a B suele ser bajo y a menudo se desprecia en los cálculos de tiempo de secado. ⁽³⁾



Humedad libre X (kg agua/kg sólidos secos)

Figura 4. Curva de velocidad de secado. ⁽²⁾

El tramo de la curva B-C es conocido como periodo de velocidad constante de secado y está asociado a la eliminación del agua no ligada del producto, en el que el agua

se comporta como si el sólido no estuviera presente. Al inicio la superficie del producto se encuentra muy húmeda, presentando una actividad de agua cercana a la unidad. ⁽³⁾

En los sólidos porosos el agua eliminada en la superficie es compensada por el flujo de agua desde el interior del sólido. El periodo de velocidad constante continúa mientras que el agua evaporada en la superficie puede ser compensada por la que se encuentra en el interior. La temperatura en la superficie se corresponde aproximadamente a la del bulbo húmedo. En general, la velocidad de secado se determina por condiciones externas de temperatura, humedad y velocidad de aire. ⁽³⁾

El periodo de velocidad decreciente se da cuando la velocidad de secado ya no se mantiene constante y empieza a disminuir, además, la actividad de agua en la superficie se hace menor que la unidad. En este caso, la velocidad de secado esta gobernada por el flujo interno del agua y vapor. El punto C de la figura 4 representa el inicio del periodo de velocidad decreciente. En este punto no hay suficiente agua en la superficie para mantener el valor uno de actividad de agua. El periodo de velocidad decreciente se puede dividir en dos etapas. La primera de ellas se da cuando los puntos húmedos en la superficie disminuyen continuamente hasta que la superficie esta seca completamente (punto D), mientras que la segunda etapa del periodo de velocidad de

secado decreciente se inicia en el punto D, cuando la superficie esta completamente seca, y el plano de evaporación se traslada al interior del sólido. El calor requerido para eliminar la humedad es trasferido a través del sólido en la corriente de aire que va hacia la superficie. A veces no existen diferencias remarcables entre el primer y segundo periodo de velocidad decreciente. ⁽³⁾

La cantidad de agua eliminada en este periodo puede ser baja, mientras que el tiempo requerido puede ser elevado, ya que la velocidad de secado es baja. La determinación experimental de la velocidad de secado se basa en un principio simple: medida del cambio del contenido de humedad durante el secado. El material que se desea secar se introduce en una bandeja y es expuesto a una corriente de aire. La bandeja se suspende de una balanza colocada en un armario o conducto por el que fluye aire. El peso del material se va anotando en función del tiempo de secado. La figura 5 muestra

un esquema típico utilizado en la determinación de velocidad de secado ⁽³⁾.

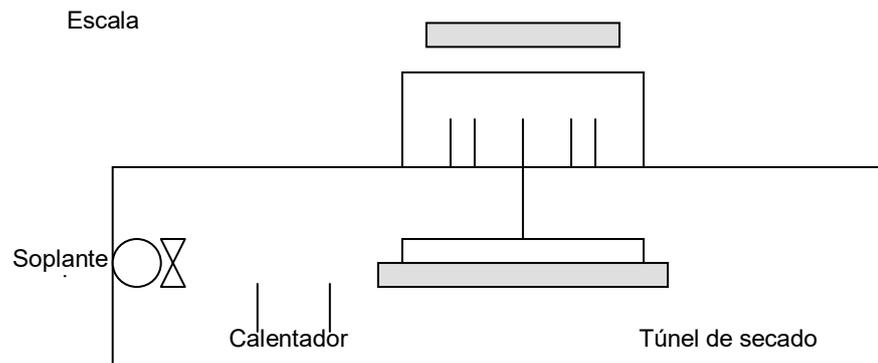


Figura 5. Determinación de la velocidad de secado ⁽³⁾

1.4.1 Determinación de la velocidad de secado

1.4.1.1 Periodo de velocidad constante

Durante el periodo de secado de velocidad constante, los fenómenos de transporte que tienen lugar son la transferencia de materia de vapor de agua hacia el medio ambiente desde la superficie del producto a través de una película de aire que rodea el material y la transferencia

de calor a través del sólido.

**Mientras dura el proceso de secado
la superficie del material permanece**

saturada de agua, ya que la

velocidad de movimiento de agua

desde el interior del sólido es

suficiente para compensar el agua

evaporada en la superficie.

Si se supone que solo existe

transferencia de calor hacia la

superficie del sólido por conveccion

desde el aire caliente y

transferencia de materia desde la

superficie hacia el aire caliente

observar la figura 5, los balances de

materia y calor se pueden expresar

como:

$$(5)^{(4)} \quad N_a = K_y (Y_w - Y)$$

$$(6)^{(4)} \quad Q = h A_1 (T_{bs} - T_{bh})$$

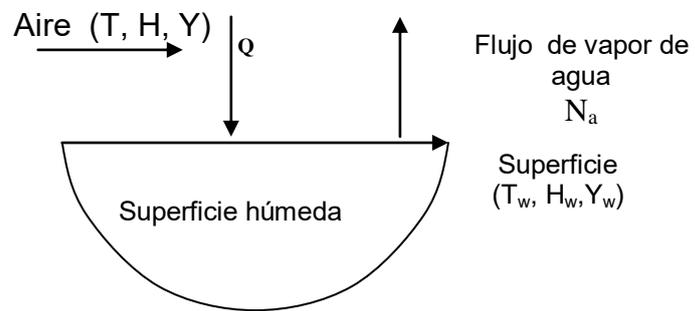


Figura 6. Transferencia de calor y materia durante el secado ⁽³⁾

h = coeficiente de transferencia de calor ($W/m^2 \text{ } ^\circ K$)

A_1 = área de secado (m^2)

T_{bh} = temperatura de bulbo húmedo ($^\circ C$)

T_{bs} = temperatura de bulbo seco ($^\circ C$)

N_a = flujo de vapor de agua ($mol \text{ Kg} / sm^2$)

Y_w = humedad del aire en la superficie del sólido (Kg agua/ Kg aire seco)

Y = humedad del aire (Kg agua/ Kg aire seco)

K_y = coeficiente de transferencia de masa
(adimensional)

La cantidad de calor necesaria para evaporar el agua en la superficie es:

$$(7)^{(4)} \quad Q = N_a M_a \lambda_w A$$

M_a = peso molecular del agua

λ_w = calor latente de vapor a la temperatura de bulbo húmedo (T_{bh}) (J/Kg)

Por lo tanto la velocidad de secado con esas ecuaciones

$$(8)^{(4)} \quad R_c = K_y M_B (H_w - H) \quad \text{ó} \quad \longrightarrow \quad \begin{array}{l} \text{Transferencia de} \\ \text{masa} \end{array}$$

$$(9)^{(4)} \quad R_c = \frac{h (T - T_w)}{\lambda_w} = \frac{q}{\lambda_w A} \quad \longrightarrow \quad \begin{array}{l} \text{Transferencia de} \\ \text{calor} \end{array}$$

M_B = peso molecular del aire

H_w = humedad a la temperatura de bulbo húmedo

H = humedad del aire

Por lo tanto en ausencia de transferencia de calor por conducción, radiación, la temperatura del sólido esta a la temperatura del bulbo húmedo del aire durante el periodo de secado de velocidad constante. Por lo tanto es posible usar la ecuación de transferencia. Aunque más confiable es usar el de transferencia de calor por que cualquier diferencia de temperatura en el bulbo húmedo se puede determinar:

$$(10)^{(4)} \quad R_s = \frac{\text{Kg. H}_2\text{O}}{\text{hm}^2} = \frac{h (T - T_w) \text{ } ^\circ\text{C} (3600)}{\lambda_w}$$

Coficiente de transferencia de masa (K_y) puede ser obtenido de la siguiente correlación.

$$(11)^{(4)} \quad \frac{K_y L}{D_{AB}} = 0.664 R_e^{0.5} S_c^{0.332}$$

μ $d v \rho$

$$(12)^{(4)} \quad Sc = \frac{\rho D_{AB}}{\mu} \quad (13)^{(4)} \quad Re = \frac{\rho v d}{\mu}$$

L = longitud del plato en la dirección del flujo (m)

D_{AB} = difusividad molecular de la mezcla de aire – agua (adimensional)

d = diámetro característico (equivalente) (m)

v = velocidad del flujo (m³/s)

S_c = numero de Schmidt (adimensional)

Coeficiente de transferencia de calor se puede expresarse como:

$$(14)^{(2)} \quad h = 0.0204 G^{0.8} \quad (\text{SI})$$

La temperatura del aire es de 45 – 150 °C

La velocidad de la masa es de 2450 – 29300 Kg/h m²

La velocidad es de 0.65 – 7.6 m/s

$$(15)^{(4)} \quad Nu = \frac{h \cdot d}{K} = 2 + \alpha Re^{0.5} Pr^{0.33}$$

$$C_p \mu$$

$$(16)^{(4)} \quad P_r = \frac{\alpha}{K}$$

G = Densidad de flujo másico de aire Kg/h m²

h = Coeficiente de transferencia de calor (W/m² °K)

K = conductividad térmica (W/m² °K)

α = constante ()

P_r = numero de Prandalt (adimensional)

C_p = calor específico (KJ/Kg °K)

v = velocidad del aire (m/s)

Masa de aire seco + masa de humedad

$$(17)^{(4)} \quad \rho_{\text{aire}} = \frac{\text{Masa de aire seco + masa de humedad}}{\text{Volumen húmedo (Vh)}}$$

$$(18)^{(4)} \quad Vh = (2.83 \times 10^{-3} + 4.56 \times 10^{-3} (H)) T$$

1.4.1.2 Periodo de velocidad decreciente

La velocidad de secado R decrece cuando el contenido de humedad sobrepasa el contenido de humedad crítico Xc. El movimiento del agua

dentro del sólido puede ser explicado por diferentes mecanismos: difusión del líquido debido a los gradientes de concentración, difusión del vapor debido a las presiones parciales, movimiento del líquido debido a fuerzas capilares, movimiento del líquido debido a la gravedad y difusión superficial. ⁽³⁾

El movimiento de la humedad a través del alimento depende de la estructura del poro y la interacción de la humedad con la matriz alimenticia ⁽³⁾.

1.4.1.2.1 Teoría de difusión (Difusión del líquido)

Esta teoría se deriva de los gradientes de concentración entre el interior del sólido en

**donde la concentración es alta
y la superficie donde la
concentración es baja. Estos
gradientes se fijan durante el
secado de la superficie. La
velocidad de la difusividad del
líquido decrece con rapidez al
decrecer el contenido de
humedad. La difusión toma
lugar dentro la estructura fina
del sólido y dentro de los
capilares, poros y pequeños
huecos llenos de vapor.
Desafortunadamente la teoría
de difusión no toma en
consideración el
encogimiento, el**

**endurecimiento o las
isotermas de adsorción. El
cálculo de velocidad de
secado se encontrara con la
ley de Fick. ⁽³⁾**

$$(19)^{(4)} \quad \frac{\partial X}{\partial t} = \text{Def} \quad \frac{\partial^2 X}{\partial x^2}$$

X = humedad libre (Kg agua/Kg sólido seco)

t = tiempo (h)

x = dimensión espacial (m)

Deff = coeficiente de difusión (m²/h)

La ley de Fick puede ser aplicada para diferentes geometrías dentro de las cuales pueden ser esfera, rectángulo y cilíndrica.

(3)

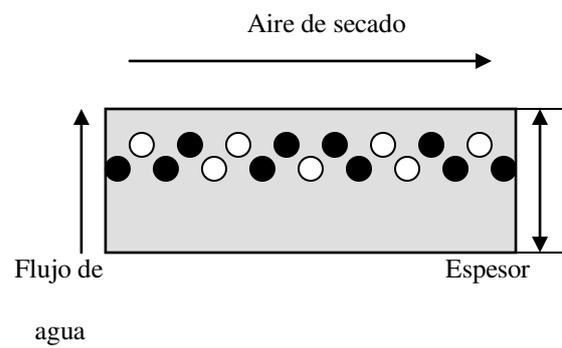


Figura 7. Mecanismo de difusión superficial en el transporte de vapor de agua⁽³⁾

El coeficiente de difusión D_{eff} es determinado mediante la graficación experimental en términos de

$$(20)^{(4)} \quad \ln \frac{X - X_s}{X_o - X_s} \quad \text{vs.} \quad t$$

La pendiente del segmento lineal nos da el D_{eff} . Dos posibles situaciones pueden ocurrir dentro del producto dentro del producto durante el secado. Son el movimiento del líquido y movimiento del vapor a la superficie del producto. El movimiento del líquido esta en función del gradiente de concentración del producto. El agua líquida alcanza la superficie y es evaporada. El vapor de agua dentro del producto puede entenderse en términos de difusión de Knudsen. ⁽³⁾

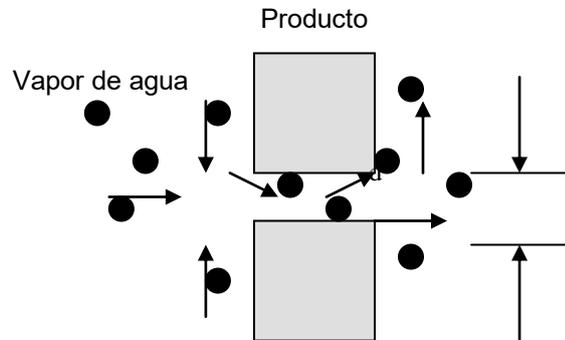


Figura 8. Mecanismo de difusión de Knudsen del transporte de vapor de agua ⁽³⁾

El movimiento del vapor es una función de la densidad del vapor y la difusividad del vapor dentro del producto. Mientras que el flujo de vapor se ve afectado por el tamaño de los poros, tortuosidad y la geometría ⁽³⁾.

(21) ⁽⁴⁾

$$\frac{dx}{dt} = -\epsilon \psi \beta \rho D_k \quad (22) \quad D_k = \frac{2d}{3} \frac{2RT}{\pi M}$$

ϵ = porosidad

ψ = tortuosidad

β = factor de geometría

ρ = densidad del vapor

D_k = difusividad de Knudsen

R = constante universal de los gases

T = temperatura absoluta (°K)

M = peso molecular del agua

d = diámetro del poro (m)

1.4.1.2.2 Movimiento capilar de la humedad durante el secado

La teoría capilar se relaciona con el movimiento del líquido a través de los poros. A medida que se evapora el agua, las fuerzas capilares se ponen en acción debido a la tensión interfacial entre el agua y el medio calefactor. Estas fuerzas proporcionales el impulso para desplazar el

**agua a través de los poros
hasta la superficie de secado.**

**El flujo capilar ha sido
aceptado como un mecanismo
clave durante el secado. ⁽³⁾**

Se llama tiempo de secado cuando el flujo capilar controla el periodo de velocidad decreciente ⁽³⁾.

$$(23)^{(4)} \quad t = \frac{X_1 \rho_s X_c}{R_c} \ln \frac{X_c}{X}$$

ρ_s = densidad del sólido en kilogramos
(Kg./m³)

X_c = humedad crítica (Kg. de agua/Kg.
sólido seco)

X_1 = espesor (m)

X = humedad promedio al tiempo (t)

X_s = humedad en la superficie (Kg. de
agua/Kg. sólido seco)

Como se enseña en la ecuación 9

$$(24)^{(4)} \quad t = \frac{X_1 \rho_s X_c}{h (T_{bs} - T_{bh})} \ln \frac{X_c}{X}$$

Por lo tanto el tiempo de secado entre límites fijos de humedad varía directamente con el espesor y depende de la velocidad, la temperatura y la humedad del gas⁽³⁾

Concluyendo las ecuaciones que definen el tiempo de secado para el periodo de velocidad constante y decreciente son:

(25)⁽⁴⁾

$$tc = \frac{z \rho_s \lambda_w (X_1 - X_c)}{GC_s (T_1 - T_w) (1 - \exp(-haz / GC_s))}$$

(26)⁽⁴⁾

$$Td = \frac{z \rho_s \lambda_w X_c \ln(X_1 / X_c)}{GC_s (T_1 - T_w) (1 - \exp(-haz / GC_s))}$$

Donde :

a : factor de forma y superficie especifica,

m²/ m³

z: espesor

1.5 Contenido de humedad crítica:

Este es un parámetro importante, pues divide las dos zonas o etapas principales del mecanismo de secado. Los datos disponibles indican que el contenido crítico medio de la humedad para un tipo de sólido dado depende

de la concentración final de la humedad. Si es muy rápido el secado durante el periodo de régimen constante y si además, el sólido es grueso, se desarrollan dentro de este gradiente excesivo, comenzando el periodo de caída del régimen con altos contenidos medios de humedad.

Generalmente, el contenido crítico de humedad aumentara al elevarse la velocidad de secado (con regímenes altos de secado) y con mayor espesor de sólido. También este proceso depende del mecanismo de movimiento de la humedad ⁽³⁾.

1.6 Comportamiento de los sólidos durante el secado

El secado de un material se puede verificar haciendo uso de gráficos de perfiles de secado versus tiempo de secado hallado experimentalmente. La velocidad del secado de una muestra se puede determinar haciendo uso de las siguientes metodologías:

1. Por medio de una curva de contenido de humedad y tiempo de secado.

2. Haciendo una curva de Velocidad (sacada por la diferencia del contenido de humedad de dos medidas dividido por el periodo de tiempo entre éstas) versus contenido de humedad ⁽¹³⁾.

1.7 Desarrollo de deshidratación

El Desarrollo de la deshidratación ha sido dividida en cuatro grupos o generaciones.

1.7.1 Primera Generación

**Los secadores de cabina y cama (túnel).
Estos secadores involucran el aire caliente
sobre una gran área de producto para ser
removidos de la superficie. Generalmente
los secadores de esta generación son
útiles para materiales sólidos como
granos, frutas picadas y vegetales, o
productos triturados.**

Estos secadores están constituidos por un alimentador, un calentador, un colector (separador de producto y aire), y el

arreglo de estos componentes es característico de cada tipo de secador.

1.7.1.2 Secador de bandejas

Son los más antiguos y aún los más utilizados. Este equipo consiste esencialmente en una cámara o cabina aislada térmicamente y conteniendo aire que se circula internamente por medio de un ventilador; esta dotado también de un calefactor (intercambiador de calor), por el que pasa el aire y después, a través de unas ventanas ajustables, se dirige el mismo horizontalmente entre las bandejas con el producto o verticalmente a través de las bandejas y la capa del

producto. Un esquema de una de las formas de este tipo de secador se muestra en la figura 9. La recirculación requerida del aire y la entrada de aire fresco al secador se controla o regula por medio de compuertas y placas ajustables. Los calentadores de aire pueden trabajar directamente con gases de combustión de hornos, por vapor vivo (a presión), en forma de radiadores o con resistencias eléctricas en los modelos mas pequeños.⁽¹³⁾

Las ventajas del secado en bandejas son que cada lote del material se seca separadamente, se pueden tratar lotes de tamaños desde 10 hasta 250 kg, para el secado de materiales no necesita de aditamentos

especiales. Estos equipos tienen dos variaciones, una de secado directo en el cual el aire caliente es forzado a circular por las bandejas. La otra de secado indirecto, donde se utiliza el aire caliente proveniente de una fuente de calor radiante dentro de la cámara de secado y una fuente de vacío o un gas circulante para que elimine la humedad del secador. Véase la figura 8. ⁽¹³⁾

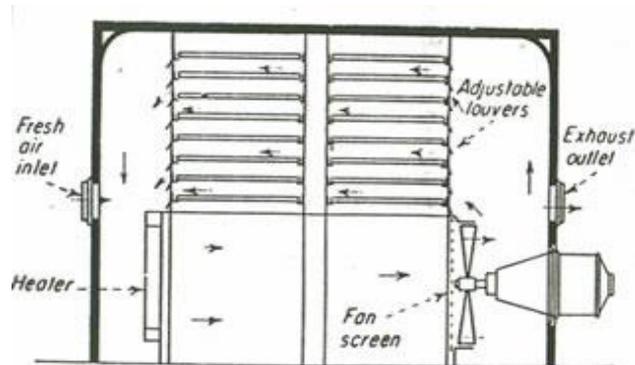


Figura 9. Esquema general de un secador de bandejas ⁽¹³⁾

Las bandejas pueden ser de fondo liso o enrejado. En estas últimas, el material se debe colocar sobre un papel, tela o fibra sintética especial donde la circulación del aire caliente fluye sobre el material desde arriba hasta abajo. El material de soporte debe facilitar la limpieza y prevenir la

contaminación del producto. En el secador la temperatura y el flujo deben ser muy uniformes. En general la velocidad de flujo recomendada para 100 kg del material es de 200 pies/min. Los granulados obtenidos en este secador son más densos, duros e irregulares que los obtenidos en por lecho fluidizado, ya que éstos tienden a ser más porosos, menos densos y más esféricos. ⁽¹³⁾

La desventaja de estos equipos es que algunos colorantes y ciertos fármacos solubles en agua tienden a migrar desde el centro del gránulo

hasta la superficie durante el secado.

(13)

La fuente energética de estos secadores puede ser vapor, electricidad, o hidrocarburos como carbón, petróleo, aceite y gas. Estos dos últimos calientan mucho más y son de bajo costo de funcionamiento, pero tienen el inconveniente de contaminar el producto y producir explosiones. Los secadores que funcionan con vapor son más baratos que los eléctricos y se aconsejan para equipos grandes.

1.7.2 Segunda Generación

Están dirigidos a la deshidratación de productos líquidos y purés. Entre estos se encuentran los secadores de spray y los secadores de tambor los cuales sirven para obtener polvo y flakes. El secador de spray involucra la formación de la partícula y

secado (contacto con el aire) de manera similar que el secador de lecho fluidizado, secado flash, granulación en spray, aglomeración de spray, el secado por atomización es un proceso en el cual la partícula esta en suspensión.

La mayor diferencia entre secado en spray, lecho fluidizado y secado flash son las características de alimentación; en cuanto al tiempo de residencia el secado por atomización tarda entre 5 y 100 segundos mientras que el de lecho fluidizado lo hace entre 1 y 300 minutos. El tamaño de partícula que manipula el de atomización esta entre 10 y 500 μm y el lecho fluidizado oscila entre 10 y 3000 μm .

1.7.2.1 Secador de tambor

Utiliza transferencia de calor por conducción a través de la superficie del sólido. Generalmente se usa para

producir polvo y flakes. Los productos obtenidos por lo general se usan en panificación, jugos, cereales, granola y lácteos. Estos secadores consisten en cilindros metálicos que rotan en sus ejes horizontales y son calentados internamente con vapor, agua caliente, etc. Pueden clasificarse de: tambor simple y tambor doble. Las ventajas son: mayor velocidad de secado y uso económico de energía.

1.7.3 Tercera Generación

1.7.3.1 Liofilización

La liofilización fue desarrollada en los años cuarenta. Disminuye los

**daños estructurales y minimiza las
perdidas de aroma y flavor. La
liofilización consiste en dos pasos:**

- 1. El producto es congelado**
- 2. El producto es secado por
sublimación del hielo a baja
presión. Existen tres variables
que se deben considerar:**
 - a. Vacío dentro del recipiente**
 - b. Energía radiante aplicada al
alimento y**
 - c. Temperatura del condensador**

1.7.3.2 Deshidratación osmótica

**Concentración del producto
mediante la inmersión en una
solución hipertónica.**

1.7.4 Cuarta Generación

En la actualidad aun son estudiados e involucran mayor vacío, fluidización, uso de microondas, RF (ahorran energía por eso se estudian mucho) y el concepto de tecnología de barreras.

CAPÍTULO 2

2. CONSTRUCCIÓN DEL SECADOR DE BANDEJA

Los secaderos de bandeja son secaderos de pequeña escala usados en laboratorios y plantas piloto para experimentar sobre secado de diversos materiales⁽³⁾.

Las condiciones experimentales pueden ser variadas para permitir la demostración de los aspectos teóricos y prácticos de la operación de secado a escala industrial. El aire es introducido a la cámara con un ventilador de flujo axial, situado en uno de los extremos del túnel. La velocidad del aire a través del secadero es ajustada regulando la velocidad del ventilador. Un banco de resistencias eléctricas se encuentra situado corriente arriba del compartimiento de secado permitiendo elevar la temperatura del aire variando la potencia de las mismas. El compartimiento de secado tiene aproximadamente 0.105 m³ de capacidad y es equipado con una puerta de acceso de vidrio. Una bandeja, con una capacidad de almacenamiento de sólido de 4 kg aproximadamente, se encuentra ubicada dentro de la cámara.⁽⁹⁾

El túnel, corriente arriba y corriente abajo del compartimiento de secado, ha sido diseñado para producir un flujo de aire uniforme sobre las bandejas.

En la parte superior del secador se ha acoplado una balanza gramera ha la que se le ha alargado el plato en donde se ubica la muestra, de tal forma que este se encuentre dentro de la campana de secado.

Se cuenta con un interruptor general que es quien activa el paso de corriente al equipo, un panel de control en donde se encuentran ubicados los interruptores para encendido del blower y un selector para variar la velocidad; adicionalmente un selector para variar la potencia de las resistencias las que están directamente relacionadas con la variación de la temperatura. ⁽⁹⁾



Foto 1. Botoneras



Foto 2. Perillas

2.1 Componentes del secador de bandeja

Los componentes utilizados según su uso:

Parte eléctrica:

- Aislante de porcelana
- Resistencias de 1000 wats en espiral de niquelina sin forro 220 voltios

Accesorios eléctricos:

- Cable concéntrico 3*6
- Cable numero 10
- Cable numero 12
- Enchufe bifásico 35 – 50 Amperios (tipo pata de gallina)
- Acrílico

Estructura Metálica y accesorios:

- Plancha galvanizada
- Plancha de acero inoxidable brillante
- Lana de vidrio
- Malla de acero inoxidable
- Eje de acero inoxidable
- Vidrio para puertas del horno
- Tubin de acero inoxidable
- Soldadura de acero inoxidable
- Soldadura

Suministro de aire:

- Blower de ¼ de hp

Instrumentos de medición

- Balanza
- Termo higrómetro
- Termómetro bimetalico de bolsillo

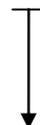
Instrumentos de control

- Breque doble 40 AMP
- Botonera ON/OFF
- Contactor de 50 AMP 220 Voltios
- Termostato para horno de rango 50 – 300 °C
- Swich infinito

Auxiliares para construcción

- Tornillos de acero inoxidable de 1 y 1/3 de pulgada de largo.
- Anillos planos y de presión de acero inoxidable
- Pernos de acero inoxidable
- Visagras para puerta de acero inoxidable
- Seguro de puerta que no conduce calor
- Caucho para cocina 2 metros

2.1.1 Estructura externa del secador y sus dimensiones



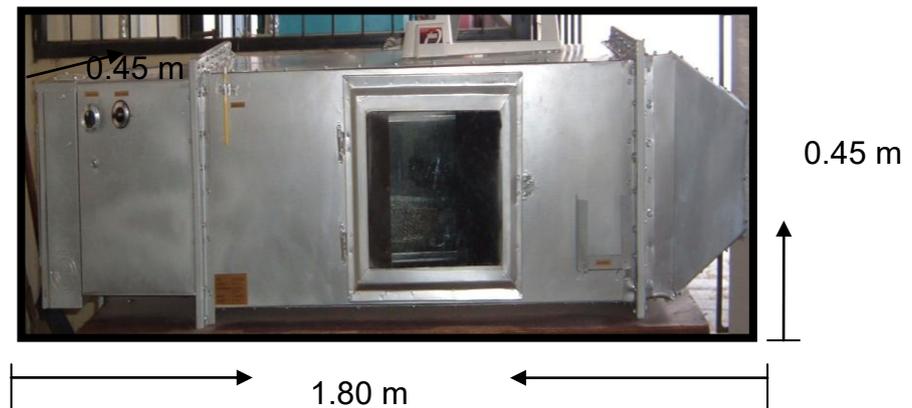


Foto 3. Secador de bandeja

En un ducto rectangular el diámetro equivalente del equipo corresponde a la siguiente ecuación:

$$(27)^{(4)} \quad Dr = \frac{2ab}{(a+b)}$$

Donde a es base y b es la altura de la campana

$$Dr = \frac{2(1*0.35)}{(1+0.35)} = 0.518m$$

2.1.2 Blower

Los ventiladores se utilizan para bajas presiones, en general con ciertas características de presión, se los utiliza para trabajos de ventilación, suministro de corriente de aire a

hornos y calderas, desplazamiento de grandes volúmenes de aire o gas por ductos, suministros de aire para desecación, transporte de materiales suspendidos en corrientes de gas, eliminación de humos, etc.⁽⁴⁾



Foto 4. Ventilador (Blower)

Funcionamiento del ventilador

El funcionamiento de un ventilador centrífugo varía con los cambios de condiciones, como la temperatura, la velocidad y de la densidad del gas que se maneje.⁽⁴⁾

Cuando varía la temperatura del aire o el gas, los caballos de potencia y la presión varían en proporción inversa a la temperatura absoluta (cuando la velocidad y la capacidad se mantienen constantes).

Cuando varía la densidad del aire o el gas, los caballos de potencia y la presión varían en proporción directa a la

densidad (se mantienen constantes la velocidad y la capacidad)⁽⁴⁾.

Las velocidades que se alcanzan luego de hacer variaciones en el voltaje del blower son:

$$R \rightarrow V1 = 70CFM = 7.34m/s$$

$$S \rightarrow V2 = 50CFM = 5.24m/s$$

$$T \rightarrow V3 = 40CFM = 4.19m/s$$

2.1.3 Instrumentos de medición

Balanza

La balanza romana (brazos iguales y desiguales) pesan masas, es decir son independientes de la aceleración de la gravedad g . La romana (compensación exclusivamente por peso móvil) facilita el montaje con impresión de talones de peso.⁽⁹⁾



Foto 5. Balanza

Termo higrómetro

Los higrómetros eléctricos miden la resistencia eléctrica de una capa de materiales que absorben la humedad, expuestos al gas. Se han empleado gran variedad de elementos sensores.

Su operación consiste en medir temperatura y humedad relativa.



Foto 6. Termohigrómetro

Manual de uso del termohigrómetro

Para el uso del termohigrómetro es necesario tener claro su función y su modo de empleo.

Existen dos formas de tomar la temperatura: con un sensor metálico y con el láser, el uso de estos dependerá del grado

de temperatura a la que se este trabajando ya que el primero solo puede tomar hasta una temperatura de 75°C y el otro llega hasta 250°C.

La misma se toma encendiendo el termohigrómetro e introduciendo el brazo de plástico en el equipo y para usar el láser se debe presionar el botón de color rojo y apuntar hacia donde deseamos, los valores empezaran a moverse ya que en el interior del secador hay aire en movimiento, así que hay que presionar la tecla hold para que dé una lectura promedio. El porcentaje de humedad relativa se obtiene al mismo tiempo que se censa la temperatura.

Termómetro bimetalico de bolsillo

El bimetálico termostático se define como un material compuesto que constan de tiras o fletos de dos o mas metales unidos entre si. Debido a los diferentes índices de expansión de sus componentes, esta composición tiende a cambiar de curvatura cuando se somete a una variación de temperatura.⁽⁹⁾



Foto 7. Termómetro Bimetalico Digital

Cuando se mantiene fijo un extremo de una tira recta, el otro sufre una deflexión proporcional al cambio de temperatura y al cuadrado de la longitud, y el sentido inverso al espesor, a lo largo de la porción lineal de la curva característica de deflexión. Si una tira bimetalica se enrolla en forma helicoidal o como espiral y se fija uno de sus extremos, el otro extremo girara al aplicársele calor. Para un termómetro con división de escala uniformes, el elemento bimetalico se debe diseñar de tal manera que tenga una deflexión lineal a lo largo del intervalo de temperatura deseada. ⁽⁹⁾

2.1.4 Instrumentos de control

Breque doble 40 AMP

Los equipos eléctricos están protegidos de sobrecargas eléctricas por medio de fusibles o breques (interruptores de circuito).

Los breques hacen la misma función que los fusibles, con la ventaja que pueden ser restaurados manualmente en lugar de tener que ser reemplazados. ⁽⁹⁾



Foto 8. Breque

Botonera ON/OFF

Las botoneras desempeñan un papel clave en la comunicación hombre-máquina. Una botonera de este tipo abre el paso de una señal que activa el sistema y según el sistema universal es de color verde; la de color rojo es quien detiene el paso de la corriente y hace que el sistema se apague. Para poder cumplir su tarea, deben tener un alto grado de funcionalidad. ⁽⁹⁾



Foto 9. Botoneras

Contactor de 50 AMP 220 Voltios

Son conexotes de seguridad, maniobrados y mantenidos en posición de servicio por fuerza electromagnética. Vuelven a su posición de reposo tan pronto cesa de actuar sobre ellos la acción electromagnética. Poseen una gran potencia de conexión con pequeñas potencias de excitación. ⁽⁹⁾



Foto 10. Contactor

Termostato para horno de rango 50 – 300 °C

Interruptor que controla la temperatura cambiante. Sus funciones normales son finalizar un [ciclo](#), mantener una temperatura constante, o apagar y encender el electrodoméstico. ⁽⁹⁾



Foto 11. Termostato para horno

Swich infinito

Un switch (interruptor) es un dispositivo de interconexión de sistemas de ordenadores. Un switch interconecta dos o más segmentos de estos sistemas, funcionando de manera similar a los puentes, pasando datos de una red a otra, de acuerdo con la dirección de destino de los diagramas del sistema. ⁽⁹⁾



Foto 12. Swich infinito

2.2 Esquema del secador de bandeja

El esquema del secador que sigue se indica por medio de números y que se mencionan:

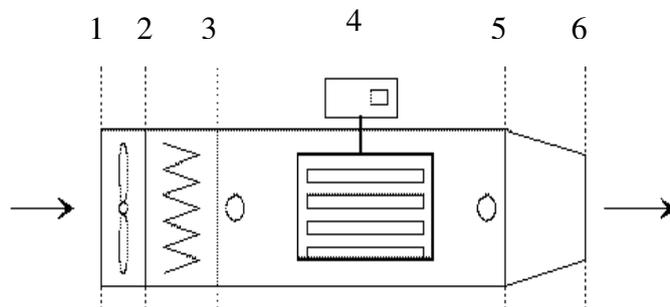


Figura 10. Esquema del secador construido ⁽¹²⁾

1. Caja de instalaciones eléctricas
2. Ventilador (blower).
3. Banco de resistencias.
4. Balanza analógica ubicada sobre la bandeja.

5. y 6. Cámara para estrangulamiento del aire.

2.3 Método de operación del secador de bandeja

Dependiendo de la muestra que se vaya a secar y en que tiempo se lo quiera hacer se debe de variar los parámetros que son fundamentales en un proceso de secado como son la temperatura y la velocidad del aire.⁽¹³⁾

Para operar el secador de bandeja correctamente, se ha realizado el siguiente esquema que facilita su uso del secador.

1. Obtener muestras de igual tamaño y forma del producto que se desea secar.
2. Abrir la puerta del secador.
3. Ubicar las muestras del producto a secar en la bandeja y una de ellas en la canastilla para realizar el estudio.
4. Cerrar la puerta del secador.
5. Conectar el enchufe en la toma corriente.
6. Regular el flujo de aire de la operación con la perilla 1
7. Colocar la temperatura necesaria para la operación con la perilla 2 (anexo 25)
8. Encender el equipo presionando el botón de color verde

9. Ubique el termohigrómetro frente al vidrio, dispere el censor láser y constate la temperatura seleccionada con la perilla.
10. Establecer el intervalo de tiempo deseado para registrar la perdida de peso
11. Anotar la variación de peso hasta que esta se vuelva constante.
12. Para apagar el equipo presione el botón de color rojo y deje enfriar hasta que lea 45°C en el termómetro de bolsillo.
13. Regrese todas las perillas a cero
14. Retire la muestra seca
15. Retire cualquier resto del producto que se encuentre en el secador
16. Cierre la puerta
17. Desconecte el equipo

CAPÍTULO 3

3. PRACTICAS DE LABORATORIO EN EL SECADOR DE BANDEJAS

3.1 Familiarización con un secador de bandejas

Introducción

El uso de diferentes equipos en las industrias necesitan del conocimiento de ciertos conceptos que son básicos para el correcto manejo de ellos. En varios procesos industriales es necesario conocer y manejar la tabla psicrométrica que ayuda a resolver muchos de los problemas que se presentan diariamente en una fabrica.

3.1.1 Uso de la carta psicrométrica

La tabla psicrométrica involucra la ganancia o pérdida de humedad en aire. Para conocer su forma de uso es necesario conocer los siguientes conceptos:

Temperatura del bulbo seco (Tbs): es la temperatura de la mezcla por la inmersión del termómetro en la mezcla sin ninguna modificación del termómetro. ⁽⁴⁾

Humedad relativa: % saturación relativa: Se define como la relación entre la presión parcial de vapor de agua en el sistema y la presión parcial de vapor de agua en condición saturado a la misma temperatura del sistema. ⁽⁴⁾

Porcentaje de saturación o porcentaje de humedad absoluta. Se define como la relación entre las moles de vapor por mol de gas libre de vapor y los moles de vapor que estarían presentes por mol de gas libre de vapor si la mezcla estuviera completamente saturada a la temperatura y presión total vigentes. ⁽⁴⁾

Calor húmedo: es la cantidad de calor en J o KJ requerido para elevar la temperatura de un kilogramo de aire seco más el vapor de agua presente, en un grado kelvin o un grado centígrado. ⁽⁴⁾

Entalpía de la mezcla aire-vapor: es definida como las sumas de entalpías del gas y el vapor. ⁽⁴⁾

Punto de rocío- Es la temperatura a la cual la mezcla se satura cuando se enfría a presión constante. Si la mezcla es enfriada a una temperatura menor al punto de rocío el agua

se condensará. El punto de rocío puede determinarse de la tabla psicrométrica.⁽⁴⁾

Temperatura de bulbo húmedo (Tbh): se conocen dos temperaturas de bulbo húmedo: la temperatura de bulbo húmedo psicrométrica y la termodinámica. Para aire húmedo las dos temperaturas son aproximadamente iguales⁽⁴⁾.

Observar la figura 1.

Objetivos

- Familiarizarse con el equipo de secado
- Conocer los instrumentos que forman parte del secador
- Aprender a leer la tabla psicrométrica
- Determinar humedad absoluta, flujo volumétrico, temperatura de bulbo húmedo, temperatura de bulbo seco

Requerimientos

Termohigrómetro

Secador de bandeja

Procedimiento

1. Encienda el equipo con el botón verde, ajuste la perilla 1 del blower hasta T en donde obtendrá una velocidad de

- 4.19 m/s; y además regule la temperatura hasta que alcance 65 o 75°C según sea el caso (anexo 25).
- Abra la puerta del equipo y ubique el termohigrómetro dentro del secador, lea la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa del aire. Esto se debe repetir cada vez que varíe la temperatura.
 - Con los datos obtenidos vaya al anexo 2 y obtenga los siguientes datos: Humedad absoluta (H_a), entalpía (H_1) y temperatura de bulbo húmedo (T_{bh}).

Resultados y discusión

<i>T_{bs}</i>	<i>H_r</i>	<i>H_a</i>	H1	Tbh
65°C				
75°C				

Ejemplo

Tabla 1. Valores obtenidos de la carta psicrometrica

<i>Tbs</i>	<i>Tbh</i>	<i>Hr</i>	Ha	H1
65 °C	45 °C	32 %	4.050(KJ/Kg aire seco)	0.042(Kg agua/Kg aire seco)
75 °C	53 °C	30 %	4.500(KJ/Kg aire seco)	0.085(Kg agua/Kg aire seco)

- ¿Al aumentar la temperatura de proceso que sucede con la humedad relativa, aumenta o no?, Explique.

Nomenclatura

Tbs: temperatura de bulbo seco (°C)

Tbh: temperatura de bulbo húmedo (°C)

Ha: entalpía del aire (KJ/Kg aire seco)

Hr: humedad relativa del aire (%)

H1: humedad absoluta inicial (Kg agua/Kg aire seco)

Vs: volumen especifico (m³ Kg aire seco)

3.2 Balance macroscópico de materia en un proceso de secado

Introducción

Un balance de masa está basado en el axioma que dice: “la materia no se crea ni se destruye, sólo se transforma”. En este sentido, un balance de masa se define como la verificación de la igualdad cuantitativa de masas que debe existir entre los insumos de entrada y los productos y residuos de salida. El balance de masa es aplicable tanto a un proceso como a cada una de las operaciones unitarias ⁽²⁾.

La figura 11 ilustra el concepto de entradas y salidas de una operación unitaria; y la figura 12 ilustra un detalle de las posibles masas que deben cuantificarse para hacer un balance de masa. ⁽²⁾

Figura 11. Principios de entrada y salida de una Operación unitaria ⁽¹⁵⁾

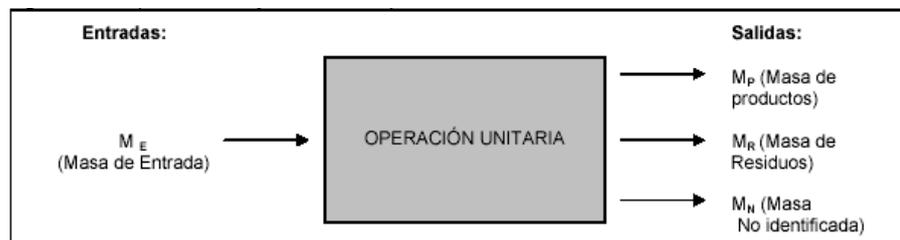
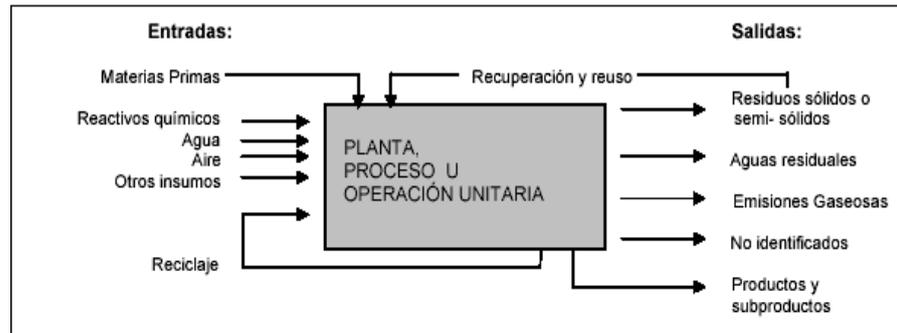


Figura 12. Componentes típicos de un balance de masa ⁽¹⁵⁾



Objetivos

- **Determinar la cantidad de agua que pierde el producto durante un proceso de secado a diferentes tiempos y temperaturas.**
- **Realizar un balance de materia en un secador con flujo de aire constante. (Dicho balance se hará determinando la cantidad de agua que gana el aire comparada con la que pierde el producto)**

Requerimientos

Plátano de seda

Medidor de Bernier

Cuchillo

Termohigrómetro

Secador de bandeja

Determine la humedad final durante el secado de trozos de banano

- *Diámetro = 2.51 cm*
- *Espesor = 0.5 cm*
- *Peso inicial del producto = 3.2 g*
- Humedad en base húmeda = 0.729 g de agua/g de producto
- Contenido de agua = $(3.2) (0.729) = 2.3328$ g de agua
- Contenido de materia seca = $3.2 - 2.3328 = 0.8672$ g materia seca
- Humedad en base seca = $2.3328 / 0.8672 = 2.69$ Kg agua / Kg. materia seca

Procedimiento

Antes de comenzar la experiencia asegúrese de que las instalaciones eléctricas del equipo estén bien conectadas (cap. 2)

1. Determine la humedad inicial (X1) de la muestra a secar
2. Introduzca el material a secar dentro del equipo, en la canasta y determine su peso inicial.
3. Cierre la puerta de entrada del secador

4. Encienda el equipo con el botón verde, ajuste la perilla 1 del blower hasta T en donde obtendrá una velocidad de 4.19 m/s y además regule la temperatura con la perilla 2 hasta que alcance 65 o 75°C según sea el caso (anexo 25).
5. Determine la velocidad del aire que entra al proceso con la ayuda del anemómetro.
6. Calcule el caudal másico con la ecuación 28 y 29.

$$(28), (29)^{(4)} \quad Gm = V.A.\rho \quad A_2 = \frac{\pi D_2^2}{4}$$

ρ : Obtener de la anexo 18

Gm: Caudal másico

7. Determine la humedad inicial (H1) a la salida del secador.
8. Determine la humedad del aire a la salida del secador (H2) con la ayuda del termohigrómetro.
9. De la ecuación 30 calcule la humedad final del aire (X_2)

$$(30)^{(4)} \text{ Masa producto } (X_1 - X_2) = \text{Masa aire } (H1 - H2)$$

$$(31)^{(4)} \quad Heq = \frac{\%H_2O}{100 - \%H_2O}$$

- 10. Comprobar los resultados obtenidos con lo experimental.
- 11. Este procedimiento se puede repetir a diferente temperatura y velocidad del aire.
- 12. Obtener las humedades en base seca del producto a 65°C y 75°C del anexo 8 y 15 respectivamente

Para hallar el aire seco, según su flujo:

X = Cantidad de aire – Cantidad de humedad en el aire

X = Kg aire seco – (Kg de agua/Kg de aire seco)

X = Kg aire seco

Cálculos

Humedad producto (Kg H ₂ O/Kg s.s)			Humedad del aire (Kg H ₂ O/Kg a.s)		
°T	Inicial -----	final	°T	Inicial -----	final
65°C			65°C		
75°C			75°C		

Ejemplo:

Datos:

°T del aire (65 °C)

ρ aire: 1.0105 Kg/m³

Vaire: 4.19 m/s

H1: 0.042 Kg aire/Kg aire seco

D_{blower}: 0.075 m

A: 4.5 x 10⁻³ m²

$$Heq = \frac{\%H_2O}{100 - \%H_2O}$$

$$Heq = \frac{0.25}{100 - 0.25}$$

$$Heq = 2.5 \times 10^{-3} \text{ Kg H}_2\text{O} / \text{Kg a. s.}$$

$$X = X_t - X_{eq}$$

$$X_{entrada} = 2.69 \text{ Kg H}_2\text{O} / \text{Kgs.s} - 2.5 \times 10^{-3} \text{ Kg H}_2\text{O} / \text{Kgs.s} = 2.6875 \text{ Kg.H}_2\text{O} / \text{Kg.s.s}$$

$$X_{salida} = 0.037 \text{ Kg H}_2\text{O} / \text{Kgs.s} - 2.5 \times 10^{-3} \text{ Kg H}_2\text{O} / \text{Kgs.s} = 0.0353 \text{ Kg.H}_2\text{O} / \text{Kg.s.s}$$

$$G_{m_1} = V.A.\rho$$

$$G_{m_1} = (4.19 \text{ m/s})(4.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2)(1.0105 \text{ Kg/m}^3)(3600 \text{ s/h})$$

$$G_{m_1} = 68.4 \text{ Kg/h} - 0.32(68.4 \text{ Kg/h})$$

$$G_{m_1} = 46.5 \text{ Kg.a.s/h}$$

Masa producto ($X_1 - X_2$) = Masa aire ($H_2 - H_1$)

$$0.87 \text{Kg.s.s} (2.687 \text{ Kg.H}_2\text{O} / \text{Kg.s.s} - 0.0353 \text{ Kg.H}_2\text{O} / \text{Kg.s.s}) = 46.5 (H_2 - 0.042 \text{Kg.H}_2\text{O} / \text{Kg.a.s})$$

$$\frac{2.3 \text{Kg.H}_2\text{O}}{46.5} = H_2 - 0.042 \text{Kg.H}_2\text{O}$$

$$0.049 + 0.042 = H_2$$

$$H_2 = 0.091 \text{Kg.H}_2\text{O} / h$$

Datos:

°T del aire (75 °C)

ρ aire: 1.0105 Kg/m³

Vaire: 4.19 m/s

H1: 0.042 Kg aire/Kg aire seco

D_{blower}: 0.075 m

D_{platano}: 3 cm

Espesor del Plátano: 0.5 cm

A: 4.5 x 10⁻³ m²

$$Heq = \frac{\%H_2O}{100 - \%H_2O}$$

$$Heq = \frac{0.22}{100 - 0.22}$$

$$Heq = 2.2 \times 10^{-3} \text{ Kg H}_2\text{O} / \text{Kg a. s.}$$

$$X = X_t - X_{eq}$$

$$X_{entrada} = 2.69 \text{ Kg H}_2\text{O} / \text{Kg s.s} - 2.2 \times 10^{-3} \text{ Kg H}_2\text{O} / \text{Kg s.s} = 2.6878 \text{ Kg H}_2\text{O} / \text{Kg s.s}$$

$$X_{salida} = 0.0263 \text{ Kg H}_2\text{O} / \text{Kg s.s} - 2.2 \times 10^{-3} \text{ Kg H}_2\text{O} / \text{Kg s.s} = 0.0240 \text{ Kg H}_2\text{O} / \text{Kg s.s}$$

$$G_{m^1} = V \cdot A \cdot \rho$$

$$G_{m^1} = (4.19 \text{ m/s})(4.5 \times 10^{-3} \text{ m}^2)(0.982 \text{ Kg/m}^3)(3600 \text{ s/h})$$

$$G_{m^1} = 68.4 \text{ Kg/h} - 0.3(68.4 \text{ Kg/h})$$

$$G_{m^1} = 46.62 \text{ Kg a.s/h}$$

$$\text{Masa producto } (X_1 - X_2) = \text{Masa aire } (H_2 - H_1)$$

$$0.87 \text{ Kg s.s} (2.6878 \text{ Kg H}_2\text{O} / \text{Kg s.s} - 0.0240 \text{ Kg H}_2\text{O} / \text{Kg s.s}) = 46.62 (H_2 - 0.085 \text{ Kg H}_2\text{O} / \text{Kg a.s})$$

$$\frac{2.317 \text{ Kg H}_2\text{O}}{46.62} = H_2 - 0.085 \text{ Kg H}_2\text{O}$$

$$0.0497 + 0.085 = H_2$$

$$H_2 = 0.1347 \text{ Kg H}_2\text{O/h}$$

Nota: Experimento realizado al mismo tiempo y con condiciones de operación similares.

Resultados y discusión

Tabla 2. Valores de masa inicial y final del producto y del aire a diferentes temperaturas

Masa de producto (cantidad de agua)			Masa de aire (cantidad de agua)		
Humedad producto base seca			Humedad del aire		
°T	Inicial -----	final	°T	Inicial -----	final
65°C	2.6875×10^{-3}	0.0353	65°C	0.042 Kg	0.091
	Kg.H ₂ O/Kg s.s	Kg.H ₂ O/Kgs.s		H ₂ O/h	Kg H ₂ O/h
75°C	2.6875×10^{-3}	0.0240	75°C	0.085	0.1347
	Kg.H ₂ O/Kg s.s	Kg.H ₂ O/Kgs.s		Kg H ₂ O/h	Kg H ₂ O/h

- *Cómo le afecta la variación de temperatura a la capacidad que tiene el aire para secar el producto.*

Nomenclatura

- X: humedad libre (Kg agua/Kg sólido seco)
- X_t: humedad (Kg agua/Kg sólido seco)
- X_{eq}: humedad de equilibrio (Kg agua/Kg aire seco)
- G: densidad de flujo másico del aire (Kg/m²h)
- V: velocidad (m/s)
- ρ : densidad (m³/Kg)
- A : area (m²)
- X₁: concentración inicial (%)
- X₂: concentración final (%)
- H₂: humedad absoluta final (Kg agua/h)
- H₁: humedad absoluta inicial (Kg agua/Kg aire seco)
- H_r: humedad relativa de aire (%)
- Masa de aire: Kg aire seco/h
- Masa de producto : Kg sólido seco/h

3.2.1 *Influencia del tamaño de la partícula*

Introducción

Generalmente si se produce la conducción del calor a través del sólido las ecuaciones indican valores menores de velocidad de secado al incrementarse el espesor del sólido.

No obstante, la conducción del calor a través de los bordes de las superficies de los recipientes y las bandejas puede ser una importante fuente de calor que alcance a originar aumento en la velocidad de secado, si las superficies de los bordes que no son de secado están aisladas o si se produce el secado desde la superficie del sólido la velocidad de secado es independiente del espesor.⁽¹³⁾

Objetivo

- Determinar la influencia del espesor en el proceso de secado midiendo su humedad final a un mismo tiempo.

Requerimientos

Plátano de seda

Medidor de Bernier

Cuchillo

Termohigrómetro

Secador de bandeja

Procedimiento

1. Mida la humedad inicial de la fruta que va a utilizar.
2. Haga cortes de una misma fruta con diferente espesor y ubíquelas en el secador al mismo tiempo.
3. Espere 90 minutos mientras ocurre el proceso de secado.
4. Luego de este tiempo mida la humedad final.

Resultados y discusión

Muestras (dimensiones)	H1 (porcentaje)	H2(porcentaje)
0.25 cm.		

0.5 cm.		
1 cm.		

Ejemplo:

Condiciones de operación:

°T	Velocidad de aire	Hr	t
65°C	4.19 m/s	32%	90 min

Tabla 3. Valores de humedad final a diferentes espesores

Muestras (dimensiones)	H1 (porcentaje)	H2(porcentaje)
0.25 cm.	85%	14 %
0.5 cm.	85%	25 %
1 cm.	85%	49 %

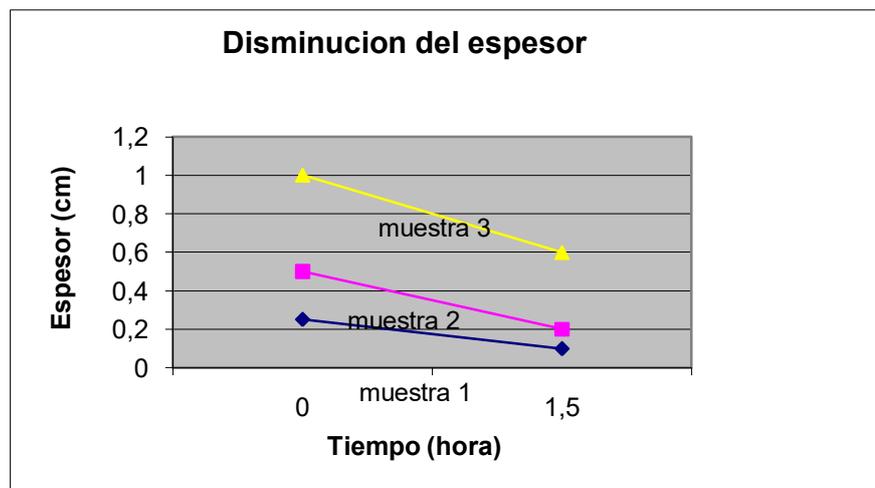


Figura 12. Disminución del espesor vs tiempo

- ¿Como afecta el espesor en el tiempo de secado, se obtiene mayor o menor humedad cuando el espesor se incrementa, explique?

Nomenclatura

- Tbs: temperatura de bulbo seco ($^{\circ}\text{C}$)
- D : diámetro (m)
- V: velocidad (m/s)
- ρ : densidad (m^3/Kg)
- Re : Numero de Reynolds (adimensional)
- Qm : flujo másico de aire (Kg/s)
- A : area (m^2)
- X1 : concentración inicial (%)
- X2 : concentración final (%)
- H2: humedad absoluta final (Kg agua/h)
- H1: humedad absoluta inicial (Kg agua/Kg aire seco)
- Hr: humedad relativa de aire (%)

3.3 Balance macroscópico de energía en un proceso de secado

Introducción

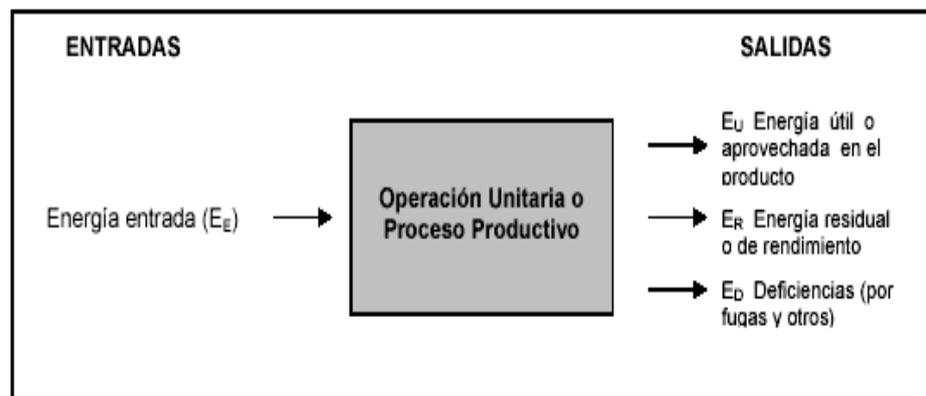
En todo proceso en donde existe transferencia de calor existe un medio calefactor que es el encargado de calentar el fluido que estará en contacto con el producto y lo secara.

En un secador de bandeja el generador de calor generalmente son resistencias eléctricas y el medio que transfiere el calor es el aire. Un balance de energía en este secado sería comparar el calor que entrega el equipo comparado con el que recibe el producto que se esta secando más lo que se pierde al medio ambiente y que se representa con la siguiente ecuación.

$$(32)^{(4)} \quad Q_1 + Fa * Ha_1 + Fs * Hs_1 = Q_1 + Fa * Ha_2 + Fs * Hs_2$$

La figura 14 muestra un diagrama en el que se representan las entradas y salidas de energía que ocurren en un proceso o en una operación unitaria. ⁽²⁾

Figura 14. Entradas y salidas de energía en un proceso o en una operación unitaria ⁽²⁾



Objetivo

- Obtener la cantidad de calor que se añade al producto durante el proceso de secado.

Requerimientos

Plátano de seda

Medidor de Bernier

Cuchillo

Termohigrómetro

Secador de bandeja

Procedimiento

1. Calcular la entalpía del aire a la entrada y salida del secador con la siguiente ecuación, o con la carta psicrométrica.

$$(33)^{(4)} \quad Ha_1 = Cs(Ta - To) + X * \lambda \circ$$

$$(34)^{(4)} \quad Cs = 1.005 + 1.884 * W$$

2. Obtener la entalpía del producto que se seca a la entrada y a la salida del secador definiendo para cada caso sus valores con la siguiente ecuación:

El valor C_{pa} lo obtenemos de la anexo 19

$$(35)^{(4)} \quad C_p = \frac{p}{100} + \frac{(100-P)*0.2}{100}$$

$$(36)^{(4)} \quad H_s = C_{ps}(T_s - T_o) + W * C_{pa}(T_s - T_o)$$

3. Reemplazando en la ecuación 32 obtenemos el calor que requiere el producto para que alcance la humedad deseada.

Cálculos

Valores de Ha	65 °C	75 °C
Entrada de aire		
Salida de aire		

Valores de Hs	65 °C	75 °C
Entrada del producto		
Salida del producto		

Calor entregado por fuente externa	65 °C	75 °C
Q		

Ejemplo:

Datos:

°T del aire 65°C

P: 72.9 g/100g peso Ver anexo 1

Entrada del aire

$$Ha(65^\circ C) = 4.050 \text{ KJ / Kg aire seco}$$

Salida del aire

$$Ha(52^\circ C) = 3.5 \text{ KJ / Kg aire seco}$$

Entrada del producto

$$Cp = \frac{p}{100} + \frac{(100-p)*0.2}{100}$$

$$Cp = \frac{72.9}{100} + \frac{(100-72.9)*0.2}{100}$$

$$C_p = 0.7832 \text{Kcal} / \text{Kg}^\circ \text{C}$$

$$X = 0.7832 \text{Kcal} / \text{Kgs.s}^\circ \text{C} * 4186.7 \text{KJ} / 1 \text{Kcal}$$

$$X = 3279.02 \text{KJ}$$

$$H_s = C_{ps}(T_s - T_o) + W * C_{pa}(T_s - T_o)$$

$$H_s = 3279.02(21 - 0) + (2.6875) * (4.18)(21 - 0)$$

$$H_s = 69095 \text{KJ} / \text{Kgs.s}$$

Salida del producto

$$H_s = C_{ps}(T_s - T_o) + W * C_{pa}(T_s - T_o)$$

$$H_s = 3279.02(47 - 0) + (0.0353) * (4.18)(47 - 0)$$

$$H_s = 154120.875 \text{KJ} / \text{Kg.s.s}$$

$$Q_1 + F_a * H_{a_1} + F_s * H_{s_1} = Q_2 + F_a * H_{a_2} + F_s * H_{s_2}$$

$$Q + 46.88 * 4.050 + 0.87 * 69.095 = 0 + 46.88 * 3.5 + 0.87 * 154120.87$$

$$Q = 73946.72 \text{KJ} / h$$

Datos:

°T del aire (75°C)

P: 72.9 g/100g peso Ver anexo 1

Entrada del aire

$$Ha(75^\circ C) = 4.5KJ / Kg\text{aireseco}$$

Salida del aire

$$Ha(62^\circ C) = 4.1KJ / Kg\text{aireseco}$$

Entrada del producto

$$Cp = \frac{p}{100} + \frac{(100-p)*0.2}{100}$$

$$Cp = \frac{72.9}{100} + \frac{(100-72.9)*0.2}{100}$$

$$Cp = 0.7832Kcal / Kg^\circ C$$

$$X = 0.7832Kcal / Kgs.s^\circ C * 4186.7KJ / 1Kcal$$

$$X = 3279.02KJ$$

$$Hs = Cps(Ts - To) + W * Cpa(Ts - To)$$

$$Hs = 3279.02(21-0) + (2.6878) * (4.18)(21-0)$$

$$Hs = 69095.75KJ / Kgs.s$$

Salida del producto

$$H_s = C_{ps}(T_s - T_o) + W * C_{pa}(T_s - T_o)$$

$$H_s = 3279.02(51-0) + (0.0240) * (4.18)(51-0)$$

$$H_s = 167235.136 \text{ KJ / Kg.s.s}$$

$$Q_1 + Fa * Ha_1 + Fs * Hs_1 = Q_2 + Fa * Ha_2 + Fs * Hs_2$$

$$Q_1 + 46.62 * 4.5 + 0.87 * 69095.75 = 0 + 46.62 * 4.1 + 0.87 * 167235.14$$

$$Q_1 = 8536261 \text{ KJ / h}$$

Resultados y discusión

Tabla 4. Valores de entalpía del aire

Valores de Ha	65 °C	75 °C
Entrada de aire	4.050 KJ/Kg aire seco	4.5 KJ/Kg aire seco
Salida de aire	3.5 KJ/Kg aire seco	4.1 KJ/Kg aire seco

Tabla 5. Valores de entalpía del producto

Valores de Hs	65 °C	75 °C
Entrada del producto	69095 KJ/Kg s.s	69095.75 KJ/Kg s.s
Salida del producto	154120.875 KJ/Kg s.s	167235.136 KJ/Kg s.s

Tabla 6. Calor que necesita el producto para secar

Calor entregado por fuente externa	65 °C	75 °C
Q	73946.72	85362.61

- Verificar los resultados obtenidos por el método práctico: (determine la humedad final experimentalmente)
- Si existiera recirculación en el sistema que ventajas y que desventajas se presentaría en el secador.

Nomenclatura

Q_1 : Calor añadido al secador mediante cualquier fuente externa

Q_L : Calor que se pierde al medio ambiente

H_a : Entalpía del aire (KJ/Kg de aire seco)

C_s : Calor específico del aire húmedo

T_o : Temperatura de referencia (0°C)

λ_o : Calor latente del agua a la temperatura de referencia (2501.4

KJ/Kg del agua usando aire y vapor de agua saturado a 0°C como

punto de referencia)

Hs: Entalpía del sólido

Cps: Calor específico del sólido (Kcal/Kg sólido seco °C)

Cpa: Calor específico del agua (KJ/Kg K)

Fs: Flujo de sólido (Kg de sólido seco/h)

Fa: Flujo de aire (Kg de aire seco/h)

W: Humedad (Kg de agua/Kg de aire seco)

Ts: Temperatura de entrada del producto

Ta: Temperatura del aire a la entrada (medida con el termómetro de bulbo seco)

H1: humedad absoluta inicial (Kg agua/Kg aire seco)

H2: humedad absoluta final (Kg agua/h)

P: peso de la muestra

3.4 Tipos de flujo de aire y número de Reynolds

Introducción

Recibe su nombre en honor de Osborne Reynolds (1842-1912), quien lo describió en 1883.

El **número de Reynolds** es una cantidad adimensional que determina el tipo de flujo (laminar o turbulento) que presenta un fluido. En dinámica de fluidos, número adimensional que puede

utilizarse para definir las características del flujo dentro de un conducto ⁽⁶⁾.

El Número de Reynolds se definió como la relación existente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas (o de rozamiento) ⁽⁶⁾.

$$(37)^{(4)} \text{ NRe} = \frac{\text{Fuerzas Inerciales}}{\text{Fuerzas viscosas}} = \frac{\rho \cdot D \cdot V}{\mu}$$

Este número es adimensional y puede utilizarse para definir las características del flujo dentro de una tubería. El número de Reynolds proporciona una indicación de la pérdida de energía causada por efectos viscosos. Observando la ecuación anterior, cuando las fuerzas viscosas tienen un efecto dominante en la pérdida de energía, el número de Reynolds es pequeño y el flujo se encuentra en el régimen laminar. Si el Número de Reynolds es 2100 o menor el flujo será laminar. Un número de Reynold mayor de 10 000 indican que las fuerzas viscosas influyen poco en la pérdida de energía y el flujo es turbulento. ⁽⁶⁾

Objetivo

- Determinar el número de Reynolds en el secador de bandeja a diferentes flujos de aire.

Requerimientos

Secador de bandeja del laboratorio de operaciones unitarias

Termohigrómetro

Plátano de seda

Medidor de Bernier

Cuchillo

Procedimiento

La práctica consta de dos partes, ya que analizaremos condiciones de aire a temperatura ambiente y a otras temperaturas mayores.

Primera parte:

1. Encienda el blower del secador
2. Mida la velocidad del aire que sale del blower con la ayuda de las ecuaciones 29 y 38.

$$(38)^{(4)} \quad Q = VA$$

3. Lea la temperatura en el termómetro de bulbo seco
4. Ubique en la tabla de aire la densidad y Viscosidad, anexo 18.
5. Calcule el numero de Reynolds utilizando la ecuación 13

Segunda parte

En la segunda parte prenderemos las resistencias para que se caliente el aire.

1. Con la misma velocidad anterior.
2. Regule la temperatura a 60°C (anexo 25)
3. Del anexo 18 obtener la densidad y viscosidad a 60°C
4. Calcular el numero de Reynolds (Re) con la ecuación 13
5. Calcular el flujo másico con la ecuación 28.

Cálculos

°T	D (m)	V(m/s)	μ(Pa.s)	ρ(Kg./m ³)	Re
25 °C					
60°C					

Ejemplo

Primera parte

$$Re_{30^{\circ}C} = \frac{DV\rho}{\mu}$$

$$Re_{30^{\circ}C} = \frac{(0.0762m)(4.19m/s)(1.127Kg/m^3)}{(18.682 \times 10^{-6})Pa.s}$$

$$Re_{30^{\circ}C} = 19260.6$$

Segunda parte

$$Re_{60^{\circ}C} = \frac{DV\rho}{\mu}$$

$$Re_{60^{\circ}C} = \frac{(0.0762m)(4.19m/s)(1.025Kg/m^3)}{(19.907 \times 10^{-6})Pa.s}$$

$$Re_{60^{\circ}C} = 116439.4$$

Resultados y discusión

Tabla 7. Valores del número de Reynolds

$^{\circ}T$	D (m)	V(m/s)	$\mu(Pa.s)$	$\rho(Kg./m^3)$	Re
25 °C	0.0762	4.19	18.682×10^{-6}	1.127	19260.6
60°C	0.0762	4.19	19.907	1.025	16439.4

- ¿Qué sucede con el número de Reynolds si el D de la boca del blower disminuye o aumenta?
- ¿Qué sucede con el número de Reynolds cuando las resistencias están trabajando y aumenta la temperatura del aire?

Nomenclatura

Tbs : temperatura de bulbo seco (°C)

D: diámetro (m)

V: velocidad (m/s)

ρ : densidad (m^3/Kg)

μ : viscosidad (C-poise)

Re: Numero de Reynolds (adimensional)

Q: flujo volumétrico (m^3/s)

A: área (m^2)

3.5 Determinación de coeficiente de transmisión de calor por convección en un secador de bandeja

Introducción

La transmisión de calor se define como la transferencia de energía de una región a otra debido a gradientes de temperatura existentes entre las dos regiones. En los procesos térmicos de los alimentos es muy importante conocer las características de transmisión de calor.

En esta práctica se presenta como evaluar el coeficiente de transmisión de calor entre un fluido y un sólido, tal como en secado.

(13)

Objetivo

- Determinar el coeficiente de transmisión de calor por convección de un producto colocado en un secador de bandeja a velocidad de aire y temperatura constante.

Requerimientos

Plátano de seda

Medidor de Bernier

Cuchillo

Termohigrómetro

Secador de bandeja

Procedimiento

1. Ubique la muestra a secar
2. Regule la perilla 1 de velocidad 4.19 m/s y la perilla 2 de la temperatura de 60, 70 y 80°C (anexo 25).
3. Obtenga las siguientes propiedades del aire según su temperatura de trabajo anexo 18.

$$(39)^{(2)} \quad G = V \rho$$

4. Determine el valor de densidad de flujo másico de aire según la ecuación 39
5. Determine el valor del coeficiente pelicular de transferencia de calor según la ecuación 14.

Cálculos

Valores de densidad de flujo y del coeficiente de transmisión de calor	Temperaturas		
	60 °C	70 °C	80 °C
G (kg/m²h)			
h (w/m²h°K)			

Ejemplo:

Datos:

Obtenidos del anexo 18

°C	ρ
60	1.025
70	0.996
80	0.968

$$G = V \rho$$

$$G_{60} = (4.19 \text{ m/s}) (1.025 \text{ Kg./m}^3) (3600/1\text{h})$$

$$G_{60} = 15461.1 \text{ Kg/m}^2 \text{ h}$$

$$G_{70} = 15023.7 \text{ Kg/m}^2 \text{ h}$$

$$G_{80} = 14601.3 \text{ Kg/m}^2 \text{ h}$$

$$h = 0.0204 G^{0.8}$$

$$h_{60} = 45.82 \text{ w/m}^2\text{h}^\circ\text{K}$$

$$h_{70} = 44.78 \text{ w/m}^2\text{h}^\circ\text{K}$$

$$h_{80} = 43.77 \text{ w/m}^2\text{h}^\circ\text{K}$$

Resultados y discusión

Tabla 8. Valores del coeficiente de transferencia de calor y densidad de flujo másico

	Temperatura
--	-------------

	60 °C	70 °C	80 °C
G (kg/m²h)	15461.1	15023.7	19601.3
h (w/m²h°K)	45.82	44.78	43.77

- Como cree usted que afectaría el incremento de temperatura en la determinación del coeficiente de transferencia de calor, esta aumenta, disminuye o se mantiene constante. Demuéstrelo.

Nomenclatura

a. base (m)

b: altura (m)

μ : viscosidad (C-poise)

ρ : densidad (m³/Kg)

D: diámetro (m)

V: velocidad (m/s)

h: coeficiente de transmisión de calor por convección (W/m² °K)

3.5.1 Influencia de la velocidad de aire

Introducción

La velocidad del aire afecta directamente al número de Reynolds y es principalmente quien define si el fluido tiene un

comportamiento laminar o turbulento. Por esto afecta también al Nusselt y como consecuencia a h ya que éste está en función de él.

Esta variación del coeficiente convectivo de transferencia de calor puede ayudar a definir cuáles son las condiciones óptimas de operación del sistema en donde se analicen tiempo y economía y se logre la eficiencia en el proceso de secado.

Objetivo

- Determinar cómo afecta la variación de la velocidad en el coeficiente convectivo de transferencia de calor.

Procedimiento

1. Defina una velocidad de aire en el blower
2. Mantenga una temperatura constante de operación
3. Para esa temperatura (anexo 25), determine densidad (ρ) del anexo 18
4. Determine el valor de h y G con la ayuda de las ecuaciones 14 y 39.
5. Repita el experimento a diferentes velocidades.

Requerimientos

Secador de bandeja

Cálculos

V (m/s)	ρ	G	h
R = 7.34			
S = 5.24			
T = 4.19			

Ejemplo:

Datos:

$^{\circ}T$ del aire 65 $^{\circ}C$

$$G_R = V \cdot \rho$$

$$G_R = (7.34 \text{ m/s}) \cdot (1.025 \text{ Kg/m}^3)$$

$$G_R = 27084.6 \text{ Kg/m}^2 \text{ h}$$

$$G_S = V \cdot \rho$$

$$G_S = (5.24 \text{ m/s}) \cdot (1.025 \text{ Kg/m}^3)$$

$$G_S = 19335.6 \text{ Kg/m}^2 \text{ h}$$

$$G_T = V \cdot \rho$$

$$G_T = (4.19 \text{ m/s}) \cdot (1.025 \text{ Kg/m}^3)$$

$$G_T = 15461.1 \text{ Kg/m}^2 \text{ h}$$

$$h_R = 0.0204 G^{0.8}$$

$$h_R = 0.0204 (27084.6)^{0.8}$$

$$h_R = 71.75 \text{ w/m}^2\text{h}^\circ\text{K}$$

$$h_S = 0.0204 G^{0.8}$$

$$h_S = 0.0204 (19335.6)^{0.8}$$

$$h_S = 54.79 \text{ w/m}^2\text{h}^\circ\text{K}$$

$$h_T = 0.0204 G^{0.8}$$

$$h_T = 0.0204 (15461.1)^{0.8}$$

$$h_T = 45.82 \text{ w/m}^2\text{h}^\circ\text{K}$$

Resultados y discusión.

Tabla 9. Valores de densidad, densidad de flujo másico y coeficiente convectivo de transferencia de calor a diferentes velocidades

V (m/s)	ρ	G	h
R = 7.34	1.025	27084.6	71.75
S = 5.24	1.025	19335.6	54.79
T = 4.19	1.025	15461.1	45.82

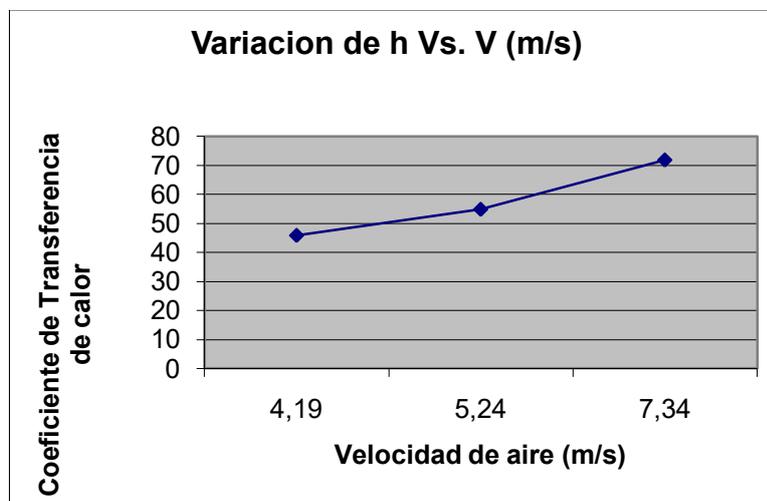


Figura. 15 Variación de h vs V (m/s)

Discusión

- Que cree usted que sucedería (demuéstrelo):
- Si se aumenta la velocidad y disminuye la temperatura.
- Si se aumenta la velocidad y aumenta la temperatura.
- Si se disminuye la velocidad y disminuye la temperatura.
- Si se disminuye la velocidad y aumenta la temperatura

Nomenclatura

V: velocidad (m/s)

ρ : densidad (m^3/Kg)

G: densidad de flujo másico de aire ($\text{Kg}/\text{m}^2\text{h}$)

h: coeficiente de transmisión de calor por convección (W/m^2
 $^{\circ}\text{K}$.)

3.6 Aplicación de la ley de Fick para determinar el coeficiente de difusión en el secado de alimentos

Introducción

Los fenómenos de transporte tienen lugar en aquellos procesos, conocidos como procesos de transferencia, en los que se establece el movimiento de una propiedad (masa, momentum o energía) en

una o varias direcciones bajo la acción de una fuerza impulsora. Al movimiento de una propiedad se le llama flujo.

La ley de Fick es el modelo matemático que describe la transferencia molecular de masa, en sistemas o procesos donde puede ocurrir solo difusión o bien difusión más convección.

Una vez analizada la ley de Fick, se observa la necesidad de disponer de valores numéricos del parámetro difusividad. ⁽¹³⁾

$$(40)^{(4)} \quad r = \frac{X - X_s}{X_o - X_c} = \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{hn^2} e^{-\frac{hn^2 Deff}{4L^2}}$$

$$(41)^{(4)} \quad hn = 2n - 1$$

Objetivos

- Determinar los valores del coeficiente de difusión de transferencia de masa y comprobar la aplicación de la ley de Fick.
- Obtener información sobre el mecanismo de transferencia de agua, durante la deshidratación de frutas.

Requerimientos

Isoterma de absorción del producto a utilizar.

Plátano de seda

Medidor de Bernier

Cuchillo

Termohigrómetro

Secador de bandeja

Procedimiento

1. Regule la perilla 1 de velocidad de flujo de aire y la perilla 2 de temperatura (anexo 25)
2. Encienda el equipo con el botón verde
3. Trocee la fruta que desea secar y ubíquela en la canastilla dentro del equipo.
4. Determine la humedad en la superficie con la ayuda de la isoterma de absorción del banano anexo 24
5. Mida la humedad inicial del producto, anexo 1.
6. Determine la humedad de la muestra al tiempo t .
7. Saque la pendiente de la parte lineal de la grafica, que es igual al valor de $Deff$.

Nota: el valor de $X_s = X_e$

Cálculos

Muestra	Deff
Plátano (65°C)	
Plátano (75°C)	

Ejemplo:

$$I_n \frac{X - X_s}{X_o - X_s} \text{ vs. } t$$

°T del aire 65°C

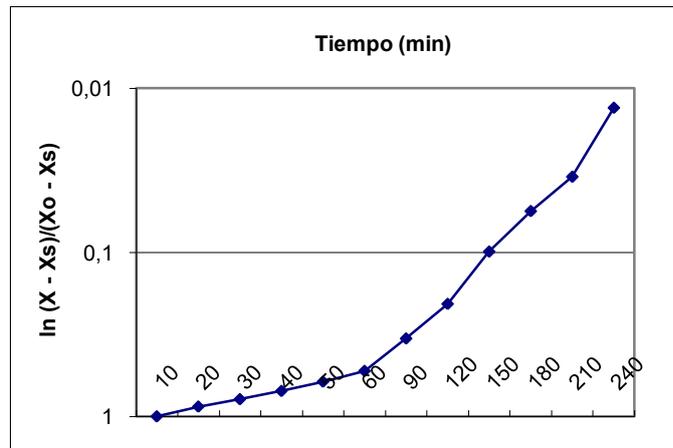


Figura. 16 Grafico experimental para determinar Deff a 65°C

Obteniendo la pendiente de esta grafica tenemos el valor de Deff

$$Deff = 0.0105$$

°T del aire 75°C

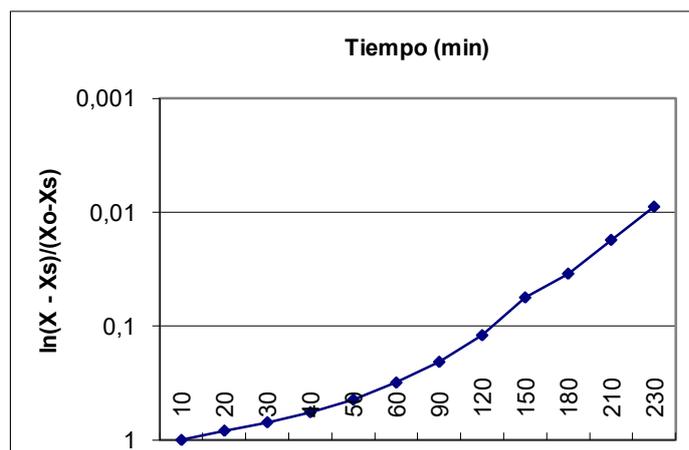


Figura 17. Grafica experimental para obtener Deff a 75°C

Obteniendo la pendiente de esta grafica tenemos el valor de Deff

$$Deff = 0.0142$$

Resultados y discusión

Tabla 10. Valores del coeficiente de difusión en secado de plátano a 65 y 75 °C

Muestra	Deff
Plátano (65°C)	0.0105
Plátano (75°C)	0.0142

- Compare con cálculos como afecta el espesor de una misma muestra en el coeficiente de difusión.

Nomenclatura

H1: humedad absoluta inicial (Kg agua/Kg aire seco)

H2: humedad absoluta final (Kg agua/h)

x1: espesor (m)

Deff: coeficiente de difusión

n. vector normal de unidades (adimensional)

Xs: humedad de la superficie

3.7 Obtención de la curva de velocidad de secado en frutas.

Introducción

El secado es un fenómeno complejo que involucra la transferencia de calor y materia (el transporte de calor hacia dentro del material y el transporte de agua hacia el exterior).

Existen muchos mecanismos posibles de secado, pero aquellos que controlan el secado de una partícula dependen de su estructura, contenido de humedad inicial, contenido de humedad de equilibrio de la partícula de las condiciones de secado (temperatura, velocidad y humedad relativa del aire), contenido de humedad, dimensiones, superficie expuesta a la velocidad de transferencia, y contenido de humedad de equilibrio de la partícula. Durante el secado con aire bajo condiciones ambientales constantes, la curva de secado puede ser dividida en los siguientes cuatro períodos de velocidad de secado figura 18⁽¹³⁾:

En la figura 18 se muestra los 4 periodos de velocidad de secado.

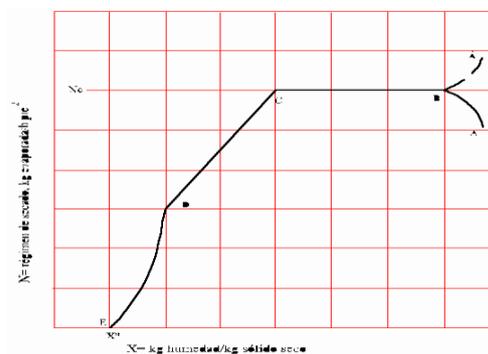


Figura 18 Curva de velocidad de secado vs humedad.

3.7.1 Cálculo de periodo de velocidad constante

Introducción

En el periodo de velocidad constante en la que se elimina el agua de la superficie del producto es igual a la velocidad con que llega desde el interior del mismo, de esta manera la superficie del material se mantiene constantemente mojada, y se comporta como una masa de líquido. Si la transmisión de calor tiene lugar solamente por convección, la temperatura de la superficie del sólido permanece constante e igual a la temperatura húmeda del aire de secado. Esta temperatura puede determinarse mediante un diagrama psicrométrico del aire húmedo. La velocidad de secado permanecerá constante mientras exista agua libre en la totalidad de la superficie del alimento ⁽¹³⁾

Objetivo

- Calcular el valor total de evaporación (VTE)

Requerimientos

Isoterma de absorción del producto a utilizar.

Plátano de seda

Medidor de Bernier

Cuchillo

Termohigrómetro

Secador de bandeja

Procedimiento

Para obtener el valor total de evaporación en una superficie es necesario encontrar los siguientes parámetros:

1. Obtenga el valor de la densidad:

$$(42)^{(4)} \quad \rho_{\text{aire}} = \frac{\text{Masa de aire seco} + \text{masa de humedad}}{Vh}$$

2. Obtenga el valor de h con la ayuda de ecuación 14
3. Determine el valor de calor latente de vaporización (λ_w) para temperatura de bulbo húmedo (Tbh) en el anexo 3
4. Usando la ecuación 9 determine el valor de la velocidad de secado. (Rc)
5. En el anexo 2 entre con temperatura de bulbo seco (Tbs) y humedad relativa del aire (Hr) y obtenga la humedad absoluta (H1).

6. Por lo que la velocidad total de evaporación para una superficie esta dada por:

$$(43)^{(4)} \quad VTE = R_c \cdot A$$

Cálculos

Muestra	A	Rc	VTE
Plátano (65°C)			
Plátano (75°C)			

Ejemplo:

Datos.

°T del aire (65°C)

Área: $9.62 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

$$V_h = (2.83 \times 10^{-3} + 4.56 \times 10^{-3} (H)) \cdot T$$

$$V_h = (2.83 \times 10^{-3} + 4.56 \times 10^{-3} (0.092)) (65 \text{ °C} + 273)$$

$$V_h = 1.021 \text{ m}^3/\text{Kg}$$

$$\rho_{\text{aire}} = \frac{1 + 0.042}{1.021} = 1.020$$

$$G = V \rho$$

$$G = (4.19 \text{ m/s}) (1.020 \text{ Kg/m}^3)$$

$$G = 4.06 \text{ Kg/ms} \times 3600 \text{ s/h}$$

$$G = 15385.68 \text{ Kg/m}^2\text{h}$$

$$h = 0.0204 G^{0.8}$$

$$h = 45.64 \text{ w/m}^2\text{°K}$$

095110305

$$\lambda w = \Delta h$$

$\lambda w = \text{entalpía vapor saturado} - \text{entalpía líquido saturado}$

$$\lambda w = 2583.2 - 188.45$$

$$\lambda w = 2394.75 \text{ (KJ/ Kg)}$$

$$h (T - T_{bh})$$

$$Rc = \frac{\quad}{\quad}$$

$$\lambda w$$

$$(45.64 - \text{KJ/hm}^2\text{°K} (65 - 45) \text{ °K}$$

$$Rc = \frac{\quad}{\quad}$$

$$2394.75 \text{ KJ/Kg}$$

$$R_c = 1.37 \text{ Kg/hm}^2$$

$$VTE = 1.46 \text{ Kg/hm}^2 (9.62 \times 10^{-4} \text{ m}^2)$$

$$VTE = 1.3 \times 10^{-3} \text{ Kg/h}$$

Datos:

°T del aire (75°C)

Área: $9.62 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

$$V_h = (2.83 \times 10^{-3} + 4.56 \times 10^{-3} (H)) \text{ } ^\circ T$$

$$V_h = (2.83 \times 10^{-3} + 4.56 \times 10^{-3} (0.085)) (75 \text{ } ^\circ C + 273)$$

$$V_h = 1.1197$$

$$1 + 0.085$$

$$\rho_{\text{aire}} = \frac{1 + 0.085}{1.1197} = 0.969$$

$$G = V \rho$$

$$G = (4.19 \text{ m/s}) (0.969 \text{ Kg/m}^3)$$

$$G = 4.06 \text{ Kg/ms} \times 3600 \text{ s/h}$$

$$G = 14616.396 \text{ Kg/m}^2\text{h}$$

$$h = 0.0204 G^{0.8}$$

$$h = 43.80 \text{ w/m}^2\text{°K}$$

$$\lambda w \longrightarrow T_w$$

$$X \longrightarrow 53^\circ\text{C}$$

$$X = 2597.38 \text{ (vapor)}$$

$$X = 221.732 \text{ (liquido)}$$

$$\lambda w = \Delta h$$

$\lambda w = \text{entalpía vapor saturado} - \text{entalpía liquido saturado}$

$$\lambda w = 2597.38 - 221.732$$

$$\lambda w = 2375.698 \text{ (KJ/ Kg)}$$

$$h (T - T_w)$$

$$Rc = \frac{\quad}{\quad}$$

$$\lambda w$$

$$(157.66 - \text{KJ/hm}^2\text{°K} (75 - 53) \text{ °K}$$

$$Rc = \frac{\quad}{\quad}$$

$$2375.648 \text{ KJ/Kg}$$

$$Rc = 1.46 \text{ Kg/hm}^2$$

$$\text{VTE} = 1.46 \text{ Kg/hm}^2 (9.62 \times 10^{-4} \text{ m}^2)$$

$$\text{VTE} = 1.4 \times 10^{-3} \text{ Kg/h}$$

Resultados y discusión

Tabla 11. Valores de velocidad de secado y de velocidad total de evaporación a una misma área

Muestra	A	Rc	VTE
Plátano (65°C)	$9.62 \times 10^{-4} \text{ m}^2$	1.37 Kg/hm^2	$1.3 \times 10^{-3} \text{ Kg/h}$
Plátano (75°C)	$9.62 \times 10^{-4} \text{ m}^2$	1.46 Kg/hm^2	$1.4 \times 10^{-3} \text{ Kg/h}$

- ¿Que ocurre con la velocidad de secado al aumentar la temperatura?

Nomenclatura

Vh: volumen húmedo (m^3/Kg sólido seco)

H: humedad del aire (Kg agua/ Kg aire seco)

T: temperatura absoluta ($^{\circ}\text{K}$)

ρ_{aire} : densidad del aire (Kg/m^3)

G: densidad de flujo másico del aire ($\text{Kg}/\text{s m}^2$)

V: velocidad (m/s)

ρ : densidad (m^3/Kg)

λ_w : calor latente del vapor a la temperatura del bulbo (KJ/Kg de agua)

Tbh: temperatura de bulbo húmedo ($^{\circ}$ K)

VTE: velocidad total de evaporación (Kg/h)

Rc: velocidad de secado (Kg/hm²)

A: área (m²)

3.7.2 Cálculo de período de velocidad decreciente

Introducción

El contenido de humedad al final del período de velocidad constante es el contenido de humedad crítico (**X_{cr}**). En este punto la superficie del sólido ya no se encuentra saturada de agua, y la velocidad de secado disminuye con el decrecimiento en el contenido de humedad y el incremento en la temperatura. En el punto final de este período, el film de humedad superficial se ha evaporado completamente y, con el posterior decrecimiento en el contenido de humedad, la velocidad de secado es controlada por la velocidad de movimiento de la humedad dentro del sólido.⁽¹³⁾

Objetivo

- Determinar la velocidad de secado para el régimen de velocidad decreciente.

Procedimiento

1. Anote el peso inicial de la fruta.
2. Coloque la muestra en el secador
3. Registre la variación del peso de la fruta hasta que no exista cambio.

4. Registre el tiempo que transcurrió durante esta etapa de secado.

Los datos se toman del anexo 8 y 15: peso de sólido seco (W_t), humedad inicial (X_o), humedad final (X_f) y el tiempo en el periodo de velocidad decreciente

$$(43)^{(4)} \quad Rd = \frac{W_t(X_o - X_f)}{tbd}$$

Nota: *tbd* se determina experimentalmente, con la grafica.

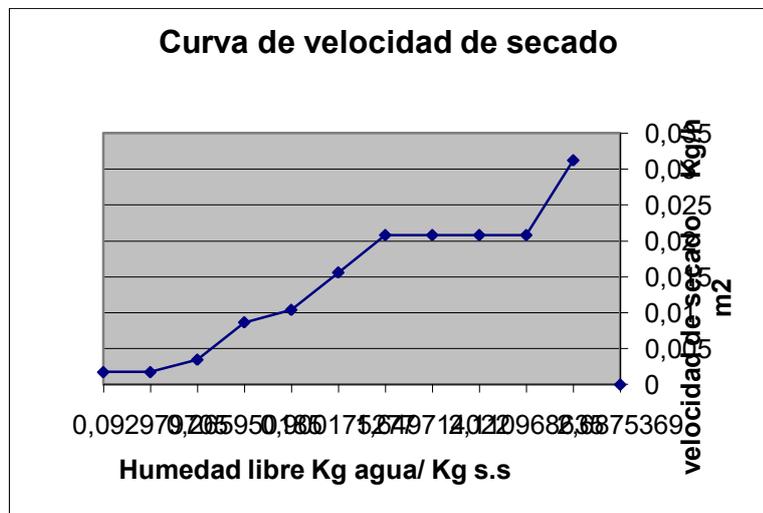


Figura. 19 Curva de velocidad de secado a 65°C

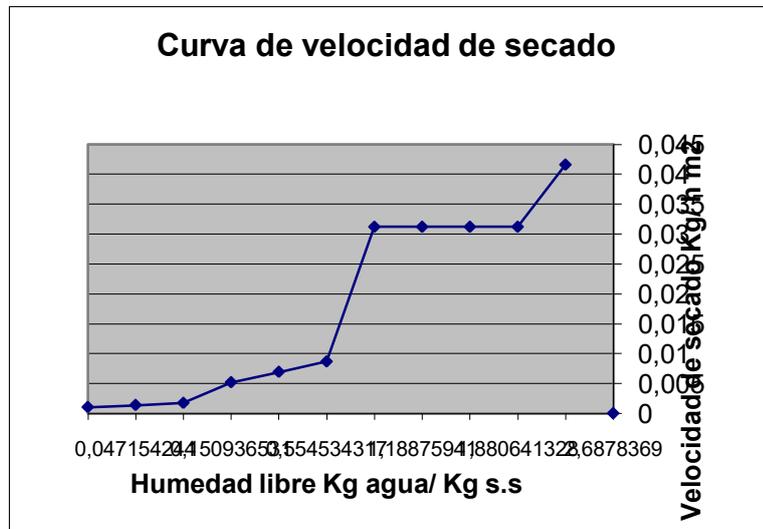


Figura. 20 Curva de velocidad de secado a 75°C

Requerimientos

Isoterma de absorción del producto a utilizar.

Plátano de seda

Medidor de Bernier

Cuchillo

Termohigrómetro

Secador de bandeja

Cálculos

Datos:

°T del aire (65°C)

Peso: 0.0008672 Kg s.s

Xo: 2.687 Kg H₂O/Kg s.s

Xf: 0.0353 Kg H₂O/Kg s.s

Tiempo: 180 min

$$Rd = \frac{Wt(Xo - Xf)}{tbd}$$

$$Rd = \frac{0.0008672(2.6875369 - 0.03532288)}{3}$$

$$Rd = 7.6 \times 10^{-4} \text{ Kg / hm}^2$$

Datos:

°T del aire (75°C)

Peso: 0.0008672 Kg s.s

Xo: 2.687 Kg H₂O/Kg s.s

Xf: 0.0010 Kg H₂O/Kg s.s

Tiempo: 190 min

$$Rd = \frac{Wt(Xo - Xf)}{tbd}$$

$$Rd = \frac{0.0008672(2.6875369 - 0.00102878)}{3.16}$$

$$Rd = 7.3 \times 10^{-4} \text{ Kg / hm}^2$$

Resultados y discusión:

Tabla 12. Valores de velocidad de secado en el periodo
decreciente

Muestra	Rd (65°C)	Rd (75°C)
Plátano	7.6×10^{-4}	7.3×10^{-4}

- Como influye el espesor del sólido en determinar la velocidad de secado en este periodo, aumenta o disminuye a mayor espesor ?. Explique.
- Se podría decidir el tiempo de secado midiendo el espesor del sólido, explique.

Nomenclatura

Wt: peso de sólidos secos (g)

Xo: humedad inicial (Kg agua/Kg sólido seco)

Xf: humedad final (Kg agua/Kg sólido seco)

Tbd: tiempo de secado en el periodo de velocidad decreciente
(h)

H2: humedad en base seca (Kg agua/h)

%H₂O: porcentaje de humedad (%)

3.7.3 Calculo de tiempo de secado

Introduccion

La velocidad con que se seca el producto depende, normalmente, de la rapidez con que se desarrolla la transmisión de calor y la transferencia de materia. El transporte de la cantidad de movimiento esta relacionado con las características de los ventiladores que han de impulsar el aire de secado.

Objetivo

- Determinar el tiempo total de secado el cual consta de dos etapas, el periodo de velocidad constante y el periodo de velocidad decreciente para diferentes frutos.

Requerimientos

Isoterma de absorción del producto a utilizar.

Plátano de seda

Medidor de Bernier

Cuchillo

Termohigrómetro

Secador de bandeja

Procedimiento

1. Regule la perilla 1 de velocidad de aire y la perilla 2 de temperatura (anexo 25).
2. Encienda el equipo presionando el botón verde
3. Coloque la muestra a secar dentro de la canastilla en el equipo.
4. Determine el calor específico del aire húmedo (C_s) del anexo 18
5. Determine la humedad relativa del aire con la ayuda del termohigrómetro.
6. Determine el valor de humedad crítica (X_c) de la figura 19 y 20 según sea el caso.
7. Obtenga los datos requeridos para usar la siguiente fórmula: espesor (z), humedad inicial (X_o) del anexo 8 y 15, humedad crítica (X_c) del anexo 8 y 15, temperatura de bulbo seco (T_{bs}) definida por la temperatura de trabajo y temperatura de bulbo húmedo (T_{bh}) con el termohigrómetro, coeficiente convectivo de transferencia de calor (h) según el procedimiento de la práctica 3.5, factor de forma geométrica (a) que para facilidad de

cálculos se lo considera como la unidad, densidad de flujo másico (G), calor latente de vaporización a la temperatura de bulbo húmedo (λ_w) según el anexo 3.

$$(44)^{(4)} \quad tc = \frac{z\rho_s\lambda_w(X_1 - X_c)}{GC_s(T_{bs} - T_{bh})(1 - \exp(-haz/GC_s))}$$

8. Determine el tiempo de secado para el periodo de velocidad decreciente según la ecuación que sigue: determine la humedad final del producto (X_f) según el anexo 8 y 15.

$$(45)^{(4)} \quad td = \frac{z\rho_s\lambda_w X_c \ln(X_c - X_f)}{GC_s(T_{bs} - T_{bh})(1 - \exp(-haz/GC_s))}$$

$$(49)^{(4)} \quad Tts = tc + td$$

Cálculos

Muestra	Tc(horas)	Td(horas)	Tts(horas)
Plátano(65°C)			
Plátano(75°C)			

Ejemplo

Datos:

°T del aire 65°C

Z: 0.5 cm

X1: 2.6875 Kg H2O/Kg s.s

Xc: 1.41 Kg H2O/Kg s.s

Tbs: 65°C

Tbh: 45°C

h: 45.24 W/m² °K

a: 1m²/m³

G: 4.23 Kg/m² s

ρs: 724.7 Kg/m³

λw :2394.75 KJ/Kg H₂O

$$tc = \frac{z\rho_s\lambda_w(X_1 - X_c)}{GC_s(T_{bs} - T_{bh})(1 - \exp(-haz/GC_s))}$$

$$G = V \rho$$

$$G = 4.23395 \text{ Kg/m}^2\text{s}$$

$$tc = \frac{(5 \times 10^{-3})(724.7)(2394.75)(2.6875 - 1.41)}{(4.23395)(1.015)(65 - 45)(1 - \exp(-(45.24 * 1 * 5 \times 10^{-3}) / (4.23395 * 1.015)))}$$

$$tc = 0.71 \text{ horas}$$

$$td = \frac{z\rho_s\lambda_w X_c \ln(X_c / X_f)}{GC_s(T_{bs} - T_{bh})(1 - \exp(-haz / GC_s))}$$

$$td = \frac{(5 \times 10^{-3})(724.7)(2394.75)(1.41) \ln(1.41 / 0.035322878)}{(4.23395)(1.0175)(65 - 45)(1 - \exp(- (4524 * 1 * 5 \times 10^{-3}) / (4.23395 * 1.0175)))}$$

$$td = 2.89 \text{ horas}$$

$$Tts = tc + td$$

$$Tts = 0.71 + 2.89$$

$$Tts = 3.6 \text{ horas}$$

Datos:

°T del aire 75°C

Z: 0.5 cm

X1: 2.6875 Kg H₂O/Kg s.s

Xc: 0.8428 Kg H₂O/Kg s.s

Tbs: 75°C

Tbh: 53°C

h: 43.80 W/m² °K

a: 1m²/m³

G: 4.06 Kg/m² s

ρ_s: 724.7 Kg/m³

λ_w :2375.64 KJ/Kg H₂O

$$tc = \frac{z\rho_s\lambda_w(X_1 - X_c)}{GC_s(T_{bs} - T_{bh})(1 - \exp(-haz/GC_s))}$$

$$G = V \rho$$

$$G = 4.06 \text{ Kg/m}^2\text{s}$$

$$tc = \frac{(5 \times 10^{-3})(724.7)(2375.648)(2.6878369 - 0.84281)}{(4.06)(1.0165)(75 - 53)(1 - \exp(-(43.80 * 1 * 5 \times 10^{-3})/(4.06 * 1.0165)))}$$

$$tc = 0.94 \text{ horas}$$

$$td = \frac{z\rho_s\lambda_w X_c \ln(X_c / X_f)}{GC_s(T_{bs} - T_{bh})(1 - \exp(-haz/GC_s))}$$

$$td = \frac{(5 \times 10^{-3})(724.7)(2375.65)(0.8428) \ln(0.8428/0.024)}{(4.06)(1.0165)(75 - 53)(1 - \exp(-(43.80 * 1 * 5 \times 10^{-3})/(4.06 * 1.0165)))}$$

$$td = 1.53 \text{ horas}$$

$$Tts = tc + td$$

$$Tts = 0.94 + 1.53$$

$$Tts = 2.47 \text{ horas}$$

Resultado

Tabla 13. Valores del tiempo total de secado

Muestra	Tc(horas)	Td(horas)	Tts(horas)
Plátano(65°C)	0.71	2.89	3.6
Plátano(75°C)	0.94	1.53	2.47

Actividades

- Según su análisis como cree usted que afecta la porosidad del fruto en la determinación del tiempo total de secado, explique.
- Explique como afecta la cantidad de agua del fruto en la determinación del periodo de velocidad constante.

Nomenclatura

Tts: tiempo total de secado (h)

tc: tiempo de secado constante (h)

td: tiempo de secado decreciente (h)

z: dimensión de anchura o espesor (m)

ρ_s : densidad del sólido (m^3/Kg)

λ_w : calor latente de vapor a la temperatura de bulbo húmedo
(KJ/Kg de agua)

X1: concentración inicial (Kg agua/ Kg sólido seco)

Xc: humedad critica (Kg agua/ Kg sólido seco)

G: densidad de flujo másico de aire (Kg/m²h)

C_s: calor específico del aire húmedo (KJ/Kg °K)

T_{bs}: temperatura de bulbo seco (°C)

T_{bh}: temperatura de bulbo húmedo (°C)

h: coeficiente de transmisión de calor por convección

(W/m² °K)

a : factor de forma y superficie específica (m²/m³)

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En un proceso de secado existen factores muy importantes que se pueden variar durante el mismo; pero son solo dos quienes se constituyen en los verdaderos protagonistas del proceso. La temperatura y la velocidad del aire marcan la forma, la calidad y el tiempo en que se llevara a cabo este proceso.

En este secador es posible el secado de frutas sin destruir mayormente la calidad de la misma. La textura de los alimentos es el parámetro de calidad que mas se modifica con la desecación.

La variación en la textura depende también de las condiciones del desecador, por ejemplo, si se usan velocidades de deshidratación rápidas y temperaturas elevadas los cambios serán mas pronunciados que con flujos y temperaturas mas bajas, y es por este motivo que no recomendamos secar a temperaturas superiores a 75 Centígrados. Este fenómeno sucede de la siguiente forma: a medida que el agua va

eliminándose, los solutos se desplazan hacia la superficie del alimento. Si las temperaturas son elevadas la evaporación del agua hace que la concentración de solutos en la superficie aumente lo que conduce a la formación de una capa superficial dura e impenetrable. Este fenómeno se llama acortezamiento y reduce la velocidad de deshidratación dando lugar a un alimento seco en su superficie pero húmedo en su interior.

El calor no sólo provoca el paso del agua a vapor durante la deshidratación, sino también la pérdida de algunos componentes volátiles del alimento.

El incremento en la temperatura produce un incremento en la velocidad de secado y por ende en la velocidad total de evaporación que es la velocidad con la que se seca un área determinada. Un factor importante que limita la temperatura en el proceso de secado es la calidad que se quiere obtener, ya que a temperatura elevadas el producto se quema. Lo que no es conveniente dependiendo de lo que se quiera hacer con el producto seco.

Las condiciones de operación del sistema marcan el proceso de secado y varían dependiendo del objetivo que queramos obtener, es así que

cuando se analiza cada una de las prácticas que se han elaborado en este trabajo observamos que:

Se demuestra claramente en el balance de materia que el incremento de la temperatura aumenta la cantidad de agua que se evapora del producto ya que esta se ve representada con la humedad final que alcanza del aire. Para el primer caso a 65°C comparado con el de 75°C la humedad gana el aire y que es otorgada por el producto es casi la mitad de lo que se evapora a 75°C; este estudio se lo realizo a una misma velocidad de aire.

Para el caso del coeficiente global de transferencia de calor, si la temperatura de trabajo aumenta, disminuye la densidad del aire por lo que el valor de G disminuye si se mantienen constante la velocidad. Al disminuirse el valor de G el valor de h también lo hace ya que son directamente proporcionales, por lo que el tiempo total de secado aumenta.

El aumento de la velocidad del aire en un proceso de secado ocasiona que aumente el flujo del mismo que pasa a través del producto por lo que aumenta el valor del coeficiente global de transferencia de calor. El

inconveniente que se presenta por una velocidad alta es el daño del producto por arrastre en la superficie.

El número de Reynolds como se sabe depende del diámetro, velocidad, densidad, viscosidad y si varían estos factores cambia el número de Reynolds. En función de la temperatura varían la densidad y viscosidad, es así que si aumentan la temperatura, baja la viscosidad y aumenta la densidad lo que a mayor temperatura disminuye el número de Reynolds.

Se realizaron varias pruebas para muestras de plátano igual simetría, contenido de humedad y peso con condiciones de operación diferente.

Tabla del tiempo de secado.

Temperaturas	Velocidades		
	4.19 m/s	5.24 m/s	7.34 m/s
65 °C	240 min.	220 min.	200 min.
75 °C	230 min.	215 min.	180 min.

Con lo que se concluye que para el secado de plátano los mejores parámetros de operación (según a calidad de producto final) son 4.19 m/s de velocidad de aire que se obtiene moviendo la perilla hasta la letra T y ubicando una temperatura de 65 °C, con esto se estima que el tiempo de

secado sea de 4 horas para plátano de seda con 72.9 g de agua/ 100 g de peso de producto de humedad inicial y llegando hasta 0.0353 humedad en base seca.

Seria conveniente dotar de alguna malla o algún accesorio que permita que el flujo de aire se vuelva laminar, para que las condiciones de secado sean más estables.

Analizar la forma y textura inicial de la fruta para según eso tener una idea que cual puede ser la temperatura de referencia para no causar daños graves al producto durante el proceso de secado.

Como medida de precaución cuando el equipo este operando no tocar sin un aislante (guantes) el vidrio de la puerta ya que este se calienta debido a la temperatura del aire.

BIBLIOGRAFÍA

- 1) Alvarado. Juan de Dios, PRINCIPIOS DE INGENIERÍA APLICADOS A ALIMENTOS, Proyecto multinacional de biotecnología y tecnología de alimentos (OEA), Ambato Ecuador 1996, S/N Edición.
- 2) Barbosa Gustavo V. Canovas y Mercado, Humberto. DESHIDRATACIÓN DE ALIMENTOS, Zaragoza- España 2000, Editorial ACRIBIA S.A.
- 3) Barbosa Gustavo V. Canovas. MÉTODOS EXPERIMENTALES DE LA INGENIERÍA ALIMENTARIA, Zaragoza- España 2000, Editorial ACRIBIA S.A.
- 4) Geankopolis, Cristie J. PROCESOS DE TRANSPORTE Y OPERACIONES UNITARIAS, Prentice – May, Inc., México, 1998, Tercera Edición.

- 5) http://es.wikipedia.org/wiki/Switch#Interconexi.C3.B3n_de_switches_y_bridges
- 6) <http://inicia.es/de/vuelo/SIF/SIF35.html>
- 7) <http://www.monografias.com/trabajos10/semi/semi.shtml>
- 8) <http://www.sc.ehu.es/nmw migaj/SECADERO.htm#o>
- 9) Hutte, MANUAL DEL INGENIERO DE TALLER, editorial Gustavo Gili. S.A., Barcelona España 1978, tomo 1.
- 10) Iglesias, Héctor A. Handbook of food isotherms: water sorption parameterd for food and food components.
- 11) Kern, Donal. PROCESOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR, Mc Graw Hill Book Company, México, séptima impresión en Español.
- 12) Perry, R. Chemical Engineers' Handbook, McGraw-Hill, Nueva York 1973, quinta edición.

13) Sporn, Philip. VISTAS IN ELECTRIC POWER, Pergamon Press. Inc, 1968, .primera edición.

14) Treybal, Robert. E. Operaciones de transferencia de masa, Editorial Mc Graw Hill, México 1990, segunda edición.

Anexo 1

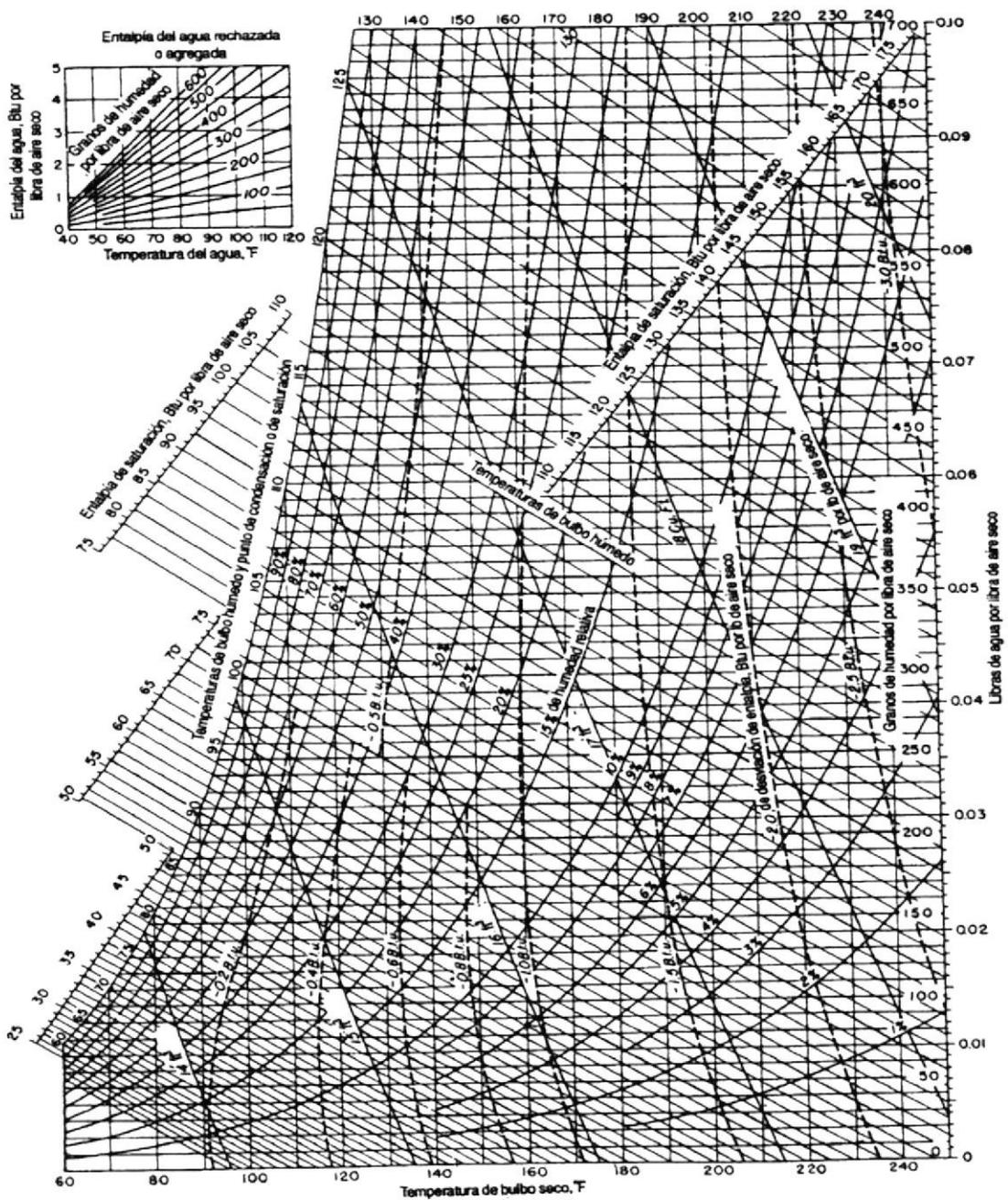
NUMERO DE COCIM	NUMERO DE COCIM	NOMBRE DEL ALIMENTO	CONTENIDO NUTRITIVO EN 100 GRAMOS, PORCION APROVECHABLE														
			HUMEDAD	CALORIAS	PROTEINA	EXTRACTO ETÉRICO	CARBOHIDRATOS		CENIZA	CALCIO	FOSFORO	NIETRO	CAROTENO	TIAMINA	RIBOFLAV	NICOTINA	ACIDO ASCORBICO
							TOTALES	FIBRA									
g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	g	
321	(1)	Plátano dominico (verde)	55.4	159	1.3	.3	42.3	.4	.7	7	36	1.6	1.06	.04	.04	.44	25
322	(2)	Platano dominico (maduro)	60.3	142	1.1	.3	37.7	.4	.6	4	28	.8	1.42	.05	.02	.51	24
323	(1)	Platano hartón (verde)	59.7	143	1.1	.2	38.3	.3	.7	8	27	2.0	1.50	.04	.02	.52	39
324	(3)	Plátano maqueño	64.6	126	1.2	.3	33.2	.4	.7	6	25	7	1.07	.05	.04	.63	23
325	(1)	Platano blanco limeño	77.0	81	.8	.1	21.5	.4	.6	10	16	9	14	.03	.02	.66	9
326	(2)	Platano orito maduro	68.9	111	1.2	.2	29.2	.6	.5	6	21	.7	.30	.02	.03	.57	16
327	(1)	Platano otavo	66.1	120	1.1	.1	32.1	.4	.6	9	19	1.1	2.05	.04	.03	.67	28
328	(3)	Plátano rosado	73.1	95	1.1	.2	24.9	.4	.7	12	17	1.1	.48	.02	.03	.54	9
329	(1)	Plátano rosado blanco	74.8	89	1.1	.2	23.3	.4	.6	12	16	2.0	.73	.02	.02	.48	7
330	(3)	Platano de seda (verde)	68.7	110	1.3	.1	29.1	.4	.8	10	45	1.6	.56	.04	.02	.54	24
331	(1)	Plátano de seda (maduro)	72.9	96	1.2	.3	24.9	.3	.7	13	19	.7	.22	.02	.02	.80	13
332	(1)	Plátano de seda (deshidratado)	19.0	290	3.3	1.2	74.7	1.0	1.8	17	64	8.6	.41	.02	.21	1.50	-
333	(4)	Sandía	93.3	24	.7	.1	5.7	.1	.2	7	12	.5	.07	.02	.02	.17	8
334	(4)	Zapote	86.6	48	.7	.2	12.1	.7	.4	19	26	.4	.91	.04	.04	.27	12
335	(3)	Tamarindo	29.6	249	1.9	.8	65.5	3.3	2.2	93	119	9.0	.01	.41	.19	1.35	10
336	(1)	Taxo	89.7	36	.8	.3	8.7	.1	.5	6	21	8	2.07	.00	.06	2.99	52
337	(2)	Taxo silvestre	89.1	37	1.1	.1	9.0	.4	.7	17	20	1.7	2.02	.00	.05	3.44	35
338	(7)	Tomate de árbol	86.7	48	2.0	.6	10.1	2.0	.6	9	41	9	.67	.10	.03	1.07	29
339	(3)	Toronja	90.4	26	.6	.1	8.6	.2	.3	20	18	3	.01	.04	.01	.25	49
340	(4)	Tuna blanca	80.7	69	.9	.2	17.9	5.0	.3	26	28	.5	.06	.00	.02	.33	22
341	(1)	Tuna rosada	81.8	66	1.0	.4	16.5	5.4	.3	29	25	.4	.02	.00	.02	.31	30
342	(1)	Uva	80.5	71	.5	.5	18.1	1.6	.4	16	23	1.2	.05	.05	.01	.21	4
343	(3)	Uvilla	79.4	72	1.3	.3	18.1	5.1	.9	10	50	1.7	2.00	.10	.03	2.15	43
TUBERCULOS Y RAICES																	
344	(1)	Achira	66.8	123	.9	.1	31.3	.5	.9	15	63	1.4	.01	.03	.01	.45	7
345	(2)	Camote amarillo	75.3	93	.8	.4	22.8	.8	.7	20	49	.8	.01	.09	.02	.62	36
346	(1)	Camote blanco	67.2	122	.8	.1	31.0	.8	.9	14	66	1.1	.01	.13	.02	.60	29
347	(3)	Camote morado	69.0	114	1.1	.1	28.8	1.1	1.0	19	50	2.1	.03	.11	.03	.70	48
348	(3)	Camote papa	65.6	128	1.3	.2	32.1	.9	.8	23	58	1.1	.06	.07	.04	.93	48

Anexo 2



Carta Psicrometrica

CIB-ESPOL



Anexo 3



Propiedades del vapor saturado y del agua

Tempe- de rotura vapor (°Q)	Presión (kPa)	Volumen específico (m ³ /kg)		Entalpia (U/kg)		Entropia (kJ/kg -K)	
		Líquido	Vapor saturado	Líquido	Vapor saturado.	Líquido	Vapor saturado
0.01	0.6113	0.0010002	206.136	0.00	2501.4	0.0000	9.1562
3	0.7577	0.0010001	168.132	12.57	2506.9	0.0457	9.0773
6	0.9349	0.0010001	137.734	25.20	2512.4	0.0912	9.0003
9	1.1477	0.0010003	113.386	37.80	2517.9	0.1362	8.9253
12	1.4022	0.0010005	93.784	50.41	2523.4	0.1806	8.8524
15	1.7051	0.0010009	77.926	62.99	2528.9	0.2245	8.7814
18	2.0640	0.0010014	65.038	75.58	2534.4	0.2679	8.7123
21	2.487	0.0010020	54.514	88.14	2539.9	0.3109	8.6450
24	2.985	0.0010027	45.883	100.70	2545.4	0.3534	8.5794
25	3.169	0.0010029	43.360	140.89	2547.7	0.3674	8.5580
27	3.567	0.0010035	38.774	113.25	2550.8	0.3954	8.5156
30	4.246	0.0010043	32.894	125.79	2556.3	0.4369	8.4533
33	5.034	0.0010053	28.011	138.33	2561.7	0.4781	8.3927
36	5.947	0.0010063	23.940	150.86	2567.1	0.5188	8.3336
40	7.384	0.0010078	19.523	167.57	2574.3	0.5725	8.2570
45	9.593	0.0010099	15.258	188.45	2583.2	0.6387	8.1648
50	12.349	0.0010121	12.032	209.33	2592.1	0.7038	8.0763
55	15.758	0.0010146	9.568	230.23	2600.9	0.7679	7.9913
60	19.940	0.0010172	7.671	251.13	2609.6	0.8312	7.9096
65	25.03	0.0010199	6.197	272.06	2618.3	0.8935	7.8310
70	31.19	0.0010228	5.042	292.98	2626.8	0.9549	7.7553
75	38.58	0.0010259	4.131	313.93	2635.3	1.0155	7.6824
80	47.39	0.0010291	3.407	334.91	2643.7	1.0753	7.6122
85	57.83	0.0010325	2.828	355.90	2651.9	1.1343	7.5445
90	70.14	0.0010360	2.361	376.92	2660.1	1.1925	7.4791
95	84.55	0.0010397	1.9819	397.96	2668.1	1.2500	7.4159
100	101.35	0.0010435	1.6729	419.04	2676.1	1.3069	7.3549

Anexo 4

Temperatura de aire: 65°C

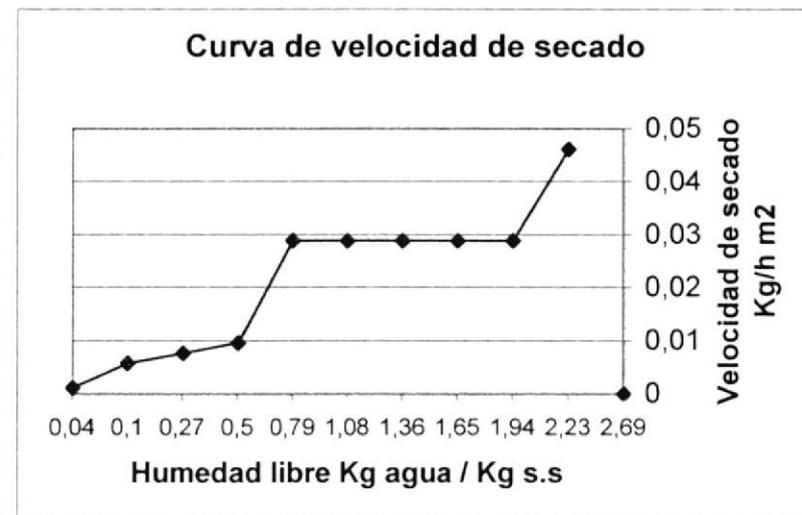
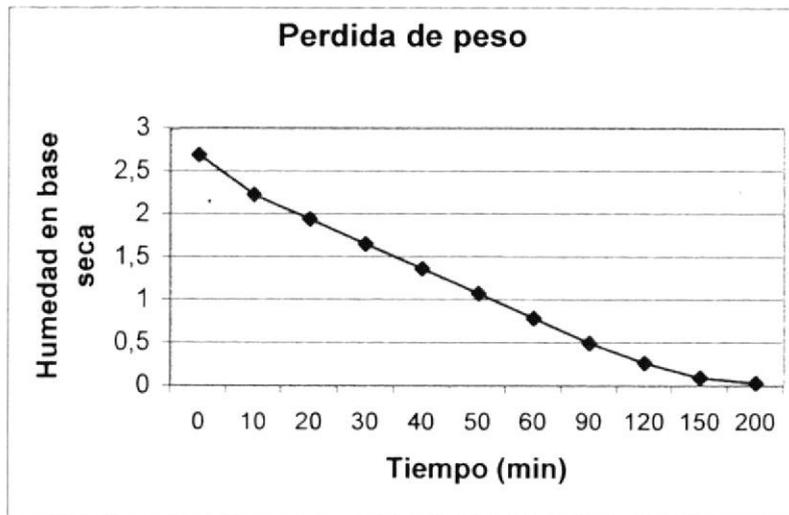
Velocidad de aire: 7.34 m/s

Humedad relativa: 32%

Tiempo (min)	Peso inicial de muestra	Peso final de la muestra (gramos)	perdida de peso	Cantidad de agua presente	humedad en base seca	humedad de equilibrio	humedad real en base seca	pendiente de grafica de humedad	velocidad de secado
0	3,2	3,2	0	2,3328	2,6900369	0,0025	2,6875369	0	0
10	3,2	2,8	0,4	1,9328	2,22878229	0,0025	2,22628229	0,04612546	0,04158004
20	3,2	2,55	0,25	1,6828	1,94049815	0,0025	1,93799815	0,02882841	0,02598753
30	3,2	2,3	0,25	1,4328	1,65221402	0,0025	1,64971402	0,02882841	0,02598753
40	3,2	2,05	0,25	1,1828	1,36392989	0,0025	1,36142989	0,02882841	0,02598753
50	3,2	1,8	0,25	0,9328	1,07564576	0,0025	1,07314576	0,02882841	0,02598753
60	3,2	1,55	0,25	0,6828	0,78736162	0,0025	0,78486162	0,02882841	0,02598753
90	3,2	1,3	0,25	0,4328	0,49907749	0,0025	0,49657749	0,00960947	0,00866251
120	3,2	1,1	0,2	0,2328	0,26845018	0,0025	0,26595018	0,00768758	0,00693001
150	3,2	0,95	0,15	0,0828	0,0954797	0,0025	0,0929797	0,00576568	0,00519751
200	3,2	0,9	0,05	0,0328	0,03782288	0,0025	0,03532288	0,00115314	0,0010395

Anexo 5

Graficas realizadas con el anexo 4



Anexo 6

Temperatura de aire: 65°C

Velocidad de aire: 5.24 m/s

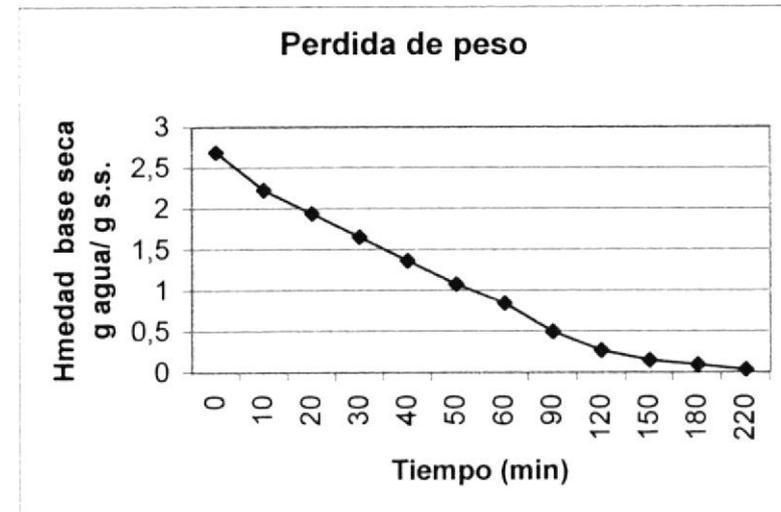
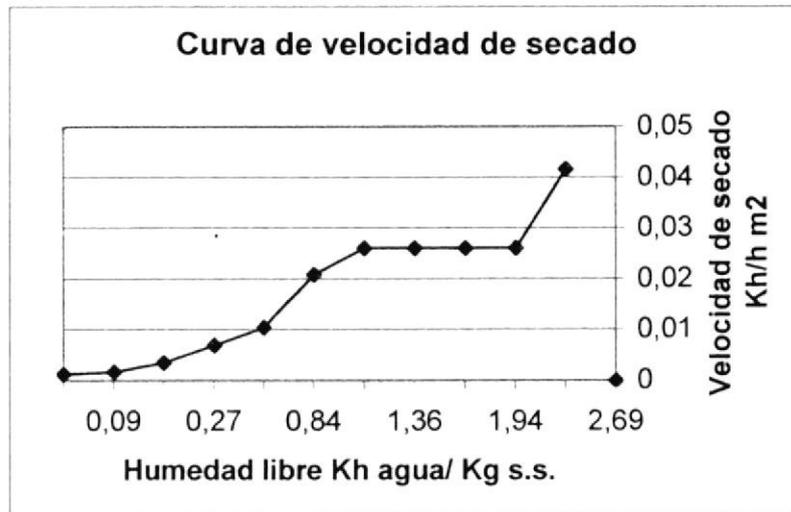
Humedad relativa : 32%

Tiempo (min)	Peso inicial de muestra	Peso final de la muestra (gramos)	perdida de peso	cantidad de agua presente	humedad en base seca	humedad de equilibrio	humedad real en base seca	pendiente de grafica de humedad	velocidad de secado
0	3,2	3,2	0	2,3328	2,6900369	0,0025	2,6875369	0	0
10	3,2	2,8	0,4	1,9328	2,22878229	0,0025	2,22628229	0,04612546	0,04158004
20	3,2	2,55	0,25	1,6828	1,94049815	0,0025	1,93799815	0,02882841	0,02598753
30	3,2	2,3	0,25	1,4328	1,65221402	0,0025	1,64971402	0,02882841	0,02598753
40	3,2	2,05	0,25	1,1828	1,36392989	0,0025	1,36142989	0,02882841	0,02598753
50	3,2	1,8	0,25	0,9328	1,07564576	0,0025	1,07314576	0,02882841	0,02598753
60	3,2	1,6	0,2	0,7328	0,84501845	0,0025	0,84251845	0,02306273	0,02079002
90	3,2	1,3	0,3	0,4328	0,49907749	0,0025	0,49657749	0,01153137	0,01039501
120	3,2	1,1	0,2	0,2328	0,26845018	0,0025	0,26595018	0,00768758	0,00693001
150	3,2	1	0,1	0,1328	0,15313653	0,0025	0,15063653	0,00384379	0,003465
180	3,2	0,95	0,05	0,0828	0,0954797	0,0025	0,0929797	0,00192189	0,0017325
220	3,2	0,9	0,05	0,0328	0,03782288	0,0025	0,03532288	0,00144142	0,00129938



Anexo 7

Graficas realizadas con el anexo 6



Anexo 8

Temperatura de aire: 65°C

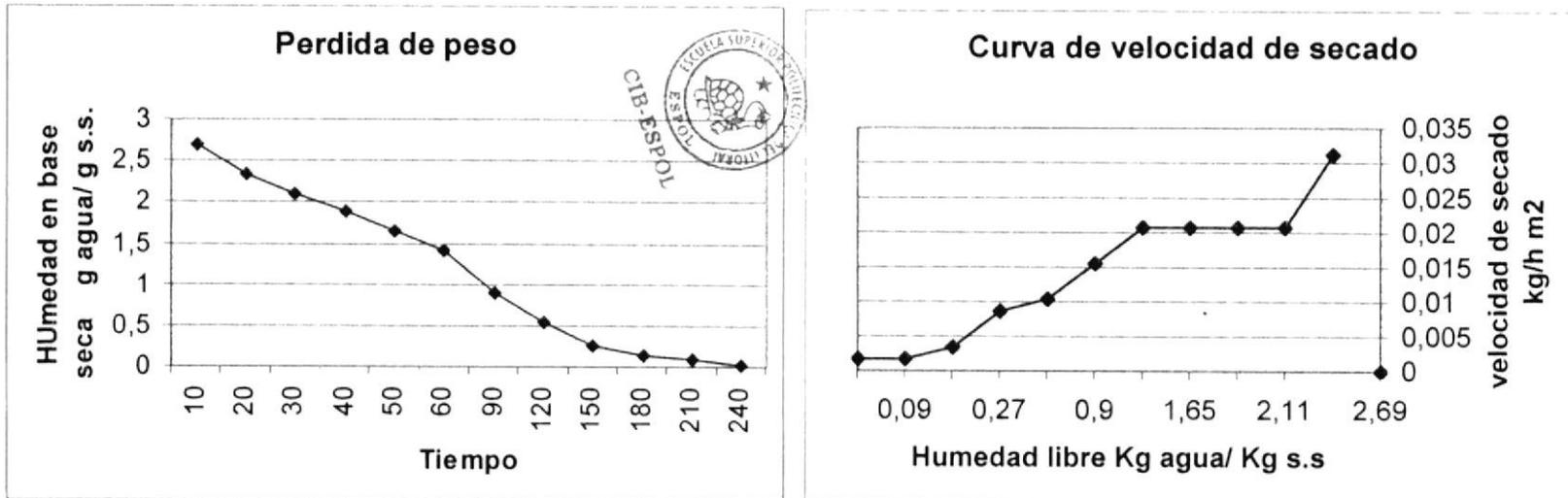
Velocidad de aire: 4.19 m/s

Humedad relativa: 32%

Tiempo (min)	Peso inicial de muestra	Peso final de la muestra (gramos)	perdida de peso	cantidad de agua presente	humedad en base seca	humedad de equilibrio	humedad real en base seca	pendiente de grafica de humedad	velocidad de secado	$(x-X_s)/(X_o-X_s)$
10	3,2	3,2	0	2,3328	2,6900369	0,0025	2,6875369	0	0	1
20	3,2	2,9	0,3	2,0328	2,344095941	0,0025	2,341595941	0,034594096	0,031185031	0,87127955
30	3,2	2,7	0,2	1,8328	2,113468635	0,0025	2,110968635	0,023062731	0,020790021	0,785465917
40	3,2	2,5	0,2	1,6328	1,882841328	0,0025	1,880341328	0,023062731	0,020790021	0,699652283
50	3,2	2,3	0,2	1,4328	1,652214022	0,0025	1,649714022	0,023062731	0,020790021	0,61383865
60	3,2	2,1	0,2	1,2328	1,421586716	0,0025	1,419086716	0,023062731	0,020790021	0,528025016
90	3,2	1,65	0,45	0,7828	0,902675277	0,0025	0,900175277	0,017297048	0,015592516	0,334944341
120	3,2	1,35	0,3	0,4828	0,556734317	0,0025	0,554234317	0,011531365	0,01039501	0,206223891
150	3,2	1,1	0,25	0,2328	0,268450185	0,0025	0,265950185	0,009609471	0,008662509	0,098956849
180	3,2	1	0,1	0,1328	0,153136531	0,0025	0,150636531	0,003843788	0,003465003	0,056050033
210	3,2	0,95	0,05	0,0828	0,095479705	0,0025	0,092979705	0,001921894	0,001732502	0,034596624
240	3,2	0,9	0,05	0,0328	0,037822878	0,0025	0,035322878	0,001921894	0,001732502	0,013143216

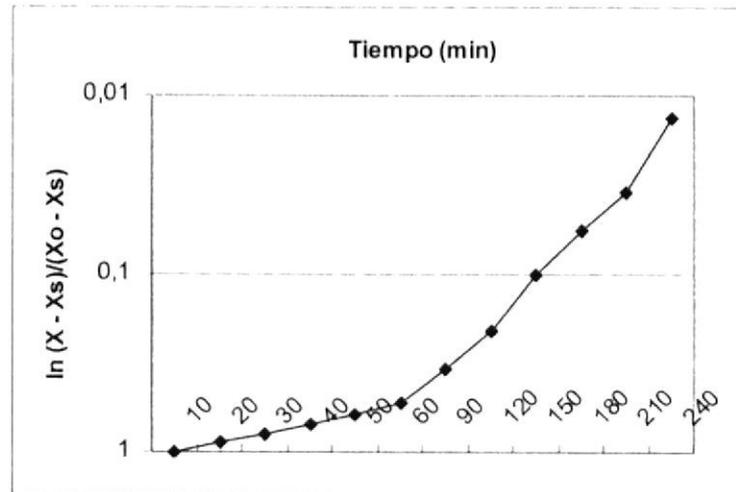
Anexo 9

Graficas realizadas con el anexo 8



Anexo 10

Graficas realizadas con el anexo 8



Anexo 11

Temperatura de aire: 75°C

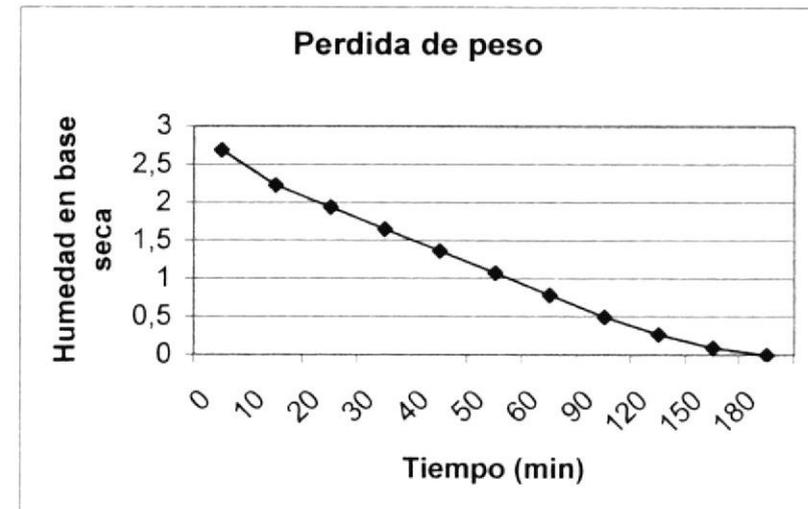
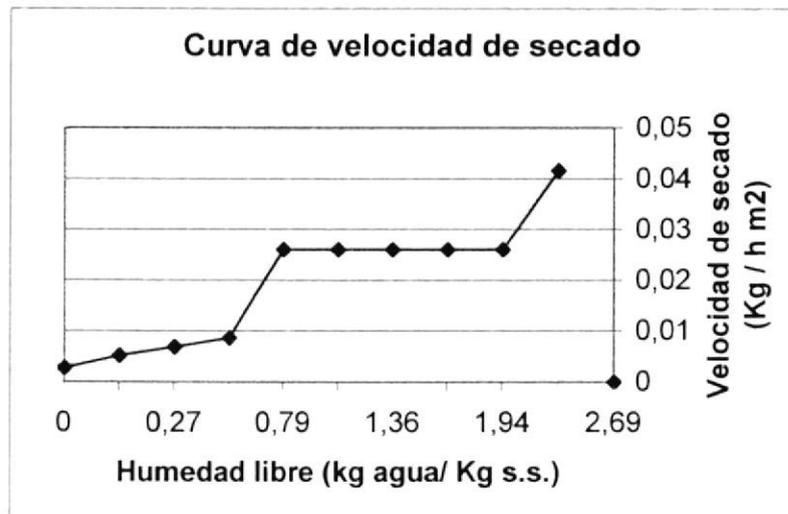
Velocidad de aire: 7.34 m/s

Humedad relativa: 30%

Tiempo (min)	Peso inicial de muestra	Peso final de la muestra (gramos)	perdida de peso	cantidad de agua presente	humedad en base seca	humedad de equilibrio	humedad real en base seca	pendiente de grafica de humedad libre	velocidad de secado
0	3,2	3,2	0	2,3328	2,6900369	0,0022	2,6878369	0	0
10	3,2	2,8	0,4	1,9328	2,22878229	0,0022	2,22658229	0,04612546	0,04158004
20	3,2	2,55	0,25	1,6828	1,94049815	0,0022	1,93829815	0,02882841	0,02598753
30	3,2	2,3	0,25	1,4328	1,65221402	0,0022	1,65001402	0,02882841	0,02598753
40	3,2	2,05	0,25	1,1828	1,36392989	0,0022	1,36172989	0,02882841	0,02598753
50	3,2	1,8	0,25	0,9328	1,07564576	0,0022	1,07344576	0,02882841	0,02598753
60	3,2	1,55	0,25	0,6828	0,78736162	0,0022	0,78516162	0,02882841	0,02598753
90	3,2	1,3	0,25	0,4328	0,49907749	0,0022	0,49687749	0,00960947	0,00866251
120	3,2	1,1	0,2	0,2328	0,26845018	0,0022	0,26625018	0,00768758	0,00693001
150	3,2	0,95	0,15	0,0828	0,0954797	0,0022	0,0932797	0,00576568	0,00519751
180	3,2	0,87	0,08	0,0028	0,00322878	0,0022	0,00102878	0,00307503	0,002772

Anexo 12

Graficas realizadas con el anexo 11



Anexo 13

Temperatura de aire: 75°C

Velocidad de aire: 5.24 m/s

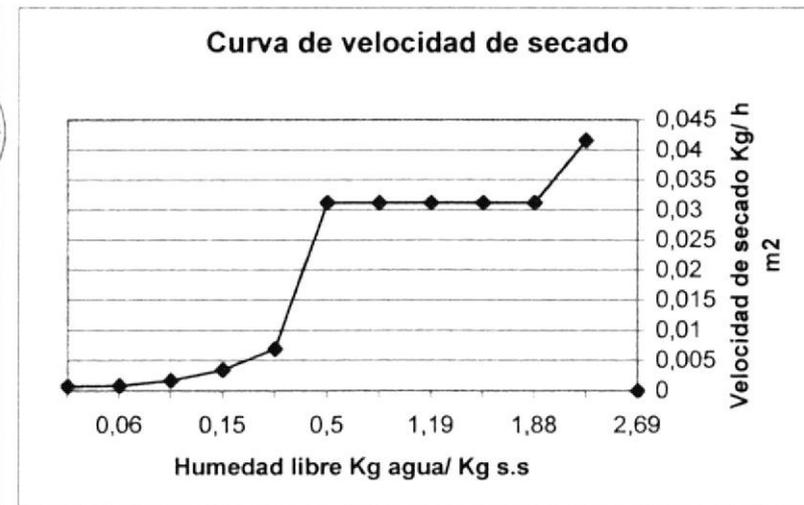
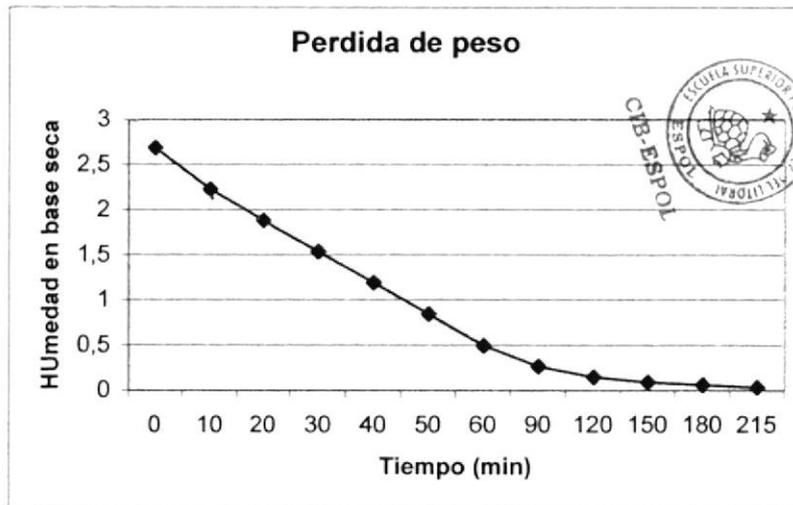
Humedad relativa: 30%



Tiempo (min)	Peso inicial de muestra	Peso final de la muestra (gramos)	perdida de peso	cantidad de agua presente	humedad en base seca	humedad de equilibrio	humedad real en base seca	pendiente de grafica de humedad libre	velocidad de secado
0	3,2	3,2	0	2,3328	2,6900369	0,0022	2,6878369	0	0
10	3,2	2,8	0,4	1,9328	2,22878229	0,0022	2,22658229	0,04612546	0,04158004
20	3,2	2,5	0,3	1,6328	1,88284133	0,0022	1,88064133	0,0345941	0,03118503
30	3,2	2,2	0,3	1,3328	1,53690037	0,0022	1,53470037	0,0345941	0,03118503
40	3,2	1,9	0,3	1,0328	1,19095941	0,0022	1,18875941	0,0345941	0,03118503
50	3,2	1,6	0,3	0,7328	0,84501845	0,0022	0,84281845	0,0345941	0,03118503
60	3,2	1,3	0,3	0,4328	0,49907749	0,0022	0,49687749	0,0345941	0,03118503
90	3,2	1,1	0,2	0,2328	0,26845018	0,0022	0,26625018	0,00768758	0,00693001
120	3,2	1	0,1	0,1328	0,15313653	0,0022	0,15093653	0,00384379	0,003465
150	3,2	0,95	0,05	0,0828	0,0954797	0,0022	0,0932797	0,00192189	0,0017325
180	3,2	0,925	0,025	0,0578	0,06665129	0,0022	0,06445129	0,00096095	0,00086625
215	3,2	0,9	0,025	0,0328	0,03782288	0,0022	0,03562288	0,00082367	0,0007425

Anexo 14

Graficas realizadas con el anexo 13



Anexo 15

Temperatura de aire: 75°C

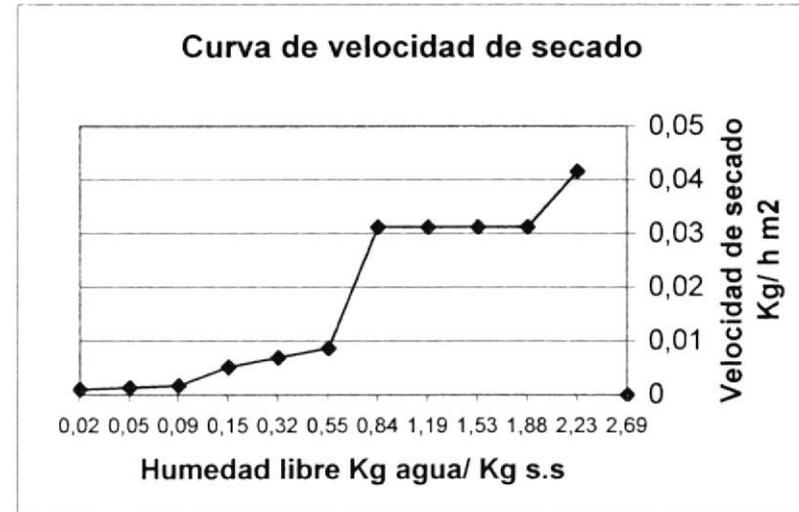
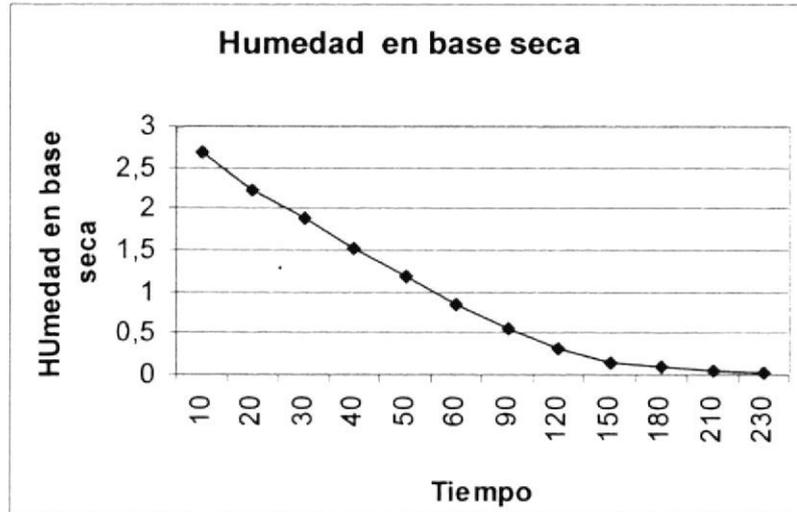
Velocidad de aire: 4.19 m/s

Humedad relativa: 30%

Tiempo (min)	Peso inicial de muestra	Peso final de la muestra (gramos)	perdida de peso	cantidad de agua presente	humedad en base seca	humedad de equilibrio	humedad real en base seca	pendiente de grafica de humedad	velocidad de secado	$(X - X_s) / (X_o - X_s)$
10	3,2	3,2	0	2,3328	2,6900369	0,0022	2,6878369	0	0	1
20	3,2	2,8	0,4	1,9328	2,22878229	0,0022	2,22658229	0,04612546	0,04158004	0,82839189
30	3,2	2,5	0,3	1,6328	1,88284133	0,0022	1,88064133	0,0345941	0,03118503	0,69968581
40	3,2	2,2	0,3	1,3328	1,53690037	0,0022	1,53470037	0,0345941	0,03118503	0,57097972
50	3,2	1,9	0,3	1,0328	1,19095941	0,0022	1,18875941	0,0345941	0,03118503	0,44227364
60	3,2	1,6	0,3	0,7328	0,84501845	0,0022	0,84281845	0,0345941	0,03118503	0,31356756
90	3,2	1,35	0,25	0,4828	0,55673432	0,0022	0,55453432	0,00960947	0,00866251	0,20631249
120	3,2	1,15	0,2	0,2828	0,32610701	0,0022	0,32390701	0,00768758	0,00693001	0,12050843
150	3,2	1	0,15	0,1328	0,15313653	0,0022	0,15093653	0,00576568	0,00519751	0,05615539
180	3,2	0,95	0,05	0,0828	0,0954797	0,0022	0,0932797	0,00192189	0,0017325	0,03470438
210	3,2	0,91	0,04	0,0428	0,04935424	0,0022	0,04715424	0,00153752	0,001386	0,01754357
230	3,2	0,89	0,02	0,0228	0,02629151	0,0022	0,02409151	0,00115314	0,0010395	0,00896316

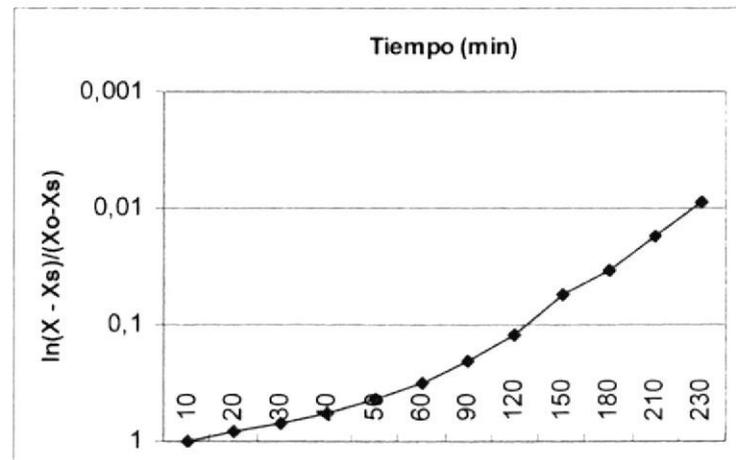
Anexo 16

Graficas realizadas con el anexo 15



Anexo 17

Graficas realizadas con el anexo 15



Anexo 18



Propiedades físicas del aire seco a presión atmosférica

Temp. (°C)	Densidad (kg/m ³)	β ($\times 10^{-3} K^{-1}$)	c_p (kJ/kg K)	k (W/m K)	α ($\times 10^{-6} m^2/s$)	η ($\times 10^{-6} Pa s$)	ν ($\times 10^{-6} m^2/s$)
-20	1,365	3,97	1,005	0,0226	16,8	16,279	12,0
0	1,252	3,65	1,011	0,0237	19,2	17,456	13,9
10	1,206	3,53	1,010	0,0244	20,7	17,848	14,7
20	1,164	3,41	1,012	0,0251	22,0	18,240	15,7
30	1,127	3,30	1,013	0,0258	23,4	18,682	16,6
40	1,092	3,20	1,014	0,0265	24,8	19,123	17,6
50	1,057	3,10	1,016	0,0272	26,2	19,515	18,6
60	1,025	3,00	1,017	0,0279	27,6	19,907	19,4
70	0,996	2,91	1,018	0,0286	29,2	20,398	20,7
80	0,968	2,83	1,019	0,0293	30,6	20,790	21,5
90	0,942	2,76	1,021	0,0300	32,2	21,231	22,8
100	0,916	2,69	1,022	0,0307	33,6	21,673	23,6
120	0,870	2,55	1,025	0,0320	37,0	22,555	25,9
140	0,827	2,43	1,027	0,0333	40,0	23,340	28,2
160	0,789	2,31	1,030	0,0344	43,3	24,124	30,6
180	0,755	2,20	1,032	0,0357	47,0	24,909	33,0
200	0,723	2,11	1,035	0,0370	49,7	25,693	35,5
250	0,653	1,89	1,043	0,0400	60,0	27,557	42,2

β es el coeficiente de expansión térmica volumétrica, c_p es el calor específico, k es la conductividad térmica, α es la difusividad térmica, η es la viscosidad absoluta y ν es la viscosidad cinemática.

Anexo 19

Propiedades físicas del agua a la presión de saturación

Temp. (°C)	Densidad (kg/m ³)	β ($\times 10^{-4}$ K ⁻¹)	c_p (kJ/kg K)	k (W/m K)	α ($\times 10^{-6}$ m ² /s)	η ($\times 10^{-6}$ Pa s)	ν ($\times 10^{-6}$ m ² /s)
0	999,9	-0,7	4,226	0,558	0,151	1,793,64	1,79
5	1,000,0		4,206	0,568	0,135	1,534,74	1,54
10	999,7	0,95	4,195	0,577	0,137	1,296,44	1,30
15	999,1		4,187	0,587	0,141	1,135,61	1,15
20	998,2	2,1	4,182	0,597	0,143	993,41	1,01
25	997,1		4,178	0,606	0,146	880,64	0,88
30	995,7	3,0	4,176	0,615	0,149	792,38	0,81
35	994,1		4,175	0,624	0,150	719,81	0,73
40	992,2	3,9	4,175	0,633	0,151	658,03	0,66
45	990,2		4,176	0,640	0,155	605,07	0,61
50	988,1	4,6	4,178	0,647	0,157	555,06	0,56
55	985,7		4,179	0,652	0,158	509,95	0,52
60	983,2	5,3	4,181	0,658	0,159	471,65	0,48
65	980,6		4,184	0,663	0,161	435,42	0,44
70	977,8	5,8	4,187	0,668	0,163	404,03	0,42
75	974,9		4,190	0,671	0,164	376,58	0,37
80	971,8	6,3	4,194	0,673	0,165	352,06	0,36
85	968,7		4,198	0,676	0,166	328,52	0,34
90	965,3	7,0	4,202	0,678	0,167	308,91	0,33
95	961,9		4,206	0,680	0,168	292,24	0,31
100	958,4	7,5	4,211	0,682	0,169	277,53	0,29
110	951,0	8,0	4,224	0,684	0,170	254,97	0,27
120	943,5	8,5	4,232	0,685	0,171	235,36	0,24
130	934,8	9,1	4,250	0,686	0,172	211,82	0,23
140	926,3	9,7	4,257	0,684	0,172	201,04	0,21
150	916,9	10,3	4,270	0,684	0,173	185,35	0,20

160	907.6	10.8	4.285	0.680	0.173	171.62	0.19
170	897.5	11.5	4.396	0.679	0.172	162.29	0.18
180	886.6	12.1	4.396	0.673	0.172	152.00	0.17
190	876.0	12.8	4.480	0.670	0.171	145.14	0.17
200	862.8	13.5	4.501	0.665	0.170	139.25	0.16
210	852.8	14.3	4.560	0.655	0.168	131.41	0.15
220	837.0	15.2	4.605	0.652	0.167	124.54	0.15
230	827.3	16.2	4.690	0.637	0.164	119.64	0.15
240	808.0	17.2	4.731	0.634	0.162	113.76	0.14
250	799.2	18.6	4.857	0.618	0.160	109.83	0.14

β es el coeficiente de expansión térmica volumétrica, c_p es el calor específico, k es la conductividad térmica, α es la difusividad térmica, η es la viscosidad absoluta y ν es la viscosidad cinemática.

Medidas de volumen

Sólidos:

1 728 pulgadas cúbicas (pulg³) = 1 pie cúbico (pie³),
27 pies cúbicos = 1 yarda cúbica (yd³)

Medidas para áridos:

2 pintas = 1 cuarto
8 cuartos = 1 peck
4 pecks = 1 bushel
1 bushel Winchester
de Estados Unidos = 2 150.42 pulgadas cúbicas

Líquidos:

4 gills = 1 pinta (pt)
2 pintas = 1 cuarto
4 cuartos = 1 galón (gal)
7.4805 galones = 1 pie cúbico

Medidas farmacéuticas para líquidos:

60 minims (℥) = 1 dracma de fluidos
8 dracmas (ʒ) = 1 onza fluida
16 onzas (oz. ʒ) = 1 pinta

Pesos avoirdupois

16 dracmas = 437.5 granos = 1 onza (oz)
16 onzas = 7 000 granos = 1 libra (lb)
100 libras = 1 quintal
2 000 libras = 1 tonelada corta
2 240 libras = 1 tonelada larga

Pesos troy

24 granos = 1 pennyweight (pwt)
20 pennyweights = 1 onza (oz)
12 onzas = 1 libra (lb)

Pesos farmacéuticos

20 granos (gr) = 1 escrúpulo (ʒ)
3 escrúpulos = 1 dracma (ʒ)
8 dracmas = 1 onza (ʒ)
12 onzas = 1 libra (lb)

Anexo 21

Factores de Conversión

Para pasar de	A	Multiplíquese por
<i>h</i> = coeficiente de transferencia del calor		
u.c.c. / (h)(pie ²)(°C)	B.t.u. / (h)(pie ²)(°F)	1
kg-cal / (h)(m ²)(°C)	B.t.u. / (h)(pie ²)(°F)	0.2048
g-cal / (s)(cm ²)(°C)	B.t.u. / (h)(pie ²)(°F)	7 380
watts / (cm ²)(°C)	B.t.u. / (h)(pie ²)(°F)	1 760
watts / (pulg ²)(°F)	B.t.u. / (h)(pie ²)(°F)	490
B.t.u. / (h)(pie ²)(°F)	u.c.c. / (h)(pie ²)(°C)	1
B.t.u. / (h)(pie ²)(°F)	kg-cal / (h)(m ²)(°C)	4.88
B.t.u. / (h)(pie ²)(°F)	g-cal / (s)(cm ²)(°C)	0.0001355
B.t.u. / (h)(pie ²)(°F)	watts / (cm ²)(°C)	0.000568
B.t.u. / (h)(pie ²)(°F)	watts / (pulg ²)(°F)	0.00204
B.t.u. / (h)(pie ²)(°F)	hp / (pie ²)(°F)	0.000394
B.t.u. / (h)(pie ²)(°F)	joules / (s)(cm ²)(°C)	5.678
kg-cal / (h)(m ²)(°C)	joules / (s)(m ²)(°C)	1.163
watts / (m ²)(°C)	joules / (s)(m ²)(°C)	1.0
<i>μ</i> = viscosidad		
centipoises	g / (s)(cm) o poise	0.01
centipoises	lb / (s)(pie)	0.000672
centipoises	lb / (h)(pie)	2.42
centipoises	kg / (h)(m)	3.60
centipoises	(newton) / (s) / m ²	0.001
lb / (s)(pie)	(newton)(s) / m ²	1.488
<i>k</i> = conductividad térmica		
g-cal (s)(cm ²) / (°C / cm)	B.t.u. / (h)(pie ²)(°F / pulg)	2 903.0
watts / (cm ²)(°C / cm)	B.t.u. / (h)(pie ²)(°F / pulg)	694.0
g-cal / (h)(cm ²)(°C / cm)	B.t.u. / (h)(pie ²)(°F / pulg)	0.8064
B.t.u. / (h)(pie ²)(°F / pie)	joules / (s)(m)(°C)	1.731
B.t.u. / (h)(pie ²)(°F / pulg)	joules / (s)(m)(°C)	0.1442

Anexo 22

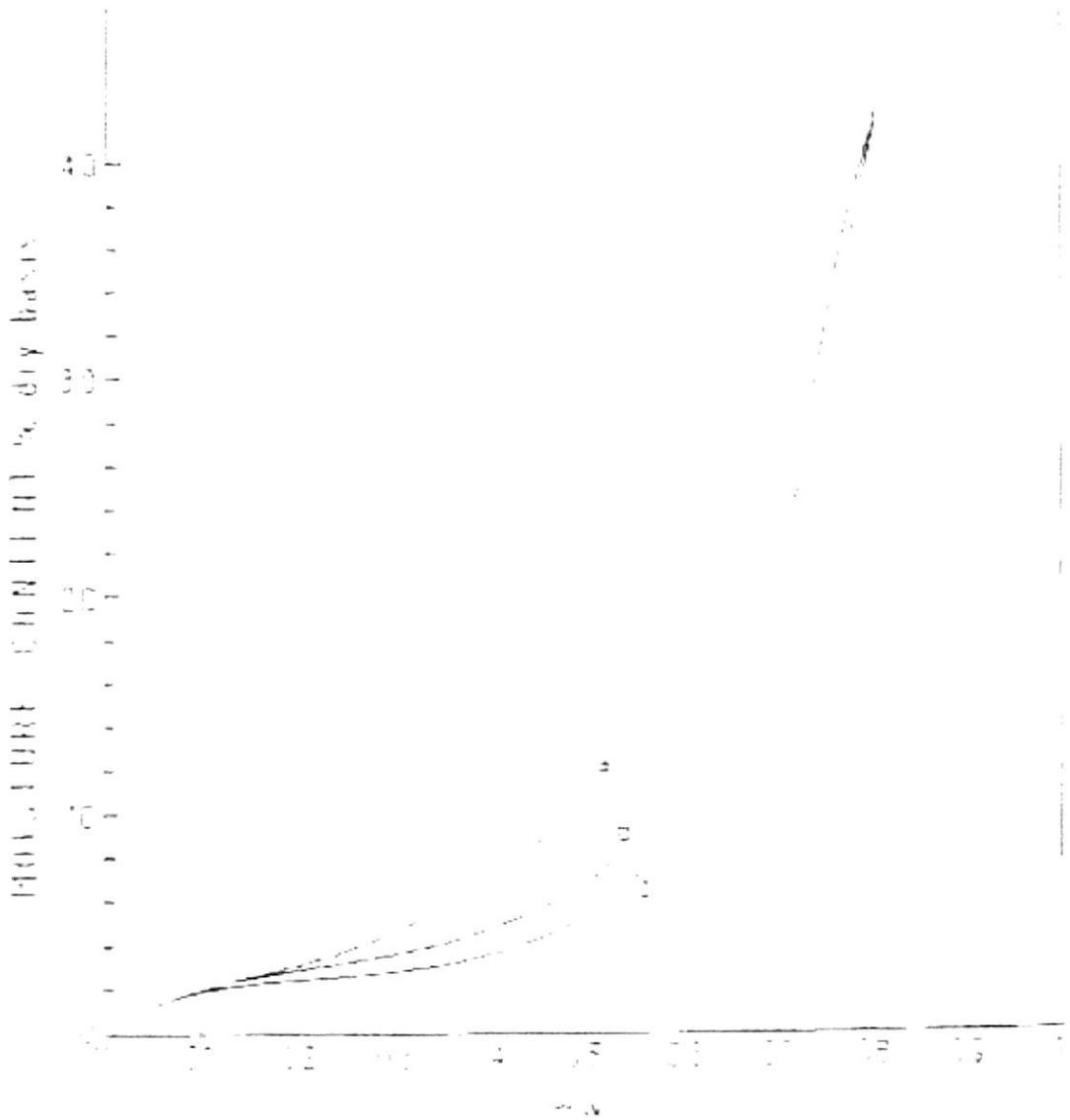
Valores de las constantes de la ley de los gases

Escala de temp	Unidades de pres.	Unid de vol.	Unidades de peso	Unidades de energia	R
Kelvin	.....	.....	g-mol	calorias	1.9872
	.....	.....	g-mol	joules (abs)	8.3144
	.....	.....	g-mol	joules (int)	8.3130
	atm	cm ³	g-mol	atm-cm ³	82.057
	atm	litros	g-mol	atm-litros	0.08205
	mm Hg	litros	g-mol	mm Hg-litros	62.361
	bar	litros	g-mol	bar-litros	0.08314
	kg/cm ²	litros	g-mol	kg/(cm ²)(litros)	0.08478
	atm	pie ³	lb-mol	atm-pie ³	1.314
	mm Hg	pie ³	lb-mol	mm Hg-pie ³	998.9
Rankine	.....	.....	lb-mol	u.c.c.	1.9872
	.....	.....	lb-mol	B.t.u.	1.9872
	.....	.....	lb-mol	hp-h	0.0007805
	.....	.....	lb-mol	kw-h	0.0005819
	atm	pie ³	lb-mol	atm-pie ³	0.7302
	pulg Hg	pie ³	lb-mol	pulg Hg-pie ³	21.85
	mm Hg	pie ³	lb-mol	mm Hg-pie ³	555.0
	lb/pulg ² abs.	pie ³	lb-mol	(lb)(pie ³)/pulg ²	10.73
	lb/pie ² abs.	pie ³	lb-mol	pie-lb	1545.0

Anexo 24

Isoterma del Platano de seda

a. 25°C b. 45°C c. 60°C



Anexo 25

Valores correspondientes en la perilla de temperatura

Referencias	Temperaturas
Punto 1	55°C
Punto 2	60°C
Punto 3	65°C
Punto 4	70°C
Punto 5	75°C
Punto 6	80°C
Punto 7	85°C
Punto 8	90°C