



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
*ZARAGOZA ***

***MODELO PARA LA SIMULACIÓN
DE SECADO DE VERDURA***

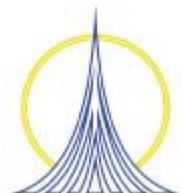
T E S I S

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE
INGENIERO QUÍMICO**

P R E S E N T A

MARTÍN ÁNGULO VÁZQUEZ

DIRECTOR: I.I. Q. ALEJANDRO RUBIO MARTÍNEZ



MÉXICO, ENERO DEL 2006



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente le doy gracias a Dios por haberme dado la vida y permitir terminar mi carrera, infinitamente gracias.

A mi adorada madre: Porque es la persona más linda del mundo, por todos sus consejos que me ha brindado, por su apoyo incondicional que siempre he tenido, por todas las bendiciones que has puesto en mi, gracias por todo mamá.

Mi Padre: Por todos los consejos que me enseñaste, desde que fui un niño hasta ahora, por todos los recuerdos buenos que tengo de ti. El Señor te cuide por siempre.

A mi hermosa Ana Bertha: Gracias por ser mi esposa, pues el día que te conocí alumbraste mi corazón y cuando me case contigo no sabes lo feliz que me hiciste, gracias por los hijos que me diste, Dios te bendiga cada día de tu vida para que estés conmigo y podamos realizar muchos sueños juntos.

A mi lindisima hija Fiona: Eres un angelito que Dios me mando del cielo para que yo cuide, eres la niña mas linda que amo con mi vida, mi corazón y mi alma pues tú me has dado fuerza para realizar todo, te amare por siempre. Todas las cosas que te propongas en la vida las puedes realizar, nunca pierdas la fe en ti, no todo es fácil pero hay que luchar siempre hasta hacer tus sueños realidad.

A mi hijo David: Porque es un gran muchacho espero que nunca te des por vencido en tus propósitos no hay limite si no el que tu te pongas, no hay que decir no puedo ó es difícil, pues todas las cosas de esta vida tienen su grado de dificultad, Dios te bendiga y te cuide. Te quiero mucho muchacho.

A mi hermana Luz Maria, Hilda, Juana, Dolores y Jesús : Gracias por ser mis hermanos los amare siempre.

A mis adorables sobrinos, Duchis, Alejandra, Kevin, Alejandro y Fani, pues me dan mucha felicidad al verlos, Dios los bendiga y los cuide. Los querré siempre.

A todas mis amigas y en especial a Minerva: Gracias por tu amistad.

A mis profesores:

Mi gratitud y respeto al I.I. Q. Alejandro Rubio Martínez por el apoyo brindado en este proyecto, cuyos esfuerzos fructificaron en la terminación de mi tesis.

M. en C. Andrés Aquino Canchola: Gracias por la ayuda en la revisión de este trabajo, le estoy muy agradecido

INDICE

Glosario	I
Lista de símbolos	II
Agradecimientos	III
Resumen	IV
Objetivos	V
Hipótesis	VI

CAPITULO I

INTRODUCCIÓN

	Página
1.1 Conducción	1
1.2 Convección	2
1.3 Radiación	2
1.4 Parámetros	4
1.5 Clasificación de los secadores según su uso	6
1.6 Formas de operación	7

CAPITULO II

2. DESCRIPCIÓN DE LOS ALGORITMOS

2.1 Elementos básicos de un secador solar	1
2.2 Velocidad de secado	1
2.3 Proceso de secado	1
2.4 Parámetros involucrados en el proceso de secado	1
2.5 Atmósfera de secado	1
2.6 Propiedades físicas generales del sistema sólido-liquido	1
2.7 Equilibrio entre transferencia de calor y materia	1
2.8 Transferencia de materia equilibrada	1
2.9 Equilibrio dinámico entre velocidad, calor	1
2.10 Velocidad secado	2
2.11 Tiempo de secado	2
2.12 Método de mínimos cuadrados	2
2.13 Arquitectura de los programas	2

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1	Programa 1 calcula la velocidad de secado utilizando el método de la pendiente	31
3.1.1	Punto en que la humedad decrece y en dónde se hace constante	34
3.2	Programa 2 calcula la variación del contenido de humedad en Periodo constante y el periodo de creciente utilizando un modelo teórico	34
3.2.1	Grafica al utilizar un modelo teórico	35
3.3	Programa 3. Ajusta los datos de tiempo contra humedad	35

CAPÍTULO IV

4.1	CONCLUSIONES	44
4.2	SUGERENCIAS	45

CAPÍTULO V

BIBLIOGRAFÍA

5.1	REFERENCIA	47
-----	------------------	----

GLOSARIO I

GLOSARIO

Transferencia de calor: Proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos.

Conducción: La velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en un cuerpo.

Convección: Si existe una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o un gas, es casi seguro que se producirá un movimiento del fluido. Este movimiento transfiere calor de una parte del fluido a otra por un proceso llamado convección.

Radiación: La radiación es un término que se aplica genéricamente a toda clase de fenómenos relacionados con ondas electromagnéticas (véase Radiación electromagnética).

Calentamiento solar de un secador: Los dos elementos de un secador solar son el colector donde la radiación calienta al aire y la cámara de secado donde el producto es deshidratado.

Tipos de Secadores. Los secadores se presentan según su uso.

Operación de un secador: La forma en que opera un secador da lugar a dos alternativas.

Velocidad de secado: Para poder determinar tiempos de secado y calcular el tamaño del secador, es necesario contar al menos con algunas mediciones experimentales.

Proceso de secado: La característica esencial del proceso de secado es la eliminación de un líquido.

Humedad ligada. Es la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor menor que la del líquido puro a la misma temperatura.

Humedad no ligada. Es la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor igual a la del líquido puro a la misma temperatura.

Humedad libre. Es la humedad contenida en exceso en relación a la humedad de equilibrio. La humedad libre es la relación a la humedad de equilibrio. La humedad libre es la que se evapora en la operación de secado.

Fluidización. En ingeniería química, proceso por el que determinados sólidos, generalmente con granulometría fina, se comportan como fluidos al mantenerlos en movimiento turbulento en una corriente gaseosa, o líquida.

LISTA DE SÍMBOLOS II

Lista de símbolos.

A	Área transversal de la zanahoria. cm^2
A_e	Área específica de secado. cm^2
A_u	Relación de área del sólido en contacto con el aire entre sí. cm^2
C_p	Capacidad calorífica del aire. $\text{J mol}^{-1}\text{K}^{-1}$
D	Diámetro del túnel del secador. cm .
DX/DO	Variación el contenido de agua con respecto al tiempo.
E	Espesor de las rodajas. cm .
G	Flujo másico del aire. m^3
h_c	Coefficiente de transferencia de calor por convección. $\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$
H_g	Humedad del gas secado incluido para fluidización, masa de agua/masa de aire seco. Kg. /Kg .
h_r	Coefficiente de transferencia de calor por radiación. $\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$
H_{ss}	Humedad de saturación del gas de secado a la temperatura superficial de la sustancia a secar T_s . Kg. /kg
H_{sw}	Humedad de saturación del gas de secado a la temperatura de Bulbo húmedo. T_h kg/kg
K_H	Coefficiente de secado basado en la humedad, referido al área del Lecho. g/s m^2

K_p	Coefficiente de secado en base a las presiones parciales. g/sm² bar.
K_s	Conductividad térmica del sólido. W/m ° C
L_s	Calor latente de evaporación del agua. Cal/g
m_g	Peso molecular del gas de secado. kg
m_v	Peso molecular del vapor. kg.
N	Flux ó Rapidez de secado. (masa /tiempo área.)
N_c	Rapidez de evaporación constante. (masa /tiempo área.)
N_m	Promedio logarítmico de la rapidez.
O	Área del túnel de secado. m²
P	Presión parcial de saturación de vapor. mb
P_{lm}	Fuerza impulsora media logarítmica debida a la presión parcial. mb
Pr	Número de Prandt. C_{pn}/ k
Ps	Presión parcial de saturación del vapor a la temperatura T_s de la superficie de secado. mb
Pv	Presión parcial de saturación del vapor de agua a la temperatura de Bulbo húmedo. Mb
q	Transferencia de calor. KW
qc	Calor por convección. KW

qk	Calor por conducción. KW
qr	Calor por radiación. W/m²
R	Constante de los gases ideales. KJ/K.mol.k
Ro	Densidad de la zanahoria. g/cm³
SI	Calor húmedo del gas de secado KJ/Kg ° C
Ss	Producto ó muestra. Kg.
T	Temperatura de aire seco. ° C
Tb.	Temperatura de bulbo seco. ° C
Th	Temperatura de bulbo húmedo. ° C
T_g	Temperatura del gas seco. ° C
Tr	Temperatura por radiación. ° C
Ts	Temperatura de la superficie de la zanahoria. ° C
T_{wb}	Temperatura del bulbo húmedo del gas de secado. ° C
U_K	Coefficiente total de transferencia de calor por conducción. W/m² ° C
V	Viscosidad del aire. Cp.
W	Peso del sólido seco en el secador. Kg.
X₁	Contenido de humedad inicial en base humedad. gr. /gr. s

Xc	Contenido de humedad critica promedio. gr./gr. s
Xe	Contenido de humedad en le equilibrio. gr./gr. s
Ys	Diferencia de humedad entre la superficie del liquido. gr./gr. s
λ.	Calor latente de vaporización en la superficie de secado. KJ/kg
θ	Tiempo. Minutos.

OBJETIVOS IV

OBJETIVO GENERAL

Desarrollar 3 programas que simulen las condiciones que se dan en un secador solar.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- El programa deberá calcular la variación del contenido humedad aplicando el método de la pendiente.
- Calcular la humedad crítica.
- Calcular la variación de la humedad con respecto del tiempo.
- Calcular la variación del contenido de humedad en el periodo constante y el periodo decreciente utilizando un modelo teórico.
- Calcular la rapidez de la evaporación en el periodo constante.
- Ajustar los datos de tiempo contra humedad utilizando el método de mínimos Cuadrados.
- Calcular el tiempo para una humedad dada.

HIPÓTESIS V

HIPÓTESIS.

Con base al estudio y modelado de un secador se podrá diseñar un programa que permita simplificar los cálculos de operación, y así poder optimizar el proceso de secado.

CAPITULO I. INTRODUCCION

La transferencia de calor : Es el proceso por el que se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura. El calor se transfiere mediante convección, radiación o conducción. Aunque estos tres procesos tienen lugar simultáneamente, puede ocurrir que uno de los mecanismos predomine sobre los otros dos.

1.1 CONDUCCIÓN.

En los sólidos, la única forma de transferencia de calor es la conducción. Si se calienta un extremo de una varilla metálica, de forma que aumente su temperatura, el calor se transmite hasta el extremo más frío por conducción.

No se comprende en su totalidad el mecanismo exacto de la conducción de calor en los sólidos, pero se cree que se debe, en parte, al movimiento de los electrones libres que transportan energía cuando existe una diferencia de temperatura. Esta teoría explica por qué los buenos conductores eléctricos también tienden a ser buenos conductores del calor.

En 1822, el matemático francés Joseph Fourier dio una expresión matemática precisa que hoy se conoce como ley de Fourier de la conducción del calor. Esta ley afirma que la velocidad de conducción de calor a través de un cuerpo por unidad de sección transversal es proporcional al gradiente de temperatura que existe en el cuerpo (con el signo cambiado). Figura No. 1

La ecuación matemática es la siguiente:

$$q = -k_T \frac{dT}{dz}$$

$$q = k_T \frac{dT}{dz}$$

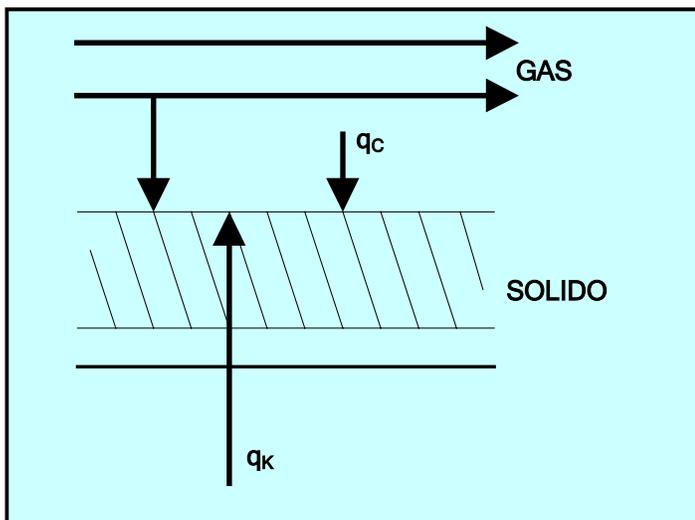


Figura No. 1 La transferencia de calor se lleva acabo en forma perpendicular.

Y el factor de proporcionalidad se denomina conductividad térmica del material. Los materiales como el oro, la plata o el cobre tienen conductividades térmicas elevadas y conducen bien el calor, mientras que materiales como el vidrio o el diamante tienen conductividades cientos e incluso miles de veces menores; conducen muy mal el calor, y se conocen como aislantes. En ingeniería resulta necesario conocer la velocidad de conducción del calor a través de un sólido en el que existe una diferencia de temperatura conocida. Para averiguarlo se requieren técnicas matemáticas muy complejas, sobre todo si el proceso varía con el tiempo; en este caso, se habla de conducción térmica transitoria. Con la ayuda de ordenadores (computadoras) analógicos y digitales, estos problemas pueden resolverse en la actualidad incluso para cuerpos de geometría complicada.

1.2 CONVECCIÓN

Si existe una diferencia de temperatura en el interior de un líquido o un gas, es casi seguro que se producirá un movimiento del fluido. Este movimiento transfiere calor de una parte del fluido a otra por un proceso llamado convección. El movimiento del fluido puede ser natural o forzado. Si se calienta un líquido o un gas, su densidad (masa por unidad de volumen) suele disminuir. Si el líquido o gas se encuentra en el campo gravitatorio, el fluido más caliente y menos denso asciende, mientras que el fluido más frío y más denso desciende. Este tipo de movimiento, debido exclusivamente a la no uniformidad de la temperatura del fluido, se denomina convección natural. La convección forzada se logra sometiendo el fluido a un gradiente de presiones, con lo que se fuerza su movimiento de acuerdo a las leyes de la mecánica de fluidos.

Supongamos, por ejemplo, que calentamos desde abajo una cacerola llena de agua. El líquido más próximo al fondo se calienta por el calor que se ha transmitido por conducción a través de la cacerola. Al expandirse, su densidad disminuye y como resultado de ello el agua caliente asciende y parte del fluido más frío baja hacia el fondo, con lo que se inicia un movimiento de circulación. El líquido más frío vuelve a calentarse por conducción, mientras que el líquido más caliente situado arriba pierde parte de su calor por radiación y lo cede al aire situado por encima. De forma similar, en una cámara vertical llena de gas, como la cámara de aire situada entre los dos paneles de una ventana con doble vidrio, el aire situado junto al panel exterior —que está más frío— desciende, mientras que al aire cercano al panel interior —más caliente— asciende, lo que produce un movimiento de circulación.

El calentamiento de una habitación mediante un radiador no depende tanto de la radiación como de las corrientes naturales de convección, que hacen que el aire caliente suba hacia el techo y el aire frío del resto de la habitación se dirija hacia el radiador.

Debido a que el aire caliente tiende a subir y el aire frío a bajar, los radiadores deben colocarse cerca del suelo (y los aparatos de aire acondicionado cerca del techo) para que la eficiencia sea máxima. De la misma forma, la convección natural es responsable de la ascensión del agua caliente y el vapor en las calderas de convección natural, y del tiro de las chimeneas. La convección también determina el movimiento de las grandes masas de aire sobre la superficie terrestre, la acción de los vientos, la formación de nubes, las corrientes oceánicas y la transferencia de calor desde el interior del Sol hasta su superficie¹.

1.3 RADIACIÓN.

La radiación presenta una diferencia fundamental respecto a la conducción y la convección: las sustancias que intercambian calor no tienen que estar en contacto, sino que pueden estar separadas por un vacío. La radiación es un término que se aplica genéricamente a toda clase de fenómenos relacionados con ondas electromagnéticas (véase Radiación electromagnética).

Algunos fenómenos de la radiación pueden describirse mediante la teoría de ondas (véase Movimiento ondulatorio), pero la única explicación general satisfactoria de la radiación electromagnética es la teoría cuántica. En 1905, Albert Einstein sugirió que la radiación presenta a veces un comportamiento cuantizado: en el efecto fotoeléctrico, la radiación se comporta como minúsculos proyectiles llamados fotones y no como ondas².

La naturaleza cuántica de la energía radiante se había postulado antes de la aparición del artículo de Einstein, y en 1900 el físico alemán Máx. Planck empleó la teoría cuántica y el formalismo matemático de la mecánica estadística para derivar una ley fundamental de la radiación. La expresión matemática de esta ley, llamada distribución de Planck, relaciona la intensidad de la energía radiante que emite un cuerpo en una longitud de onda determinada con la temperatura del cuerpo. Para cada temperatura y cada longitud de onda existe un máximo de energía radiante. Sólo un cuerpo ideal (cuerpo negro) emite radiación ajustándose exactamente a la ley de Planck. Los cuerpos reales emiten con una intensidad algo menor³.

La contribución de todas las longitudes de onda a la energía radiante emitida se denomina poder emisor del cuerpo, y corresponde a la cantidad de energía emitida por unidad de superficie del cuerpo y por unidad de tiempo. Como puede demostrarse a partir de la ley de Planck, el poder emisor de una superficie es proporcional a la cuarta potencia de su temperatura absoluta.

El factor de proporcionalidad se denomina constante de Stefan-Boltzmann en honor a dos físicos austriacos, Joseph Stefan y Ludwig Boltzmann que, en 1879 y 1884 respectivamente, descubrieron esta proporcionalidad entre el poder emisor y la temperatura. Según la ley de Planck, todas las sustancias emiten energía radiante sólo por tener una temperatura superior al cero absoluto.

Cuanto mayor es la temperatura, mayor es la cantidad de energía emitida. Además de emitir radiación, todas las sustancias son capaces de absorberla. Por eso, aunque un cubito de hielo emite energía radiante de forma continua, se funde si se ilumina con una lámpara incandescente porque absorbe una cantidad de calor mayor de la que emite⁴.

Las superficies opacas pueden absorber o reflejar la radiación incidente. Generalmente, las superficies mates y rugosas absorben más calor que las superficies brillantes y pulidas, y las superficies brillantes reflejan más energía radiante que las superficies mates. Además, las sustancias que absorben mucha radiación también son buenos emisores; las que reflejan mucha radiación y absorben poco son malos emisores. Por eso, los utensilios de cocina suelen tener fondos mates para una buena absorción y paredes pulidas para una emisión mínima, con lo que maximizan la transferencia total de calor al contenido de la cazuela⁵

Algunas sustancias, entre ellas muchos gases y el vidrio, son capaces de transmitir grandes cantidades de radiación. Se observa experimentalmente que las propiedades de absorción, reflexión y transmisión de una sustancia dependen de la longitud de onda de la radiación incidente.

El vidrio, por ejemplo, transmite grandes cantidades de radiación ultravioleta, de baja longitud de onda, pero es un mal transmisor de los rayos infrarrojos, de alta longitud de onda. Una consecuencia de la distribución de Planck es que la longitud de onda a la que un cuerpo emite la cantidad máxima de energía radiante disminuye con la temperatura. La ley de desplazamiento de Wien, llamada así en honor al físico alemán Wilhelm Wien, es una expresión matemática de esta observación, y afirma que la longitud de onda que corresponde a la máxima energía, multiplicada por la temperatura absoluta del cuerpo, es igual a una constante, 2.878 micrómetros-Kelvin. Este hecho, junto con las propiedades de transmisión del vidrio antes mencionadas, explica el calentamiento de los invernaderos⁶.

La energía radiante del Sol, máxima en las longitudes de onda visibles, se transmite a través del vidrio y entra en el invernadero. En cambio, la energía emitida por los cuerpos del interior del invernadero, predominantemente de longitudes de onda mayores correspondientes al infrarrojo, no se transmiten al exterior a través del vidrio. Así, aunque la temperatura del aire en el exterior del invernadero sea baja, la temperatura que hay dentro es mucho más alta porque se produce una considerable transferencia de calor neta hacia su interior⁷.

Además de los procesos de transmisión de calor que aumentan o disminuyen las temperaturas de los cuerpos afectados, la transmisión de calor también puede producir cambios de fase, como la fusión del hielo o la ebullición del agua. En ingeniería, los procesos de transferencia de calor suelen diseñarse de forma que aprovechen estos fenómenos.

Por ejemplo, las cápsulas espaciales que regresan a la atmósfera de la Tierra a velocidades muy altas están dotadas de un escudo térmico que se funde de forma controlada en un proceso llamado ablación para impedir un sobrecalentamiento del interior de la cápsula. La mayoría del calor producido por el rozamiento con la atmósfera se emplea en fundir el escudo térmico y no en aumentar la temperatura de la cápsula⁸.

1.4 PARÁMETROS INVOLUCRADOS EN EL DISEÑO Y OPERACIÓN DE UN SECADOR SOLAR.

El proceso de secado de sólidos es de considerable importancia práctica y económica en todas las industrias. La operación varía muchísimo según el material a secar, desde unos pocos segundos a algunos días. En gran parte su práctica es más un arte que una ciencia, si bien explicable por los principios científicos⁹.

Los dos elementos de un secador solar son el colector donde la radiación calienta al aire y la cámara de secado donde el producto es deshidratado por el aire que pasa. Estos elementos pueden diseñarse para que se integren al equipo en distintas formas¹⁰.

Secador Solar Indirecto.

Los elementos están separados. El aire es calentado en el colector y la radiación no incidirá sobre el producto colocado en la cámara de secado que es opaca. Este secador es esencialmente un secador convectivo convencional en que el sol (captado a través de un banco de colectores) actúa de una fuente energética.

Este tipo de secadores presenta varias ventajas. En primer lugar el control del proceso es simple (especialmente en el caso de secadores con circulación de aire forzada). Además es fácil integrar una fuente auxiliar de energía para construir un sistema híbrido.

El tener una cámara de secado separada de los colectores facilita la manipulación del producto y las labores de carga y descarga. Dado que la cámara de secado es opaca, este sistema permite secar en forma conveniente productos que se puedan dañar o perder calidad de aspecto por una exposición directa.

Naturalmente también hay desventajas: Una muy importante es el hecho de que al separar la función colección de energía solar de la de secado, el tamaño del equipo y sus costos crecen.

Una segunda desventaja, menos aparente: Es que para evaporar la misma cantidad de agua se necesita mover más kilogramos de aire a mayor temperatura que en el caso de los secadores directos o mixtos. Esto implica que los colectores solares trabajarán en un punto de menor eficiencia de su curva característica, lo cual conduce a mayores áreas de captación de energía.

Las dos desventajas anteriores implican que se debe cuidar mucho el diseño del sistema para tener colectores con buena eficiencia y de bajo costo.

Para productos a granel se emplea el secado solar, el sistema a emplear es de un secador indirecto.

Secador Solar Directo.

Los dos elementos pueden juntarse, en cuyo caso la cámara que contiene el producto también cumple la función de colector recibiendo la radiación solar.

En los secadores solares directos la radiación es adsorbida por el propio producto, resultando más efectivo el aprovechamiento de la energía para producir la evaporación del agua.

Esto se debe a que la presión de vapor en la superficie del producto crece por la absorción de radiación solar. Por lo tanto el gradiente de presiones de vapor entre producto y aire se hace mayor y se acelera el secado. Este tipo de secadores es casi siempre con circulación de aire por convección natural.

Secador solar Mixto.

Finalmente puede darse el caso en que la colección de radiación se realice tanto en un colector solar previo a la cámara como la misma cámara.

Una de las formas más económicas para conservar los productos del campo, es la deshidratación con aire caliente.

Esta operación se lleva a cabo usando secadores que pueden ser diseñados empíricamente o mediante la simulación de pruebas de secado. Empleando modelos matemáticos que representen adecuadamente una operación de secado, se puede facilitar el diseño y operación de los secadores.

La humedad contenida en un sólido ejerce una presión de vapor. Si un sólido húmedo se expone al paso de una corriente de gas fresco con una presión parcial dada del vapor, el sólido podrá perder humedad por evaporación o ganar humedad del gas hasta que la presión de vapor de la humedad sea igual a la presión de vapor del gas. Entonces el sólido y el gas están en equilibrio.

Los secadores se pueden clasificar según el uso que se les de, ver la tabla 1.

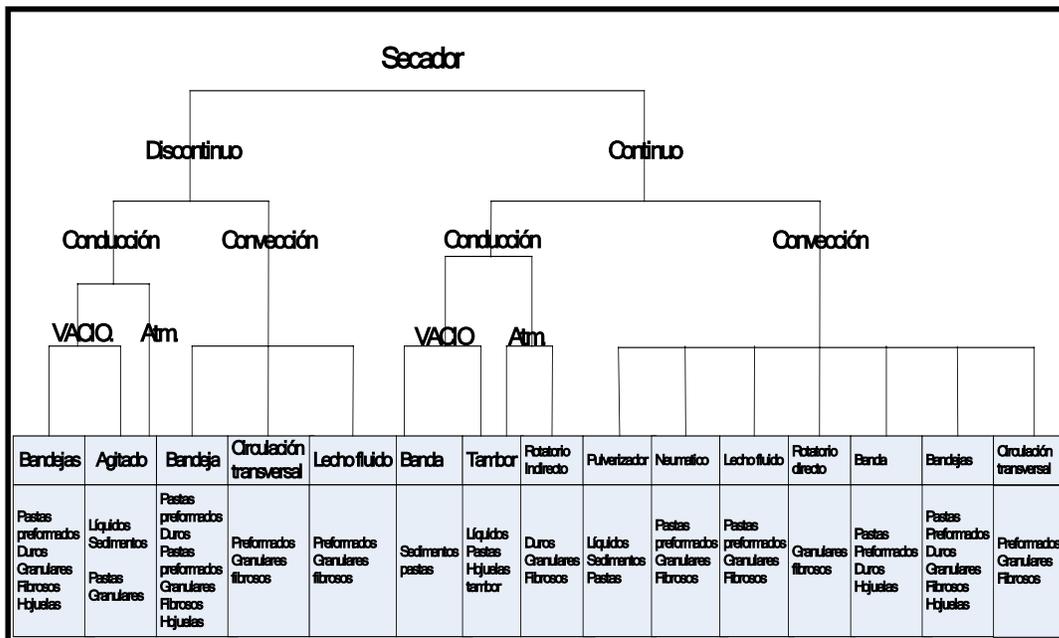


Tabla 1. Tipos de secadores según su uso.

Métodos se operación.

La tabla 1 clasifica a los secadores según su método de operación. Se hace una primera subdivisión según la forma de transferencia de calor.

- (a) Calentamiento por conducción.
- (b) Calentamiento por convección.

- (c) Calentamiento infrarrojo o sea todas las formas de calentamiento por radiación.
- (d) Calentamiento dieléctrico.

La liofilización puede incluirse en la clasificación como un caso especial de calentamiento por conducción.

La siguiente subdivisión principal es por tipo de recipiente de secado: bandejas, tambor rotatorio, lecho fluidizado, neumático o pulverización. La mejor operación, al vacío o con atmósferas inertes.

Circulación del aire en el secador: El aire circula dentro del secador con la finalidad de eliminar la humedad evaporada del producto. Esta circulación se logra por diversos métodos.

Circulación forzada: El aire es movido por un ventilador que consume energía eléctrica o mecánica.

Circulación por convección natural: El aire es movido por las diferencia de Temperaturas entre las distintas partes del equipo, que promueven la convección térmica del aire. No se necesita energía mecánica externa. El uso de chimeneas constituye un caso particular de convección natural.

Circulación por acción del viento : El movimiento de aire es producido por el propio viento imperante en el lugar. En algunos casos el viento actúa en forma indirecta moviendo un ventilador que produce la circulación del aire dentro del equipo.

1.5 Formas de operación:

La forma en que opera un secador da lugar a dos alternativas.

Secador en tandas:

El producto es cargado en una sola tanda y la misma se retira hasta que este completamente seca. Todo el producto dentro del secador va pasando de un estado húmedo a un estado seco paulatinamente.

Secado continuo:

El producto se va cargando y descargando en tandas parciales dentro del mismo secador se encuentra una parte de producto húmedo y otra casi seca. El periodo entre cargas de las tandas varía de acuerdo al diseño.

Capacidad de producción:

La capacidad de producción se define en relación al peso de producto fresco total que se carga. Además se considera la carga media diaria, expresada en kilos de producto fresco cargado por día. En el caso de equipos que trabajen por tandas, se debe dividir el peso de la tanda por número de días que se tarda en secar la misma.

Nivel tecnológico:

La construcción de un secador solar puede requerir distintos niveles en cuanto a las herramientas y los conocimientos técnicos necesarios para la construcción o montaje y el entrenamiento necesario para su operación.

Un buen sistema de clasificación depende del nivel tecnológico necesario para implementarlo. Esta clasificación permite decidir que tipo de secador es más adecuado para la aplicación prevista.

Esta información resulta de particular importancia para tomar una decisión sobre la posibilidad de que el propio productor pueda encargar su construcción, requiere ayuda técnica o deba considerar la posibilidad de adquirir el equipo ya construido. En cuanto al nivel tecnológico se adoptará la siguiente escala.

Equipo rustico:

La construcción y montaje solo requiere herramientas sencillas de manejo no especializado. La operación solo requiere un entrenamiento mínimo y presencia humana eventual.

Equipo artesanal:

La construcción requiere un operador entrenado y herramientas de banco. La operación solo requiere un entrenamiento mínimo y presencia humana eventual.

Equipo tecnificado:

La construcción requiere un taller mecánico con equipamiento normal. El montaje requiere de operadores entrenados, la operación requiere un entrenamiento adecuado y una presencia humana indispensable o eventual.

Equipo sofisticado:

El equipo requiere construcción en fábrica y el montaje necesita de operadores especializados. La operación requiere un entrenamiento adecuado y presencia humana indispensable.

Formas de cámara de secado:

La cámara de secado puede tener formas muy diversas, teniendo en cuenta distintos factores tales como el tipo de producto a secar, la capacidad de producción esperada, la forma de calentamiento solar, etc.

La cancha:

El producto es colocado directamente sobre una superficie abierta expuesta al aire. Puede ser directamente en el piso, con algún tipo de preparación para mejorar la higiene, un techo, o una estructura en forma de mesa. También se le llama patio.

La estantería:

El producto es colocado en un conjunto de estantes superpuestos y expuestos al aire. Generalmente el estante es construido con algún material perforado ejemplo: malta de alambre, estructura de caña etc.

El gabinete:

Consta de una caja con una sola bandeja donde se coloca el producto. Normalmente, una de sus caras permite la entrada de la radiación para efectuar el secado.

La cabina:

Consta de una caja, pero en vez de una sola bandeja, usa varias superpuestas como parte de una estructura vertical y las bandejas tienen el fondo perforado.

El silo:

Consta de una estructura cilíndrica vertical destinada normalmente al almacenamiento de productos con forma de grano.

El granero:

Consta de un cajón en forma de pared con sus lados contruidos con malla de alambre. El aire circula horizontalmente a través del mismo.

El túnel:

Consta de un local de forma alargada dentro del cual se coloca el producto en bandejas superpuestas. Habitualmente las mismas se disponen sobre carros para su movimiento a lo largo del túnel.

CAPÍTULO II

**DESCRIPCIÓN DE ALGORITMOS DE
CÁLCULO**

2.1 Elementos básicos de un secador solar

El colector donde la radiación calienta el aire y la cámara de secado donde el producto es deshidratado por el aire que pasa. Estos elementos pueden diseñarse para que se integren al equipo en distintas formas.

Si un sólido húmedo se expone al paso de una corriente de gas fresco con una presión parcial dada de vapor, el sólido podrá perder humedad por evaporación o ganar humedad del gas hasta que la presión de vapor de la humedad sea igual a la presión de vapor del gas, entonces el sólido y el gas están en equilibrio.

La temperatura de bulbo húmedo es la temperatura de equilibrio que alcanza un líquido cuando se le transfiere calor por contacto con una masa infinita de gas a una temperatura y húmeda dadas¹¹.

2.2 Velocidad de secado.

Para poder determinar tiempos de secado y calcular el tamaño del secador, es necesario contar al menos con algunas mediciones experimentales. A partir de los datos obtenidos se pueden graficar el contenido de humedad contra el tiempo figura lo cual puede servir para determinar el tiempo necesario para secar grandes lotes bajo las mismas condiciones figura No. 2, otra curva de gran utilidad es la de rapidez de secado expresada como N (masa/ tiempo área), contenido de humedad figura No. 3

Variación de la humedad con respecto al tiempo.

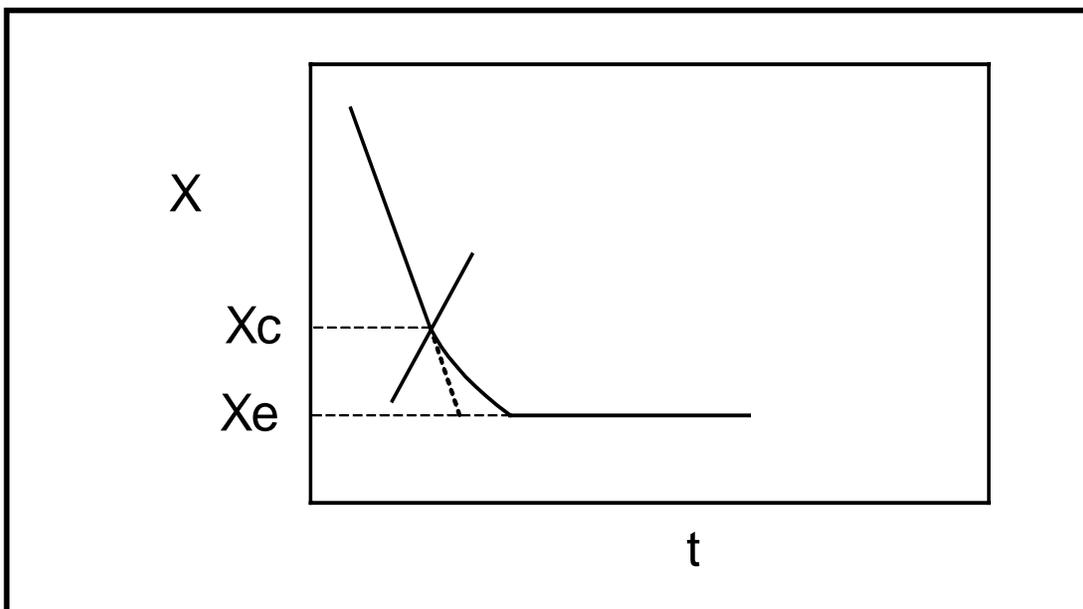


Figura No. 2 En este último tipo de graficas existen dos partes de rapidez, una constante y otra decreciente.

Variación de la velocidad de secado con respecto a la humedad mostrado en la siguiente figura.

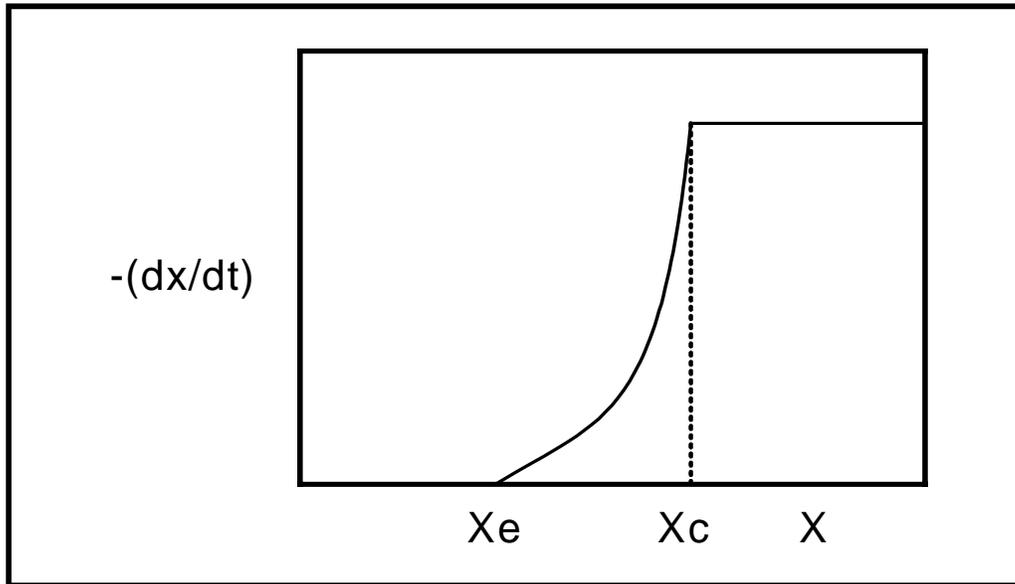


Figura No. 3 Velocidad de secado por unidad de área de superficie de secado.

Humedad crítica: Se define como la humedad a la cual la velocidad de secado del sólido deja de ser constante.

Humedad en equilibrio. Es la humedad alcanzada por el sólido en equilibrio con el vapor del líquido, se alcanzan las condiciones de equilibrio cuando la presión parcial del agua que acompaña al sólido húmedo es igual a la presión de vapor del vapor de agua del aire circundante.

Humedad. Es el peso del líquido por unidad de peso sólido seco (Kg agua/ Kg s.s.)

Un secador de verdura esta hecho primordialmente de madera y la parte superior de este de vidrio transparente y varios contenedores según la cantidad de producto a secar aumentan estos la Figura. No 4

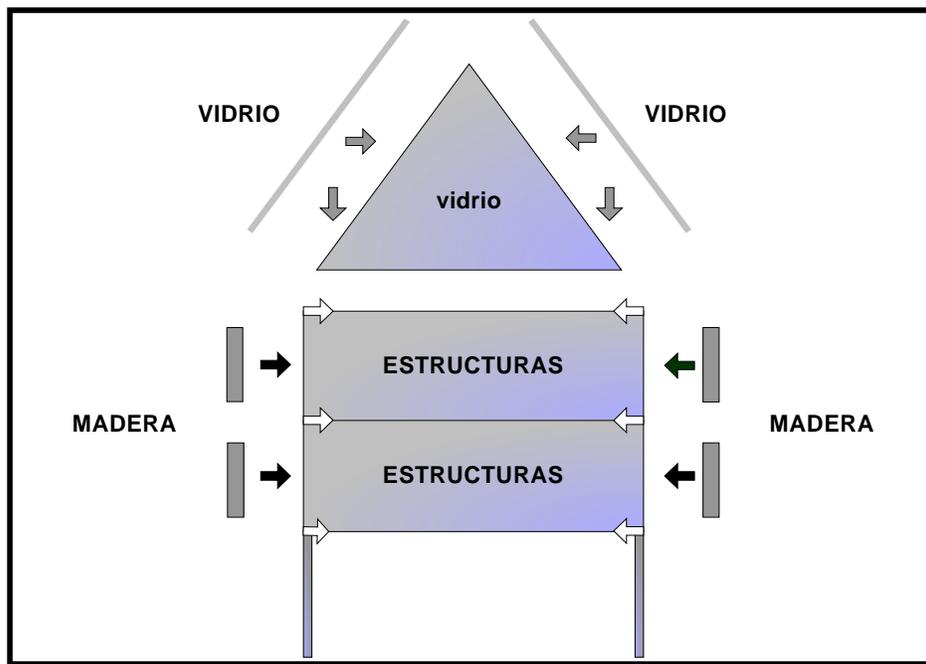


Figura No. 4 Armado de un secador solar.

Humedad de un sólido.

Si un sólido se encuentra inicialmente muy húmedo, la superficie se supone con humedad total no ligadas expuesta al aire relativamente seco, la evaporación tendrá lugar desde la superficie del sólido.

La rapidez de evaporación esta en función de la diferencia de humedad entre la superficie del liquido Y_s y la corriente principal. Y_s depende de la temperatura superficial del líquido.

Dado que la evaporación se efectúa por la absorción de calor latente, la temperatura de la superficie del sólido T_s permanece constante, Puesto que además Y_s permanece constante en condiciones de secado constantes, y por lo tanto la rapidez de evaporación debe permanecer constante en el valor N_c .

Cuando el contenido de humedad promedio del sólido alcanza un valor crítico de humedad X_c , la película superficial de humedad se reduce tanto por la evaporación, que aparecen puntos secos sobre la superficie expuesta. Esto se origina puesto que la rapidez de secado promedio, N descienda, aún cuando la rapidez de secado por unidad de superficie humedad permanezca constante¹².

Humedad ligada. Es la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor menor que la del líquido puro a la misma temperatura¹³.

Humedad no ligada. Es la humedad en una sustancia que ejerce una presión de vapor igual a la del líquido puro a la misma temperatura¹⁴.

Humedad libre. Es la humedad en exceso en relación a la humedad de equilibrio. La humedad libre es la relación a la humedad de equilibrio. La humedad libre es la que se evapora en la operación de secado¹⁵.

2.3 Proceso de secado.

La característica esencial del proceso de secado es la eliminación de un líquido de un sólido por medio de la evaporación. En la práctica, la energía necesaria para evaporar el líquido es suministrada en forma de calor.

La transferencia de calor se produce predominantemente por convección o por conducción, pues aunque es cierto que en todos los secadores se transfiere calor por radiación, es raro que sea éste el mecanismo que predomine.

Este hecho se debe a que al suministra la energía para el calentamiento por convección o conducción, se proveen automáticamente los medios para eliminar el vapor; el transporte de calor por radiación no requiere ningún medio físico y no implica en sí mismo ninguna forma de eliminar el vapor. Esto hace que la radiación un efecto secundario, que debe tenerse en cuenta como corrección al mecanismo de transporte por convección o conducción.

Frecuentemente se mantiene el recipiente a presión reducida con el objeto de aumentar la fuerza impulsora térmica. En el caso de secado por convección, el gas caliente se transfiere sobre la superficie del sólido húmedo proporcionado los dos efectos entregar calor y eliminar el vapor formado¹⁶

Un secador por conducción, la velocidad de secado disminuye a medida que el material se seca. Este efecto puede ser explicado en base a la disminución de la transferencia de calor. (17)

El secado por conducción difiere del secado por convección. En el primer caso el sólido húmedo se sitúa en un recipiente calentado externamente, que tiene una salida para eliminar el vapor figura No. 5

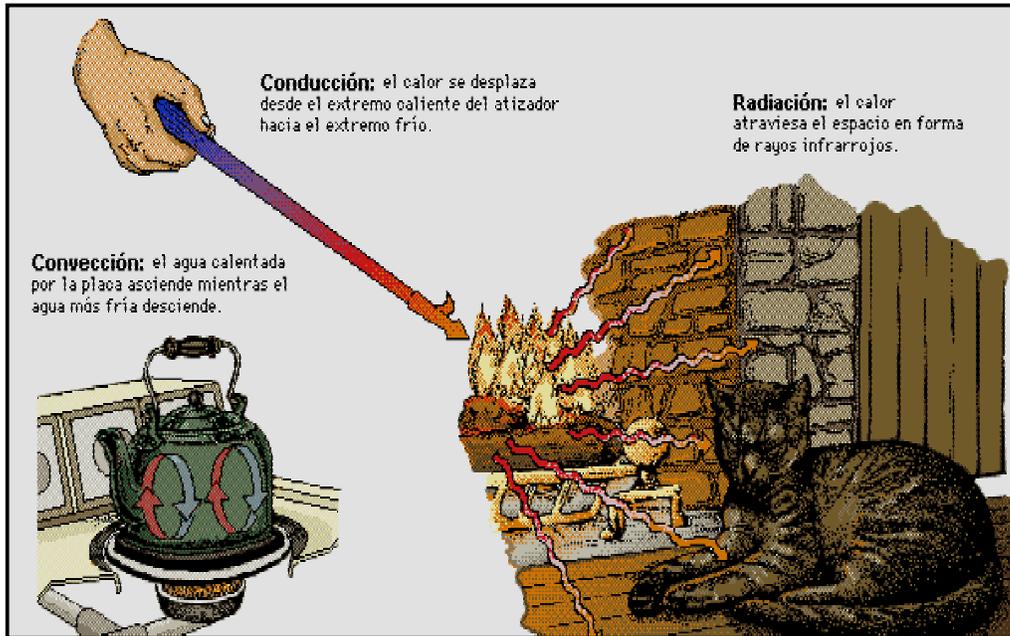


Figura. 5 Tres diferentes fenómenos en la transferencia de calor.

2.4 PARÁMETROS IMPORTANTES EL PROCESO DE SECADO

- Transferencia de calor desde el medio calefactor a la superficie líquida.
- Transferencia de calor en la película de líquido adherida al sólido.
- Transferencia de calor directa del sólido al líquido.
- Transferencia de calor directa del sólido al líquido a través de la película superficial y dentro de los intersticios y poros de la masa sólida.
- transferencia de calor desde el medio calefactor a la zona de sólido seco.
- Conductividad térmica del líquido.
- Conductividad térmica del sólido húmedo.
- Conductividad térmica de la zona cercana al sólido seco.
- Calor latente del líquido.
- Calor de hidratación, cuando se elimina agua combinada al finalizar el proceso de secado.
- Relación entre la temperatura y la licuefacción (solución) del material húmedo; algunos secadores se alimentan con material fundido antes que el líquido haya sido evaporado.
- Efectos electrolíticos presentes en el líquido sobre las características de secado del material, por ejemplo, arcillas¹⁸.

2.5 ATMÓSFERA DE SECADO.

- Presión y temperatura de la atmósfera de secado.
- Composición de la atmósfera de secado, incluyendo cambios en la presión parcial del líquido a través del proceso de secado.
- Velocidad relativa de la atmósfera de secado respecto de la superficie a secar.
- Presión de vapor efectiva del líquido, considerando los cambios en la elevación de la temperatura de ebullición durante el proceso de secado.
- Grado de saturación de la atmósfera de secado dentro del lecho sólido¹⁹.

2.6 PROPIEDADES FÍSICAS GENERALES DEL SISTEMA SÓLIDO-LÍQUIDO

- Tensión interfacial entre el sólido y el líquido.
- Espesor de la película adherida al sólido.
- Relación entre el área superficial y el volumen de líquido contenido en los poros.
- Coeficiente de difusión del vapor en los poros.
- Succión capilar de líquidos dentro de los poros.
- Gradientes de concentración de líquidos en los poros.
- Presencia de materiales fibrosos o cavidades en el seno del sólido.
- Tamaño de la molécula de líquido; importante en algunos líquidos orgánicos²⁰.

Cuando un sólido húmedo se seca por convección pura, el calor es suministrado solamente por el calor sensible del gas de secado, mientras el líquido evaporado se elimina como vapor en la corriente de gas. Así en un instante (sea en el periodo de velocidad constante o en el de velocidad decreciente) puede formularse un equilibrio dinámico entre la velocidad de suministro de calor y la velocidad de eliminación de líquido de la manera siguiente.

CAPÍTULO II

**DESCRIPCIÓN DE ALGORITMOS DE
CÁLCULO**

2.1 Elementos básicos de un secador solar

El colector donde la radiación calienta el aire y la cámara de secado donde el producto es deshidratado por el aire que pasa. Estos elementos pueden diseñarse para que se integren al equipo en distintas formas.

Si un sólido húmedo se expone al paso de una corriente de gas fresco con una presión parcial dada de vapor, el sólido podrá perder humedad por evaporación o ganar humedad del gas hasta que la presión de vapor de la humedad sea igual a la presión de vapor del gas, entonces el sólido y el gas están en equilibrio.

La temperatura de bulbo húmedo es la temperatura de equilibrio que alcanza un líquido cuando se le transfiere calor por contacto con una masa infinita de gas a una temperatura y húmeda dadas¹¹.

2.2 Velocidad de secado.

Para poder determinar tiempos de secado y calcular el tamaño del secador, es necesario contar al menos con algunas mediciones experimentales. A partir de los datos obtenidos se pueden graficar el contenido de humedad contra el tiempo figura lo cual puede servir para determinar el tiempo necesario para secar grandes lotes bajo las mismas condiciones figura No. 2, otra curva de gran utilidad es la de rapidez de secado expresada como N (masa/ tiempo área), contenido de humedad figura No. 3

Variación de la humedad con respecto al tiempo.

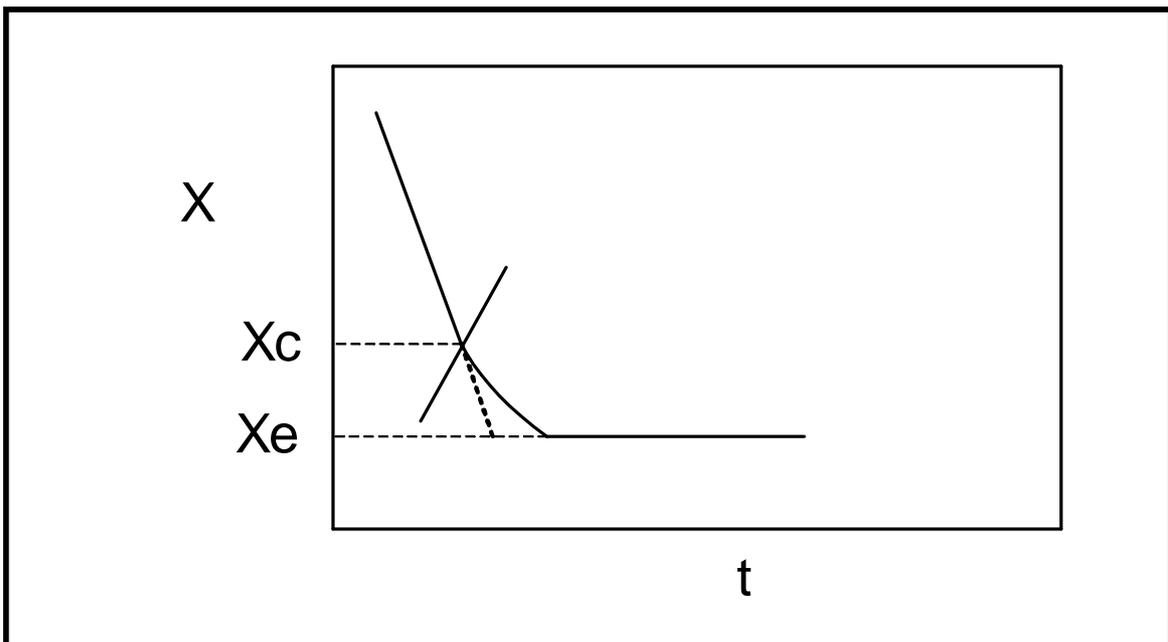


Figura No. 2 En este último tipo de graficas existen dos partes de rapidez, una constante y otra decreciente.

Variación de la velocidad de secado con respecto a la humedad mostrado en la siguiente figura.

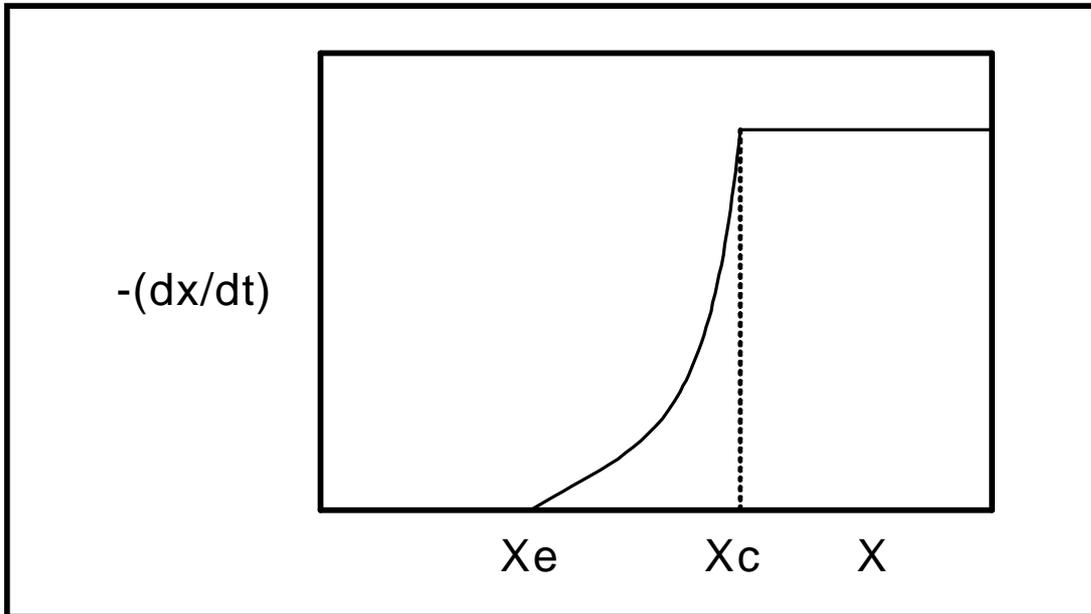


Figura No. 3 Velocidad de secado por unidad de área de superficie de secado.

Humedad crítica: Se define como la humedad a la cual la velocidad de secado del sólido deja de ser constante.

Humedad en equilibrio. Es la humedad alcanzada por el sólido en equilibrio con el vapor del líquido, se alcanzan las condiciones de equilibrio cuando la presión parcial del agua que acompaña al sólido húmedo es igual a la presión de vapor del vapor de agua del aire circundante.

Humedad. Es el peso del líquido por unidad de peso sólido seco (Kg agua/ Kg s.s.)

Un secador de verdura esta hecho primordialmente de madera y la parte superior de este de vidrio transparente y varios contenedores según la cantidad de producto a secar aumentan estos la Figura. No 4

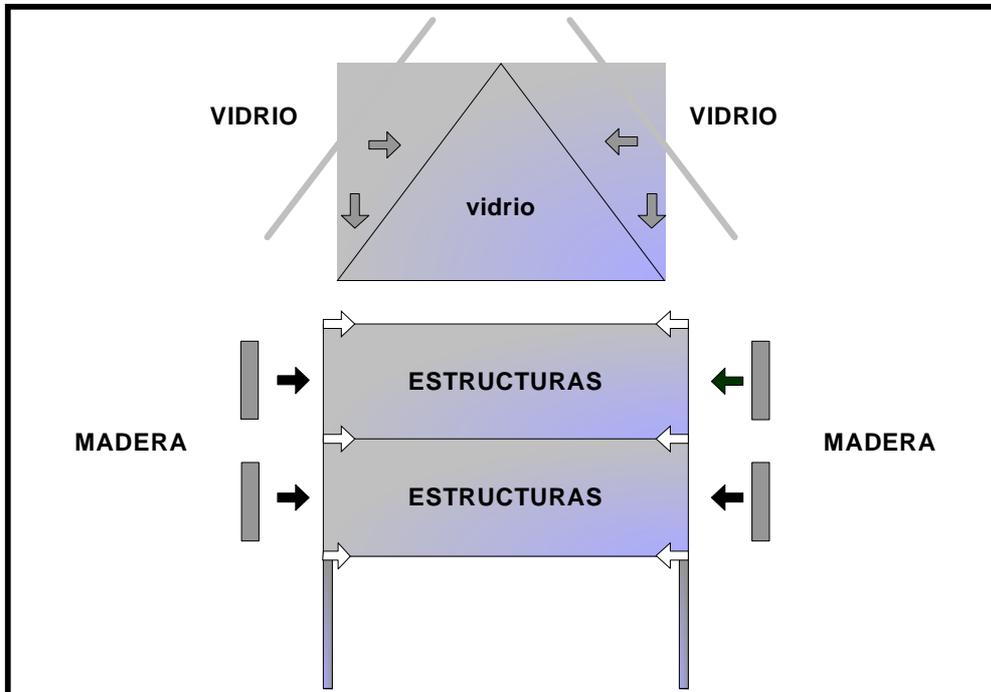


Figura No. 4 Armado de un secador solar.

Humedad de un sólido.

Si un sólido se encuentra inicialmente muy húmedo, la superficie se supone con humedad total no ligadas expuesta al aire relativamente seco, la evaporación tendrá lugar desde la superficie del sólido.

La rapidez de evaporación esta en función de la diferencia de humedad entre la superficie del liquido Y_s y la corriente principal. Y_s depende de la temperatura superficial del líquido.

Dado que la evaporación se efectúa por la absorción de calor latente, la temperatura de la superficie del sólido T_s permanece constante, Puesto que además Y_s permanece constante en condiciones de secado constantes, y por lo tanto la rapidez de evaporación debe permanecer constante en el valor N_c .

Cuando el contenido de humedad promedio del sólido alcanza un valor crítico de humedad X_c , la película superficial de humedad se reduce tanto por la evaporación, que aparecen puntos secos sobre la superficie expuesta. Esto se origina puesto que la rapidez de secado promedio, N descienda, aún cuando la rapidez de secado por unidad de superficie humedad permanezca constante¹².

Humedad ligada. Es la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor menor que la del líquido puro a la misma temperatura¹³.

Humedad no ligada. Es la humedad en una sustancia que ejerce una presión de vapor igual a la del líquido puro a la misma temperatura¹⁴.

Humedad libre. Es la humedad en exceso en relación a la humedad de equilibrio. La humedad libre es la relación a la humedad de equilibrio. La humedad libre es la que se evapora en la operación de secado¹⁵.

2.3 Proceso de secado.

La característica esencial del proceso de secado es la eliminación de un líquido de un sólido por medio de la evaporación. En la práctica, la energía necesaria para evaporar el líquido es suministrada en forma de calor.

La transferencia de calor se produce predominantemente por convección o por conducción, pues aunque es cierto que en todos los secadores se transfiere calor por radiación, es raro que sea éste el mecanismo que predomine.

Este hecho se debe a que al suministra la energía para el calentamiento por convección o conducción, se proveen automáticamente los medios para eliminar el vapor; el transporte de calor por radiación no requiere ningún medio físico y no implica en sí mismo ninguna forma de eliminar el vapor. Esto hace que la radiación un efecto secundario, que debe tenerse en cuenta como corrección al mecanismo de transporte por convección o conducción.

Frecuentemente se mantiene el recipiente a presión reducida con el objeto de aumentar la fuerza impulsora térmica. En el caso de secado por convección, el gas caliente se transfiere sobre la superficie del sólido húmedo proporcionando los dos efectos entregar calor y eliminar el vapor formado¹⁶

Un secador por conducción, la velocidad de secado disminuye a medida que el material se seca. Este efecto puede ser explicado en base a la disminución de la transferencia de calor. (17)

El secado por conducción difiere del secado por convección. En el primer caso el sólido húmedo se sitúa en un recipiente calentado externamente, que tiene una salida para eliminar el vapor figura No. 5

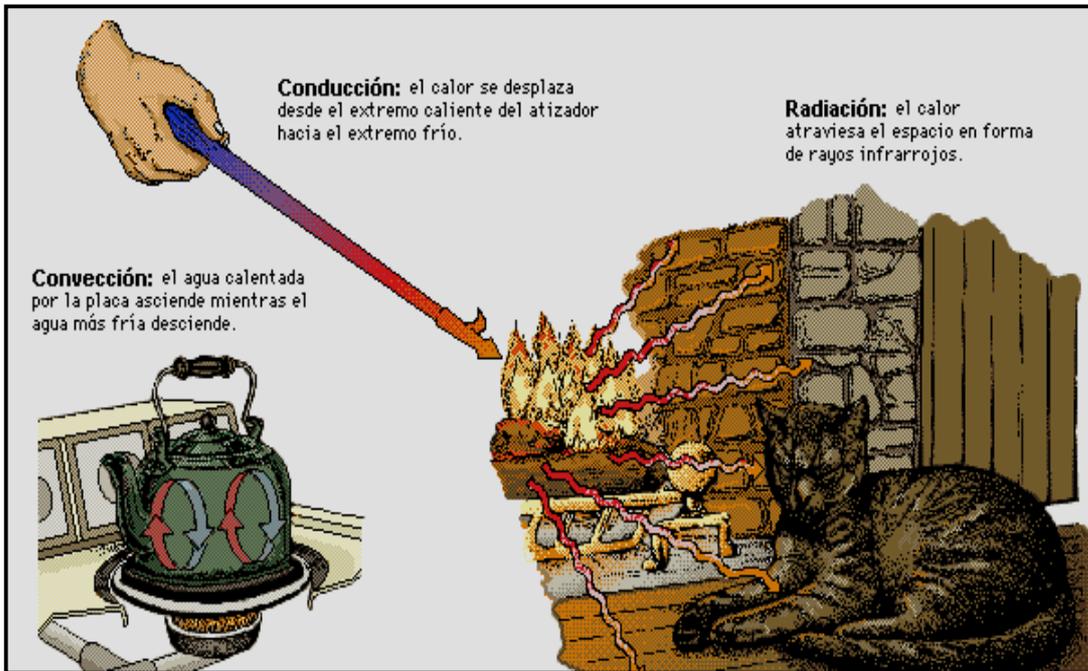


Figura. 5 Tres diferentes fenómenos en la transferencia de calor.

2.4 PARÁMETROS IMPORTANTES EL PROCESO DE SECADO

- Transferencia de calor desde el medio calefactor a la superficie líquida.
- Transferencia de calor en la película de líquido adherida al sólido.
- Transferencia de calor directa del sólido al líquido.
- Transferencia de calor directa del sólido al líquido a través de la película superficial y dentro de los intersticios y poros de la masa sólida.
- transferencia de calor desde el medio calefactor a la zona de sólido seco.
- Conductividad térmica del líquido.
- Conductividad térmica del sólido húmedo.
- Conductividad térmica de la zona cercana al sólido seco.
- Calor latente del líquido.
- Calor de hidratación, cuando se elimina agua combinada al finalizar el proceso de secado.
- Relación entre la temperatura y la licuefacción (solución) del material húmedo; algunos secadores se alimentan con material fundido antes que el líquido haya sido evaporado.
- Efectos electrolíticos presentes en el líquido sobre las características de secado del material, por ejemplo, arcillas¹⁸.

2.5 ATMÓSFERA DE SECADO.

- Presión y temperatura de la atmósfera de secado.
- Composición de la atmósfera de secado, incluyendo cambios en la presión parcial del líquido a través del proceso de secado.
- Velocidad relativa de la atmósfera de secado respecto de la superficie a secar.
- Presión de vapor efectiva del líquido, considerando los cambios en la elevación de la temperatura de ebullición durante el proceso de secado.
- Grado de saturación de la atmósfera de secado dentro del lecho sólido¹⁹.

2.6 PROPIEDADES FSICAS GENERALES DEL SISTEMA SÓLIDO-LIQUIDO

- Tensión interfacial entre el sólido y el líquido.
- Espesor de la película adherida al sólido.
- Relación entre el área superficial y el volumen d líquido contenido en los poros.
- Coeficiente de difusión del vapor en los poros.
- Succión capilar de líquidos dentro de los poros.
- Gradientes de concentración de líquidos en los poros.
- Presencia de materiales fibrosos o cavidades en el seno del sólido.
- Tamaño de la molécula d líquido; importante en algunos líquidos orgánicos²⁰.

Cuando un sólido húmedo se seca por convección pura, el calor es suministrado solamente por el calor sensible del gas de secado, mientras el líquido evaporado se elimina como vapor en la corriente de gas. Así en un instante (sea en el periodo de velocidad constante o en el de velocidad decreciente) puede formularse un equilibrio dinámico entre la velocidad de suministro de calor y la velocidad de eliminación de líquido de la manera siguiente.

Para los gases ideales la presión parcial y la humedad están relacionadas por la ley de Avogadro. Por definición

$$H_{ss} = \frac{mv}{mg} * \frac{P}{P - p} \quad \text{ec. 2}$$

Por lo tanto podemos relacionar la fuerza impulsora debida a la presión parcial con la fuerza impulsora por humedad, de la siguiente manera:

$$H_{ss} = \frac{mv}{mg} * \frac{P_s}{P - p_s} \quad \text{ec.3}$$

Si la presión parcial es pequeña comparada con la presión total podemos hacer la siguiente aproximación:

$$H_g = \frac{mv}{mg} * \frac{P_v}{P - p_v} \quad \text{ec. 4}$$

Haciendo la diferencia entre la ecuación 3 y 4 nos queda:

$$H_{ss} - H_g = \frac{mv}{mg} * \frac{P_s}{P - p_s} - \frac{mv}{mg} * \frac{P_v}{P - p_v} \quad \text{ec.5}$$

Factorizando la ecuación anterior nos da lo siguiente:

$$H_{ss} - H_g = \frac{mv}{mg} * \frac{P_s}{P - p_s} - \frac{P_v}{P - p_v} \quad \text{ec.6}$$

Donde $(P - p)_{lm}$ = media logarítmica de $(P - p_s)$ y $(P - p_v)$.

$$P - p_s = P - p_v = (P - p)_{lm} \quad \text{ec.7}$$

Sustituyendo ecuación 6 en la 5 nos da:

$$H_{ss} - H_g = \frac{mv}{mg} * \frac{P_s}{(P - p_s)_{lm}} - \frac{P_v}{(P - p_v)_{lm}} = \frac{mv}{mg} * \frac{P_s - P_v}{P - p_{lm}} \quad \text{ec.8}$$

Despejando de la ecuación 6 $(P_s - P_v)$ se obtiene:

$$P_s - P_v = \frac{(H_{ss} - H_g) * (P - p)_{lm} * mg}{mv} \quad \text{ec.9}$$

$$\frac{dw}{dq} = \frac{hcA(T_g - T_s)}{l} = 10^{-3} K_p A (P_s - P_v) = 10^{-3} \frac{K_p A (H_{ss} - H_g) * (P - p)_{lm} * mg}{mv} \quad \text{ec.10}$$

Ordenando términos:

$$\frac{dw}{dq} = \frac{hcA(T_g - T_s)}{l} = 10^{-3} K_p A \frac{mg}{mv} * (P - p)_{lm} (H_{ss} - H_g) \quad \text{ec.11}$$

$$\text{Si } K_H = 10^{-3} K_p \frac{mg}{mv} * (P - p)_{lm} \quad \text{ec. 12}$$

Entonces la ecuación 11 se puede introducir en la ecuación 10 y nos queda de la forma siguiente.

$$\frac{dw}{dq} = \frac{hcA(T_g - T_s)}{l} = K_H A (H_{ss} - H_g) \quad \text{ec.13}$$

2.8 Equilibrio entre transferencia de calor y materia.

Las ecuaciones 1 y 12 pueden combinarse para expresar el equilibrio entre transferencia de calor y materia en función de la temperatura y de las fuerzas impulsoras, presión parcial y humedad, así nos da de la siguiente manera.

$$\frac{dw}{dq} = \frac{hcA(T_g - T_s)}{I} = 10^{-3} K_p A (P_s - P_v) = K_H A (H_{ss} - H_g) \quad \text{ec.14}$$

Se emplea un coeficiente de transferencia de materia o de secado basado en la humedad K_H no sólo por la conveniencia de usar el dato en la forma en que se obtiene en la práctica, sino porque tiene mayor aplicación que el coeficiente K_v , basado en la presión parcial.

Esto ocurre porque el transporte de vapor de una región de menor presión parcial en el gas, P_v , induce una corriente de vapor conocida como flujo, que mejora la velocidad de transferencia.

Este efecto comienza a ser significativo a altas temperaturas, cuando p_s es alto (por ejemplo, por encima de 80°C para el sistema aire/agua) y para obtener el valor correcto de la fuerza impulsora debida a la presión parcial, es necesario aplicar una corrección. Mientras no sea muy grande la relación p_s/p_v no es necesario efectuar esta corrección a la fuerza impulsora por humedad.

En estas condiciones la transferencia de materia desde el líquido por evaporación está equilibrada exactamente por el calor entregado por el gas y puede ser representada por un equilibrio entre transferencia de materia y calor, en la forma siguiente:

$$hc(T_g - T_{wb}) = K_H I (H_{sw} - H_g) \quad \text{ec. 15}$$

Donde λ = calor latente de evaporación a T_{wb}

2.9 Equilibrio dinámico entre velocidad, calor y eliminación de líquido.

Esta ecuación de equilibrio puede escribirse en la forma:

$$\frac{dw}{dq} = \frac{hcA(T_g - T_s)}{I} = 10^{-3} K_p A (p_s - p_v) \quad \text{ec.16}$$

Por lo mismo podemos relacionar la fuerza impulsora debida a la presión parcial con la fuerza impulsora por humedad, de la siguiente manera:

$$H_{ss} - H_g = \frac{mv}{mg} * \frac{P_s}{P - p_s} - \frac{P_v}{P - p_v} \quad \text{ec.17}$$

En las condiciones de bulbo húmedo la transferencia de materia desde el líquido por evaporación esta equilibrada exactamente por el calor entregado por el gas y puede ser representada por un equilibrio entre transferencia de materia y calor en forma:

$$hc(T_g - T_{wb})K_H I(H_{Sw} - H_g) \quad \text{ec.18}$$

Donde λ = calor latente de evaporación a T_{wb}

Esta ecuación de equilibrio puede escribirse en la forma:

$$\frac{H_{Sw} - H_g}{T_{wb} - T_g} = - \frac{hc}{K_H} \quad \text{ec.19}$$

La relación entre la temperatura de bulbo húmedo T_{wb} y la temperatura y humedad del gas (T_s y H_g) se ve representado los datos sobre el gráfico psicométrico corriente esta indicado en la siguiente figura.

Temperatura de saturación de saturación adiabática

La temperatura de saturación adiabática es la temperatura de equilibrio que alcanza una mezcla de gas y líquido en condiciones adiabáticas. (Para que se alcance el equilibrio debe haber una cantidad adecuada de líquido disponible a la temperatura de saturación próxima a ella).

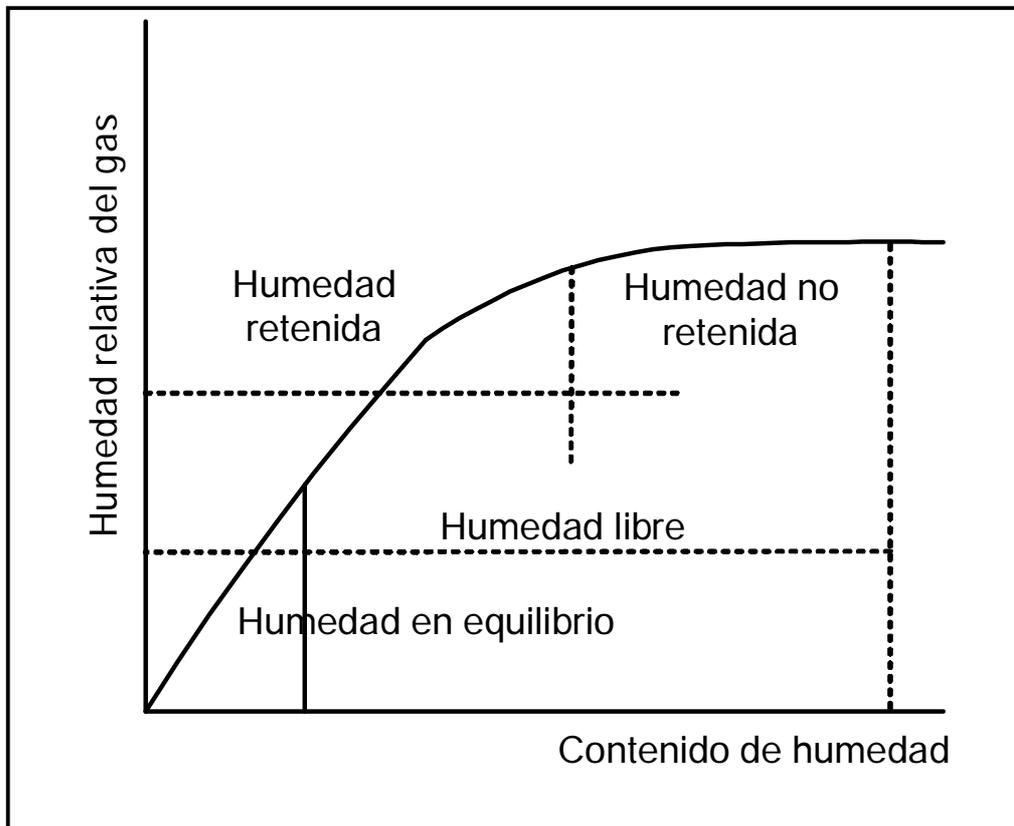
Como la condición de sistema adiabático impone que no haya pérdida ni ganancia de calor, el equilibrio puede ser determinado por un balance de calor del sistema, con la temperatura de saturación adiabática como dato²¹

2.10 Velocidad secado.

Para poder determinar tiempos de secado es necesario contar al menos con algunas mediciones experimentales. A partir de los datos obtenidos se pueden graficar el contenido de humedad contra el tiempo lo cual puede servir para determinar el tiempo contra el tiempo esto nos sirve para determinar el tiempo necesario para secar grandes lotes bajo las mismas condiciones.

Otra curva de gran utilidad es la rapidez de secado expresada como flux de transferencia de masa (N) (masa/tiempo área), contra contenido de humedad. En este último tipo de graficas existen dos partes principales (1) periodo de rapidez constante y (2) periodo de rapidez decreciente como se ilustra en la figura No. 6. Si un sólido se encuentra inicialmente muy húmedo, la superficie se supondrá con humedad total no ligada. Si se expone a aire relativamente seco, la evaporación tendrá lugar desde la superficie del sólido. La rapidez de evaporación esta en función de la diferencia de humedad entre la

superficie del líquido Y_s y la corriente principal, Y_s depende de la temperatura superficial del líquido. Dado que la evaporación se efectúa por la absorción de calor latente, la temperatura de la superficie del sólido T_s permanece constante. Puesto que además Y_s permanece constante en condiciones constantes de secado la rapidez de evaporación debe permanecer constante en el valor N_c^{22} .



Tipos de humedad. Figura No. 6

Cuando el contenido de humedad del sólido alcanza un valor x_c contenido crítico de humedad, la película superficial de humedad se reduce tanto por la evaporación, que aparecen puntos secos sobre la superficie expuesta, si se continúa el secado. Esto origina que la rapidez de secado promedio, N , descienda, aún cuando la rapidez de secado por unidad de superficie húmeda permanezca constante.

2.11 Tiempo de secado.

Por definición la rapidez de secado:

Se define como $N = \frac{(Ssdx)}{Adq}$, si integramos desde un contenido de humedad X_1 hasta

uno final X_2 $\int_{q=0}^{q=q_1} q = \frac{Ss}{A} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{N}$ obtenemos: ec. 21

Una expresión en función del tiempo.

$$q = \frac{Ss}{A * N} (X_2 - X_1) \quad \text{ec.22}$$

Si el secado tiene lugar dentro de periodo constante, X_1 y $X_2 > X_c$, el flux o rapidez de secado N es igual al flux de secado crítico N_c por lo tanto nos queda:

$$q = \frac{Ss}{A * N_c} (X_2 - X_1). \quad \text{ec.23}$$

Si el secado tiene lugar en el periodo decreciente de el flux o rapidez de secado, X_1 y $X_2 < N$, entonces N se puede considerar lineal en X por lo tanto,

$$N = mx + b \quad \text{ec. 24}$$

En el periodo de rapidez constante se lleva a cabo la evaporación de la húmeda no ligada, la rapidez de secado se establece mediante un balance de las necesidades caloríficas para la evaporación y por lo tanto la ecuación es la siguiente.

$$N = N_c = mx + b = \frac{q}{L_s} = \frac{(h_c - U_k)(T_g - T_s) + h_r(T_r - T_s)}{L_s} \quad \text{ec.25}$$

Convección y Radiación
Conducción

En algunos casos prácticos el calor por radiación es muy pequeño comparado con el de convección, entonces la ecuación nos quedara de esta forma:

$$N = N_c = mx + b = \frac{q}{L_s} = \frac{(h_c - U_k)(T_g - T_s)}{L_s} \quad \text{ec.26}$$

Teniendo todas las ecuaciones necesarias para diseñar el modelo matemático que simule los parámetros de un secador podemos hacer lo siguiente:

Si sustituimos la ecuación 24 en la 20 y despejamos Θ nos queda de la forma siguiente:

$$q = \frac{Ss}{mA} \int_{x_2}^{x_1} \frac{dx}{mx+b} \quad \text{ec.27}$$

$$u = mx + b \quad q = \frac{Ss}{mA} \int_{x_2}^{x_1} \frac{du}{\frac{m}{u}}$$

$$du = m dx \quad q = \frac{Ss}{mA} \int_{x_2}^{x_1} \frac{du}{u} \quad \text{ec.28}$$

$$\frac{du}{m} = dx$$

Resolviendo la integral por cambio de variable:

$$q = \frac{Ss}{mA} \ln(u) \Big|_{x_2}^{x_1} = \ln(mx+b) \Big|_{x_2}^{x_1} \quad \text{ec.29}$$

$$q = \frac{Ss}{mA} \ln(mx_1 + b) - \ln(mx_2 + b) \quad \text{ec.30}$$

$$q = \frac{Ss}{mA} \ln\left(\frac{mx_1 + b}{mx_2 + b}\right) \quad \text{ec.31}$$

Por lo tanto Si $N_c = N = mx+b$ entonces:

$$q = \frac{Ss}{mA} \ln\left(\frac{N_1}{N_2}\right) \quad \text{ec.32}$$

$$N_c = N_1 = mx_1 + b \quad \text{ec.33}$$

$$N_c = N_2 = mx_2 + b \quad \text{ec.34}$$

$$N = N_c = (mx + b) = \frac{q}{Ls} = \frac{(hc - Uk) * (Tg - Ts) + hr(Tr - Ts)}{Ls} \quad \text{ec.35}$$

$$N_2 = mx_2 + b \quad \text{ec.36}$$

$$m = \frac{N_1 - N_2}{X_1 - X_2} \quad \text{ec.37}$$

$$q = \frac{Ss}{A} * \frac{X_1 - X_2}{(N_1 - N_2) * \ln(N_1 - N_2)} \quad \text{ec.38}$$

Simplificando obtenemos:

$$q = \frac{Ss}{A} * \frac{X_1 - X_2}{Nm} \quad \text{ec.39}$$

Donde Nm es un promedio logarítmico de la rapidez de secado: Sin embargo la curva decreciente de la rapidez total se puede tomar como línea recta.

$$N = m(X - X_e) = N_c * \left(\frac{X - X_c}{X_c - X} \right) \quad \text{ec.40}$$

Y la ecuación de tiempo se transforma en:

$$q = \left(\frac{Ss}{NcA} \right) * (X_c - X_e) * \ln \left(\frac{X_1 - X_e}{X_2 - X_e} \right) \quad \text{ec. 41}$$

Y el área específica de secado se puede obtener con:

$$Ae = \frac{1}{E * Ro(1 - X_1)} \quad \text{ec. 42}$$

El coeficiente de transferencia de calor por convección esta dado por la siguiente ecuación:

$$hc = \frac{K_s * Cp * G * X_1 * V * E}{E * Pr * Au} \quad \text{ec-43}$$

Y el coeficiente de transferencia de calor por conducción esta dado por:

$$Uk = \frac{Au * K_s}{E} \quad \text{ec.44}$$

Si queremos encontrar el punto donde la rapidez de secado se hace constante, tenemos que derivar para obtener la pendiente.

La ordenada al origen se obtiene de la siguiente forma:

$$y - y_0 = m (x - x_0) \quad \text{ec. 45}$$

Donde nos queda.

$$y = mx + b \quad \text{ec. 46}$$

Despejando b tenemos.

$$b = - x_0 * m + y_0 \quad \text{ec.47}$$

2.12 Para ajustar nuestros valores experimentales con los de nuestro modelo, donde la rapidez de secado se hace constante, se ocupo un método de ajuste por mínimos cuadrados, generando un polinomio de la siguiente forma:

$$\Sigma x^3 y = a_3 \Sigma x^6 + a_2 \Sigma x^5 + a_1 \Sigma x^4 + a_0 \Sigma x^3 \quad \text{ec. 48}$$

$$\Sigma x^2 y = a_3 \Sigma x^5 + a_2 \Sigma x^4 + a_1 \Sigma x^3 + a_0 \Sigma x^2 \quad \text{ec. 49}$$

$$\Sigma xy = a_3 \Sigma x^4 + a_2 \Sigma x^3 + a_1 \Sigma x + a_0 \Sigma x \quad \text{ec. 50}$$

$$\Sigma y = a_3 \Sigma x^3 + a_2 \Sigma x^2 + a_1 \Sigma x + na_0 \quad \text{ec. 51}$$

Para um polinômio de grau 4

$$\Sigma x^4 y = a_4 \Sigma x^8 + a_3 \Sigma x^7 + a_2 \Sigma x^6 + a_1 \Sigma x^5 + a_0 \Sigma x^4 \quad \text{ec. 52}$$

$$\Sigma x^3 y = a_4 \Sigma x^7 + a_3 \Sigma x^6 + a_2 \Sigma x^5 + a_1 \Sigma x^4 + a_0 \Sigma x^3 \quad \text{ec. 53}$$

$$\Sigma x^2 y = a_4 \Sigma x^6 + a_3 \Sigma x^5 + a_2 \Sigma x^4 + a_1 \Sigma x^3 + a_0 \Sigma x^2 \quad \text{ec. 54}$$

$$\Sigma xy = a_4 \Sigma x^5 + a_3 \Sigma x^4 + a_2 \Sigma x^3 + a_1 \Sigma x^2 + a_0 \Sigma x \quad \text{ec. 55}$$

$$\Sigma y = a_4 \Sigma x^4 + a_3 \Sigma x^3 + a_2 \Sigma x^2 + a_1 \Sigma x + a_0 n \quad \text{ec. 56}$$

Cálculo de la pendiente.

$$y = a_4 x^4 + a_3 x^3 + a_2 x^2 + a_1 x + a_0 \quad \text{ec. 57}$$

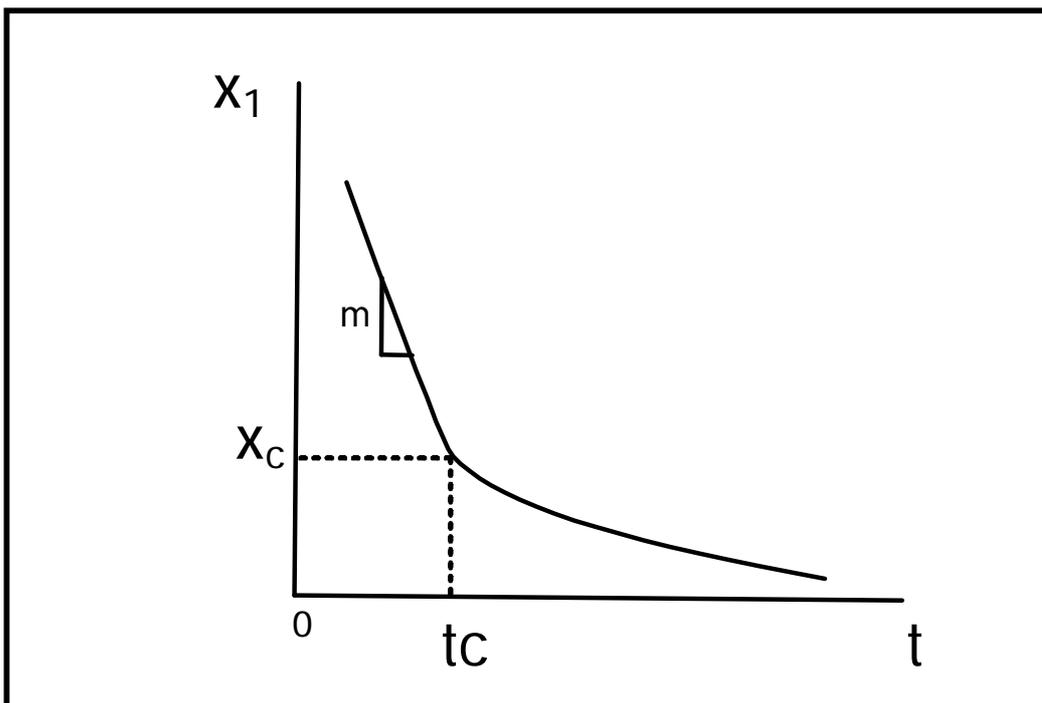
$$Nc = N = m = y' = 4a_4 \theta^3 + 3a_3 \theta^2 + 2a_2 \theta + a_1 \quad \text{ec. 58}$$

El cálculo de inflexión, se obtiene sacando la segunda derivada.

$$y'' = 12a_4 \theta^2 + 6a_3 \theta + 2a_2 \quad \text{ec. 59}$$

Y las raíces de la ecuación 59 se obtiene utilizando la formula general cuadrática.

$$(-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}) / 2a \quad \text{ec. 60}$$



La siguiente figura No. 7 muestra tanto la pendiente como el punto de inflexión.

El método que se utilizará para resolver la matriz de 5 por 5, será por Cramer Utilizando el programa Matlab en la sección de matrices y determinantes. (ver anexo 1)

A, B, C, D, E, F, G, H, I, J, K, L, M. son las sumatorias de humedad y tiempo.

$$a_4 I + a_3 H + a_2 G + a_1 F + a_0 E = M \quad \text{ec. 61}$$

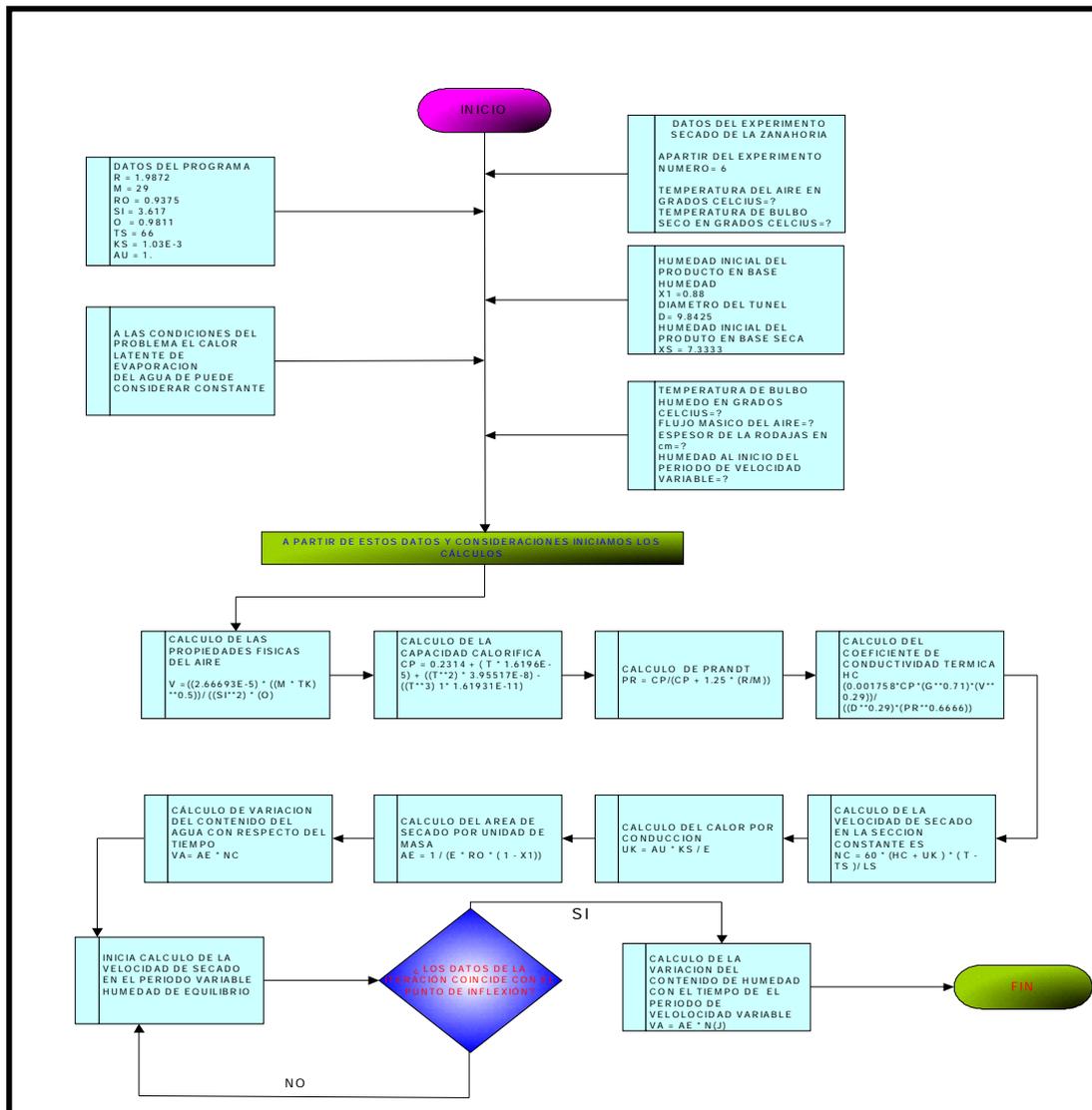
$$a_4 H + a_3 G + a_2 F + a_1 E + a_0 D = L \quad \text{ec. 62}$$

$$a_4 G + a_3 F + a_2 E + a_1 D + a_0 C = K \quad \text{ec. 63}$$

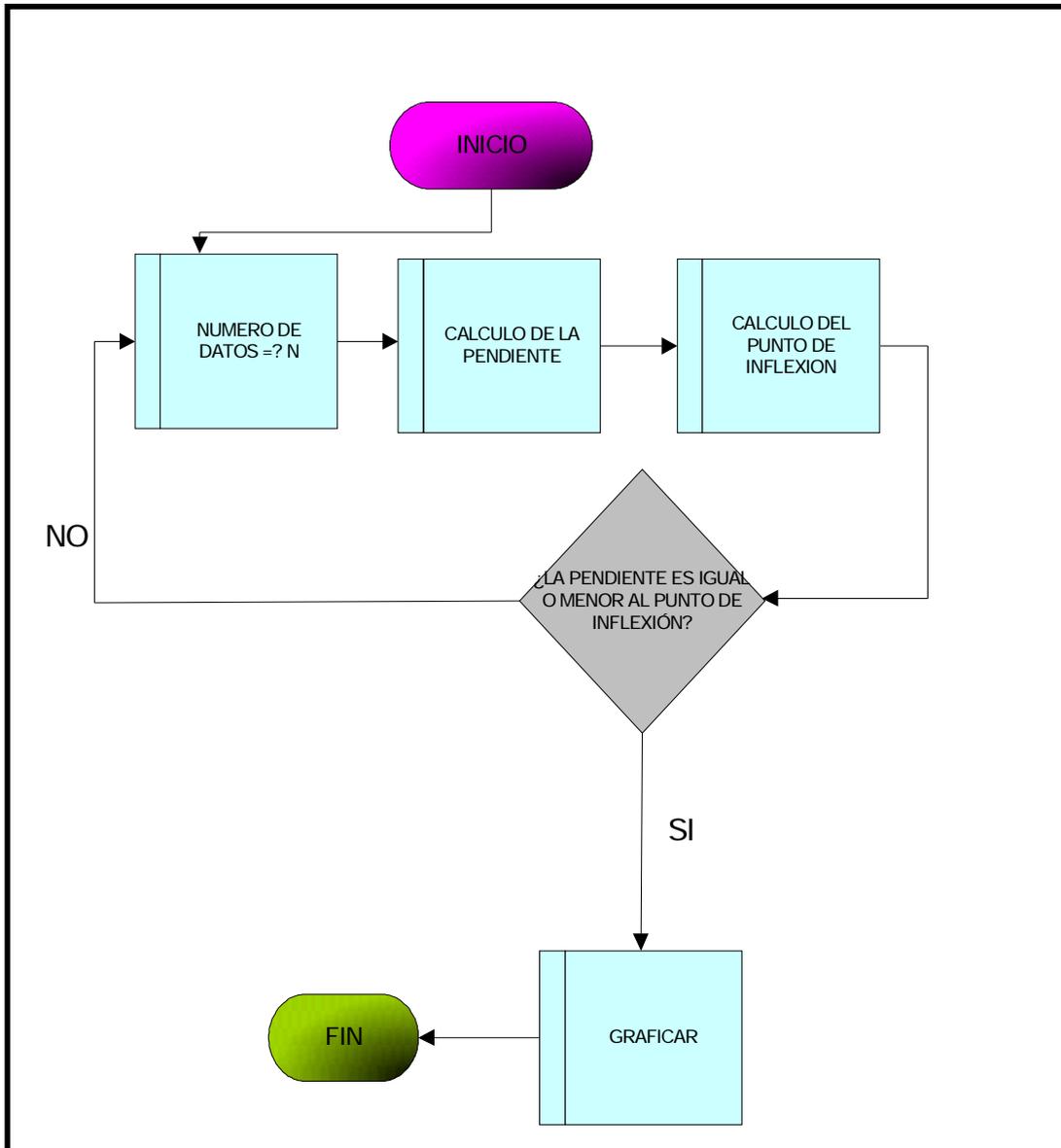
$$a_4 F + a_3 E + a_2 D + a_1 C + a_0 A = J \quad \text{ec. 64}$$

$$a_4 E + a_3 D + a_2 C + a_1 A + a_0 = B \quad \text{ec. 65}$$

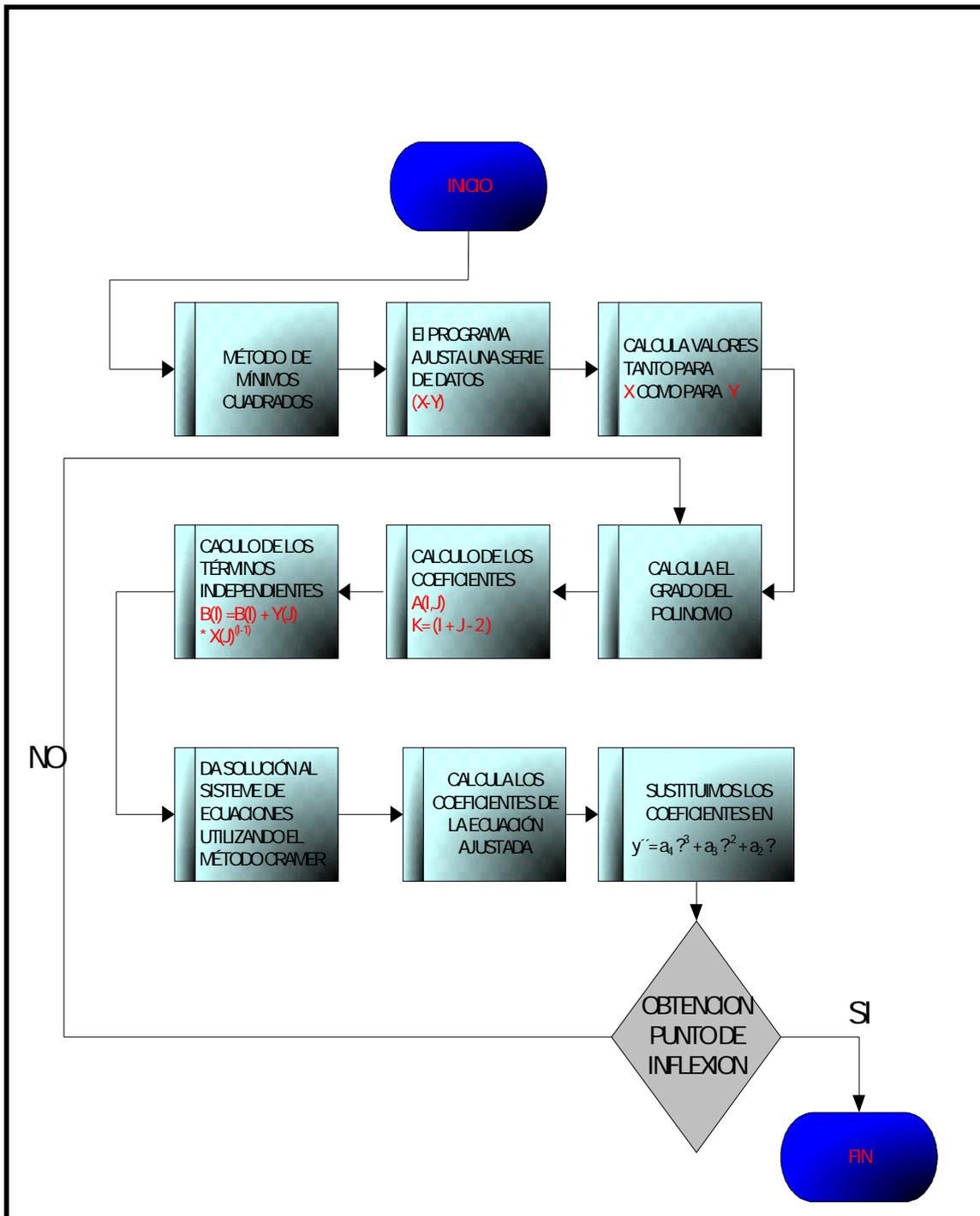
2.13 Programa 1. Calcula la velocidad de secado y utiliza el método de la pendiente.



Programa 2. Calcula la variación del contenido de humedad en el periodo constante y en el periodo decreciente y utilizando un modelo teórico.



Programa 3. Ajusta los datos de tiempo contra humedad a un polinomio de la forma $N = K(A)^{a1} (A)^{a2} (A)^{a3}$



C A P Í T U L O III

R E S U L T A D O S Y D I S C U S I Ó N D E R E S U L T A D O S .

El modelo que propondremos será aquel que cumpla con las condiciones necesarias para simulación de un secador solar indirecto.

Los datos necesarios son proporcionados de bibliografía de la FEZ Cuautitlan cuyo titulo es Diseño de un secador solar, clasificación 002- 10524- DI- 1985-3, tomando como datos la tabla de resultados y constantes necesarias que se utilizaron en el diseño nuestro modelo matemático.

En este secador solar se seco **zanahoria, calabaza, epazote chayote papa**, pero la bibliografía se basa en el diseño físico del secador solar y no le da importancia profunda al producto que seco, por lo tanto nuestro trabajo es encontrar un modelo que nos de los parámetros de secado para simplificar los experimentos físicos y mejorar

cada vez mas los secadores solares, se escogió al azar la zanahoria para obtener el modelo matemático.

El diseño del secador solar se llevo a cabo tomando durante todo un año las condiciones del viento, la humedad, así como la radiación solar y la presión que impera en Cuentepec estado de Morelos y obtener constantes de cada producto que se seco, como: calor latente de evaporación de agua, densidad, área, temperatura de superficie del sólido, espesor según el caso, así se pudo saber si el secador funcionaba como se esperaba y obtener la máxima eficiencia para posteriormente armar el secador solar. A continuación se muestran los parámetros.

Constantes experimentales obtenidas.

Diámetro del túnel de secado.

d = 9.8425 cm.

Densidad de la zanahoria.

Ro = 0.9375 gr./cm³

Calor latente de evaporación del agua.

LS = 580.5 cal/gr.

Temp. de la superficie de la zahoria.

Ts. = 66 °C

R = 1.9872 KJ/K mol.k

m_g = 29 kg

O = .9811 m²

Ks = 1.03E-03

Au = 1 cm²

E = .25 cm.

Humedad inicial del producto en base humedad.

X1 = .88 gr./gr. s

Humedad del producto en base seca.

Xs = 7.3333 gr./gr. s

Calor húmedo del gas de secado.

SI = 3.617 KJ/Kg °C

3.1 Programa. 1 Calcula la velocidad de secado de la zanahoria a partir de datos experimentales y calculados por el método de la pendiente. El cual consiste en sacar los valores de todas las variables que se van a ocupar, a continuación se programa en Excel introduciéndolo en celdas y posteriormente se gráfica.

Se realizaron 9 experimentos hasta tener constantes y tomamos como base al experimento No. 6 a partir de éste hacemos cálculos.

Experimento	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Temp. Del aire	70	77	83	83	83	83	83	83	83
T. bulbo seco	26	22	22.5	31	24	25.1	25	25	25
T. de bulbo húmedo	19	17	17.1	21	19	18.1	18	18	18

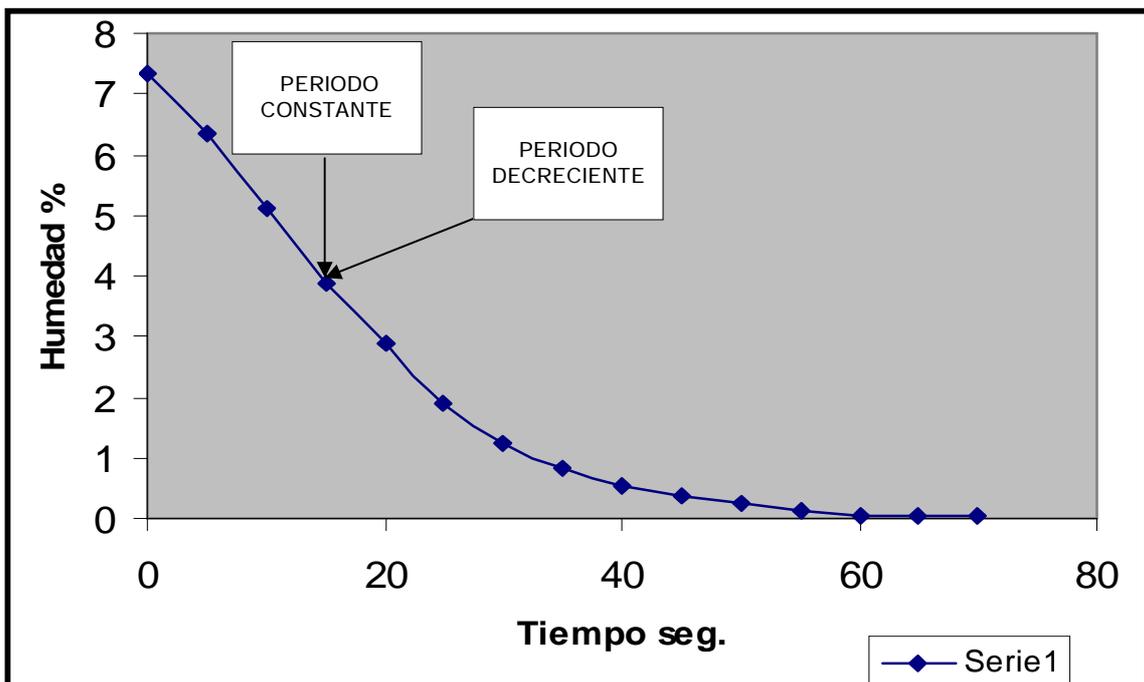
Constante de los gases ideales. KJ/K.mol.k.	R	1.9872
--	---	--------

Peso molecular. kg	m_v	29
Densidad de la zanahoria. g/cm^3	R_o	0.9375
Calor húmedo del gas de secado $kJ/kg \text{ } ^\circ C$	S_I	3.617
Área del túnel de secado. m^2	O	0.9811
Temperatura de la superficie de la zanahoria. $^\circ C$	T_s	66
Conductividad térmica del sólido. $W/m \text{ } ^\circ C$	K_s	1.03E-03
área del sólido en contacto con el aire entre si. m^2	A_u	1
Calor latente de evaporación del agua. cal/g	L_S	580.5
EXPERIMENTO		
Temperatura del aire $^\circ C$	T	83
Temperatura de bulbo seco.	T_B	25.1
Temperatura de bulbo húmedo	T_H	18.1
Flujo masico del aire.	G	12.3677
Espesor de las rodajas. cm^2	E	0.25
Humedad al inicio del periodo de velocidad variable. gr./gr.	X_1	0.88
Diámetro del túnel de secado	D	9.8425
Humedad inicial en base seca.	X_S	7.3333
CALCULO DE PROPIEDADES		
Temperatura en $^\circ K$	T_K	356
Viscosidad del aire. Cp.	V	0.0002113
Capacidad calorífica. $J \text{ mol}^{-1} \text{ k}^{-1}$	C_p	1
		0.2330075
		2
		0.7312042
Número de Prandt. C_p/k	Pr	7
Coefficiente de transferencia de calor por convección. $W/m^2 \text{ } ^\circ C$	h_c	0.0001332
Coefficiente total de transferencia de calor por conducción $W/m^2 \text{ } ^\circ C$	U_k	8
Rapidez de evaporación constante de secado. (masa/tiempo área.)	N_c	4.12E-03
		0.0074734
		7
		35.555555
Área de secado por unidad de masa cm^2	A	6
Variación del contenido de agua con respecto al tiempo.	DX/DO	0.2657232
Humedad en equilibrio	X_0	3
Humedad inicial en base humedad. gr./gr. s	X_1	0
		0.88

Número de pruebas	I	10	
Variable	X	0.8056	BUENO
Rapidez de secado. (masa/tiempo área.)	N	6.84E-03	
Área específica de secado	Ae	2.43E-01	

	TIEMPO	HUMEDA D	
DATOS	1	0	7.3333
	2	5	6.361
	3	10	5.11
	4	15	3.86
	5	20	2.8888
	6	25	1.916
	7	30	1.22
	8	35	0.8056
	9	40	0.5278
	10	45	0.3889
	11	50	0.25
	12	55	0.1111
	13	60	0.0417
	14	65	0.0417
	15	70	0.0417

3.1.1 Esta grafica nos indica en que punto la humedad decrece y en donde se hace constante.

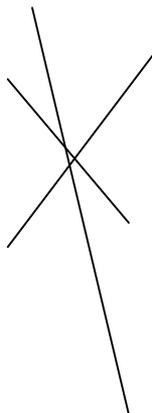


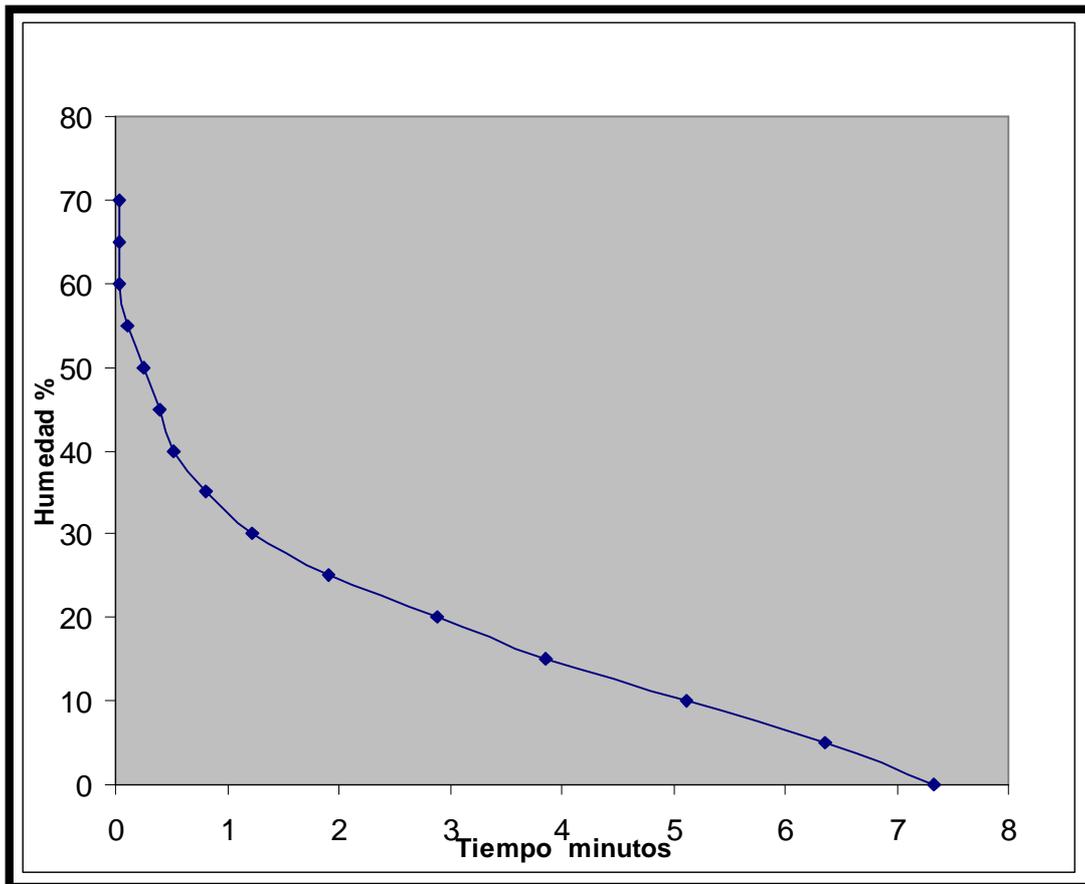
3.2 Programa 2 calcula la variación del contenido de humedad en el periodo constante y el periodo decreciente utilizando un modelo teórico.

Datos	X	Y	M	SM	RP
1	0	7.3333	-0.19446	-0.19446	-0.19446
2	5	6.361	-0.2502	-0.44466	-0.22233
3	10	5.11	-0.25	-0.69466	0.23155333
4	15	3.86	-0.19424	-0.8889	-0.222225
5	20	2.8888	-0.19456	-1.08346	-0.216692
6	25	1.916	-0.1392	-1.22266	0.20377667
7	30	1.22	-0.08288	-1.30554	0.18650571
8	35	0.8056	-0.05556	-1.3611	-0.1701375
9	40	0.5278	-0.02778	-1.38888	-0.15432
10	45	0.3889	-0.02778	-1.41666	-0.141666
11	50	0.25	-0.02778	-1.44444	0.13131273
12	55	0.1111	-0.01388	-1.45832	0.12152667
13	60	0.0417	0	-1.45832	0.11217846
14	65	0.0417	0	-1.45832	0.10416571
15	70	0.0417	0.00059571	1.45772429	0.09718162

BIEN

3.2.1 Esta grafica nos muestra que al utilizar un modelo teórico la curva hace un cambio





3.3 Programa 3 ajusta los datos de tiempo contra humedad utilizando el método de mínimos cuadrados. El cual consiste formar un polinomio de grado 4 y elevar los datos de humedad a la potencia 2,3,4,5,6,7,8 y sacar sumatorias de estas, posteriormente empezamos a formar la matriz empezando desde la sumatoria “ I “ que tiene mayor potencia, después seguiría el H, G, F, E = M formando primero un renglón y después columnas hasta formar la matriz, una vez obtenido esta se resuelve por cualquier método, el que se tomo fue el de Cramer que se resuelve del siguiente modo: primero se toma el primer renglón y la primera columna así empezamos con la (I, H, G, F, E, H), y no tomamos M , después (H, G, F, E, D) sin tomar L, así hasta terminar con la ultima variable que sería (na₀), los coeficientes resultantes que resultan de la matriz se sustituyen en la ecuación No. 58 derivándola y obteniendo la pendiente, luego se saca la segunda derivada de esta misma ecuación dando la No. 59 y resolviéndola por la fórmula general para finalmente sacar el punto de inflexión que es donde la velocidad de secado es más rápida.

Tiempo	% Humedad				
θ	Y	Y ²	Y ³	Y ⁴	Y ⁵
0	7.3333	53.7772889	394.364993	2891.9968	21207.8801
5	6.361	40.462321	257.380824	1637.19942	10414.2255
10	5.11	26.1121	133.432831	681.841766	3484.21143
15	3.86	14.8996	57.512456	221.99808	856.912589
20	2.8888	8.34516544	24.1075139	69.6417862	201.181192
25	1.916	3.671056	7.0337433	13.4766522	25.8212655
30	1.22	1.4884	1.815848	2.21533456	2.70270816
35	0.8056	0.64899136	0.52282744	0.42118979	0.33931049
40	0.5278	0.27857284	0.14703074	0.07760283	0.04095877
45	0.3889	0.15124321	0.05881848	0.02287451	0.0088959
50	0.25	0.0625	0.015625	0.00390625	0.00097656
55	0.1111	0.01234321	0.00137133	0.00015235	1.6927E-05
60	0.0417	0.00173889	7.2512E-05	3.0237E-06	1.2609E-07
65	0.0417	0.00173889	7.2512E-05	3.0237E-06	1.2609E-07
70	0.0417	0.00173889	7.2512E-05	3.0237E-06	1.2609E-07
525	30.8976	149.914799	876.394099	5518.89558	36193.325
A	B	C	D	E	F

Y ⁶	Y ⁷	Y ⁸	θY	θY^2	θY^3	θY^4
155523.747	1140502.3	8363645.49	0	0	0	0
66244.8885	421383.736	2680421.94	31.805	202.311605	1286.90412	8185.9971
17804.3204	90980.0772	464908.194	51.1	261.121	1334.32831	6818.41766
3307.6826	12767.6548	49283.1476	57.9	223.494	862.68684	3329.9712
581.172228	1678.89033	4849.97839	57.776	166.903309	482.150278	1392.83572
49.4735448	94.7913117	181.620153	47.9	91.7764	175.843582	336.916304
3.29730396	4.02271083	4.90770721	36.6	44.652	54.47544	66.4600368
0.27334853	0.22020958	0.17740084	28.196	22.7146976	18.2989604	14.7416425
0.02161804	0.01141	0.0060222	21.112	11.1429136	5.8812298	3.10411309
0.00345961	0.00134544	0.00052324	17.5005	6.80594445	2.6468318	1.02935289
0.00024414	6.1035E-05	1.5259E-05	12.5	3.125	0.78125	0.1953125
1.8805E-06	2.0893E-07	2.3212E-08	6.1105	0.67887655	0.07542318	0.00837952
5.2579E-09	2.1926E-10	9.143E-12	2.502	0.1043334	0.0043507	0.00018142
5.2579E-09	2.1926E-10	9.143E-12	2.7105	0.11302785	0.00471326	0.00019654
5.2579E-09	2.1926E-10	9.143E-12	2.919	0.1217223	0.00507582	0.00021166
243514.881	1667411.7	11563295.5	376.6315	1035.06483	4224.08641	20149.6774
G	H	I	J	K	L	M

Cálculo de lá pendiente.

θ	$y' = a_4 \theta^3 + a_3 \theta^2 +$
----------	--------------------------------------

	$a_2 \theta + a_1$
0	0.1543
5	-120030.059
10	-240060.272
15	-360090.485
20	-480120.698
25	-600150.911
30	-720181.124
35	-840211.337
40	-960241.55
45	-1080271.76
50	-1200301.98
55	-1320332.19
60	-1440362.4
65	-1560392.61
70	-1680422.83
525	-12603170.1

La solución de la matriz es por el método de Cramer formando el determinante, los datos que aparecen en cada tabla son las sumatorias utilizado el método para formarlas, el valor $A = 1.00e+006$ y el de B, C, D, E, F, son la solución de cada determinante. Los valores de (v,w,x,y, z) son los coeficientes que salieron de resolverlo.

A=[376.6315 1667411.7 243514.881 36193.325 5518.89558; 1667411.7 243514.881 36193.325 5518.89558 876.394099; 243514.881 36193.325 5518.89558 876.394099 149.914799; 36193.325 5518.89558 876.394099 149.914799 525; 5518.89558 876.394099 149.914799 525 15]				
A = 1.0e+006 *				
0.0004	1.6674	0.2435	0.0362	0.0055
1.6674	0.2435	0.0362	0.0055	0.0009
0.2435	0.0362	0.0055	0.0009	0.0001
0.0362	0.0055	0.0009	0.0001	0.0005
0.0055	0.0009	0.0001	0.0005	0.0000
B=[36193.325 1667411.7 243514.881 36193.325 558.89558; 5518.89558				

243514.881 36193.325 5518.89558 876.394099; 876.394099 36193.325 5518.89558 876.394099 149.914799; 376.6315 5518.89558 876.394099 149.914799 525; 30.8976 876.394099 149.914799 525 15]
B = 1.0e+006 *
0.0362 1.6674 0.2435 0.0362 0.0006
0.0055 0.2435 0.0362 0.0055 0.0009
0.0009 0.0362 0.0055 0.0009 0.0001
0.0004 0.0055 0.0009 0.0001 0.0005
0.0000 0.0009 0.0001 0.0005 0.0000
C=[36193.325 11563295.5 243514.881 36193.325 5518.89558; 5518.89558 1667411.7 36193.325 5518.89558 876.394099; 876.394099 243514.881 5518.89558 876.394099 149.914799; 376.6315 36193.325 876.39099 149.914799 525; 30.8976 5518.89558 149.914799 525 15]
C = 1.0e+007 *
0.0036 1.1563 0.0244 0.0036 0.0006
0.0006 0.1667 0.0036 0.0006 0.0001
0.0001 0.0244 0.0006 0.0001 0.0000
0.0000 0.0036 0.0001 0.0000 0.0001
0.0000 0.0006 0.0000 0.0001 0.0000
D=[36193.325 11563295.5 1667411.7 36193.325 5518.89558; 5518.89558 1667411.7 243514.881 5518.89558 876.394099; 876.394099 243514.881 36193.325 876.394099 149.914799; 376.6315 36193.325 5518.89558 149.914799 525; 30.8976 5518.89558 876.394099 525 15]
D = 1.0e+007 *
0.0036 1.1563 0.1667 0.0036 0.0006
0.0006 0.1667 0.0244 0.0006 0.0001
0.0001 0.0244 0.0036 0.0001 0.0000
0.0000 0.0036 0.0006 0.0000 0.0001
0.0000 0.0006 0.0001 0.0001 0.0000

E=[36193.325 11563295.5 1667411.7 243514.881 5518.89558; 5518.89558 1167411.7 243514.881 36193.325 876.394099; 876.394099 243514.881 36193.325 5518.89558 149.914799; 376.6315 36193.325 5518.89558 876.394099 525; 30.8976 5518.89559 876.394099 149.914799 15]	
E = 1.0e+007 *	
0.0036 1.1563 0.1667 0.0244 0.0006	
0.0006 0.1167 0.0244 0.0036 0.0001	
0.0001 0.0244 0.0036 0.0006 0.0000	
0.0000 0.0036 0.0006 0.0001 0.0001	
0.0000 0.0006 0.0001 0.0000 0.0000	
F =[36193.325 11563295.5 1667411.7 243514.881 36193.325; 5518.89558 1667411.7 243514.881 36193.325 5518.89558; 876.394099 243514.881 36193.325 5518.89558 876.394099; 876.6315 36193.325 5518.89558 876.394099 149.914799; 30.8976 5518.89558 876.394099 149.914799 525]	
F = 1.0e+007 *	
0.0036 1.1563 0.1667 0.0244 0.0036	
0.0006 0.1667 0.0244 0.0036 0.0006	
0.0001 0.0244 0.0036 0.0006 0.0001	
0.0001 0.0036 0.0006 0.0001 0.0000	
0.0000 0.0006 0.0001 0.0000 0.0001	

Estos son los determinantes a resolver para obtener los coeficientes que se sustituyeron en la ecuación No. 58 para obtener la pendiente.

$$v = \det(B)/\det(A)$$

$$v = -2.0474e-004$$

$$w = \det(C)/\det(A)$$

$$w = -1.1238e-004$$

$$x = \det(D)/\det(A)$$

$$x = -5.9253e-004$$

$$y = \det(E)/\det(A)$$

$$y = -9.3614e-004$$

$$z = \det(F)/\det(A)$$

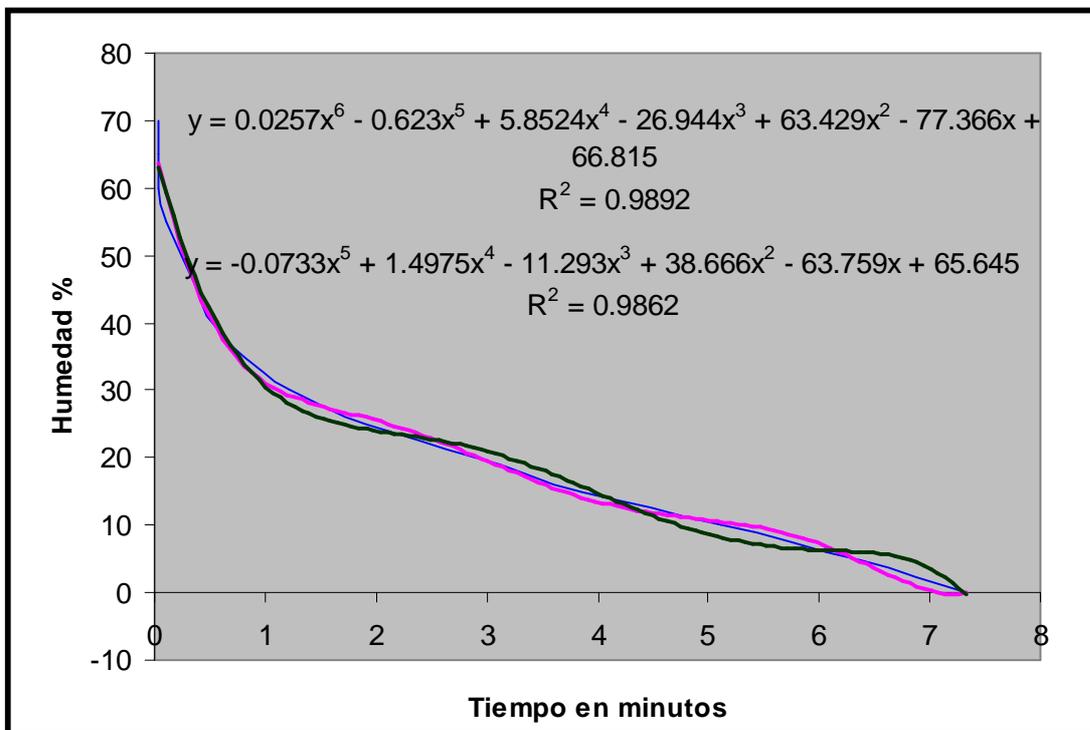
$$z = -0.0016$$

Cálculo del punto de inflexión, Fórmula General.

$$(-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac})/2a$$

Punto de inflexión 1.22 cambio de velocidad de secado.

3.3.1 Esta gráfica nos indica que fué ajustada por el método de mínimos cuadrados Dándonos un punto de inflexión 1.22 que es donde aumenta tiene la velocidad de secado.



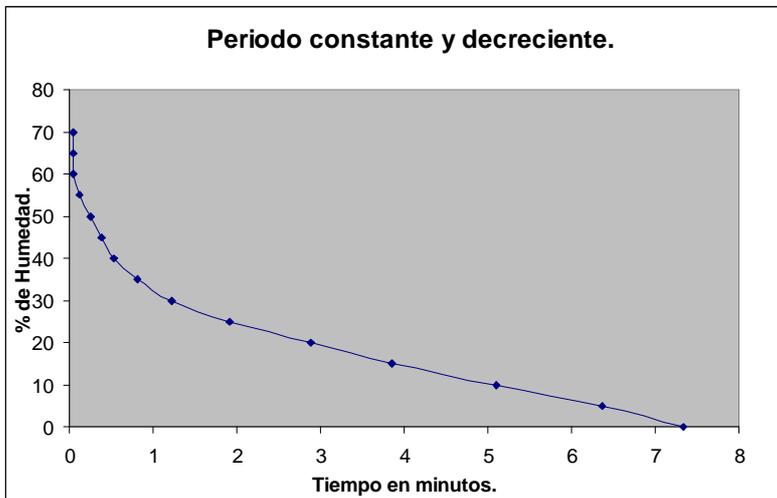
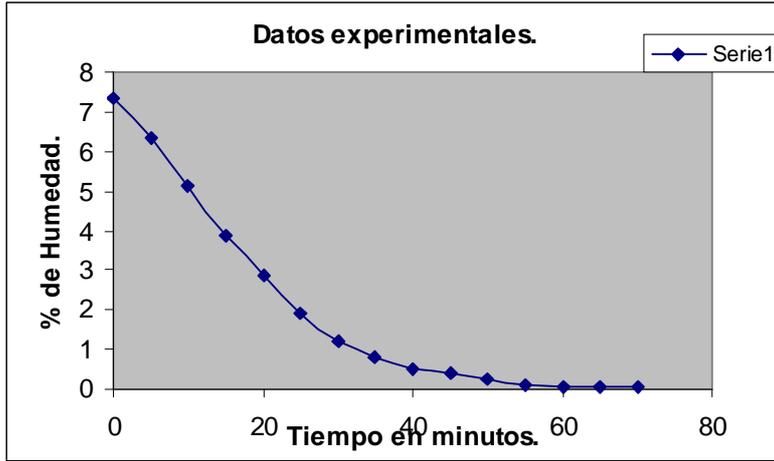
Curva lineal

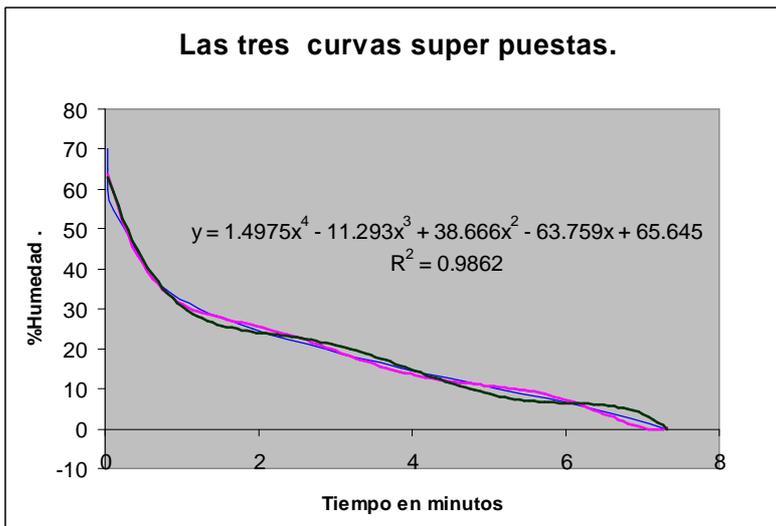
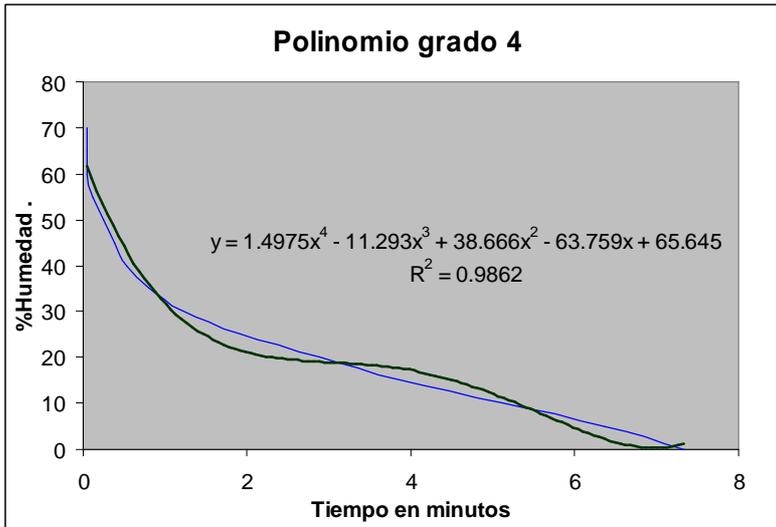


Curva DE DATOS
EXPERIMENTALES

Curva ajustada o
polinomial

Comparación de las curvas en los tres modelos matemáticos





CAPÍTULO 1V

CONCLUSIONES

4.1 Se concluye que los objetivos planteados fueron alcanzados en su totalidad.

- El programa 1 que calcula la velocidad de secado por el método de la pendiente, este programa predice un cambio de pendiente a 1.22 siendo el experimental a 1.25 por lo que el error es mínimo y es donde hay un cambio de velocidad de secado y nos muestra que a los 60 minutos podemos llegar a un secado óptimo, recordando que el producto que se secó no se deshidrató por completo pues ese no fue el objetivo si no únicamente quitar el exceso de humedad de un 70 % según la norma oficial de deshidratación de frutas y verduras,.
- El programa 2 calculó la variación del contenido de humedad en el periodo constante y en el periodo decreciente es decir el punto donde se hace el tiempo y la humedad constantes, en este modelo se observó cuando la pendiente es

igual o menor al punto de inflexión y al ser comparado con el programa 1 nos da una grafica digamos parecida.

- En el programa 3 busca un ajuste de los datos experimentales utilizando un polinomio de grado 4 , pero al hacer una comparación de los tres programas se observó que el de mejor ajuste es por el primer programa pues en este es donde al tomar datos reales pudimos variar para encontrar un tiempo y humedad optimas de secado y se pudieron ocupar como base para secar cualquier verdura, pues los modelos son necesarios para cualquier investigación pero los datos reales son los que mandan y son los que nos dan las limitantes.

4.2 SUGERENCIAS.

Para dar continuidad a este proyecto se formulan las siguientes sugerencias:

- Realizar un balance de entrada y salida de energía afectada por la radiación solar pues esta no fue objetivo de este proyecto.
- Investigar modelos matemáticos que se apeguen mas a la realidad.

- Realizar el diseño y armado en la FEZ ZARAGOZA de secadores solares para continuar con el proyecto.

CAPÍTULO V

BIBLIOGRAFÍA

5.1 REFERENCIA

- 1.-Introducción a la Termodinámica. J. M. Smith, H.C. Van Ness
Cuarta Edición Pag. 107-108**

- 2.- Principios de Transferencia de Masa. Ricardo Lobo Oehmichen
Segunda Edición. 32,204,15,28,30,260, 301,328 .
- 3.- Proceso de Transferencia de Calor por Donald Q. kern
Segunda Edición. Pag. 19,43,85,111
- 4.- [99RE Analytical and experimental study of a modular solar dryer.pdf](#)
Renewable Energy 16 (1999) Pag. 30
I. FARKAS. I. SERES and CS. MESZAROS
Department of Physics and Process Control, Giidollij University of Agricultural
- 5.- Principios of Heat transfer Stephen Wheate
Tercera edición pag. 7,9,309, 318
- 6.- El secado de Sólidos En la Industria Química Dr. Marcelo Terrizzar
Tercera Edición.92,98,339,269,294,229 y 230.
- 7.- Evaluación de Un Colector de energía y estudio del proceso de secado de la zanahoria en un secador solar. Díaz Pérez Martín 1992 Cuautitlan Izcalli.
Ingeniería en alimentos Pag. 22-45
- 8.-Diseño de un secador solar Cuautitlan Izcalli. Ingeniería en alimentos.
Carapia Ortiz Gerardo 199 Pag. 38-66
- 9.- Diseño de un secador solar para frutas cristalizadas.
Torres Ávila, Carlos A. 1994 Cuautitlan Izcalli. Ingeniería en alimentos.
Pág. 33-38
- 10.- Caracterización y aplicación de un secador solar para frutas vegetales
Diaz Cortes, Maria Graciela 1996 Cuautitlan Izcalli. Ingeniería en alimentos
Pág. 42-55
- 11.- Empleo de un secador solar para frutas y hortalizas en el valle de Guayamas Sonora. Juárez Domínguez Francisco 1985 Cuautitlan Izcalli. Ingeniería en alimentos Pág. 16-18
- 12.- Evaluación del colector sola de energía solar y estudio del proceso de secado Cuautitlan Izcalli. Ingeniería en alimentos de zanahoria en un secador solar.Mendoza Ríos Rodolfo. 198 Pag. 33-35
- 13.-[99RE Design and experimental evaluation of a solar dryer for commercial high](#)

[quality hay production.pdf](#)

Renewable Energy 16 (1999) 19-22

E.A. Arinze. G.J. Schoenau and S. Sokhansmj

**College of Engineering, University of Saskatchewan, Saskatoon, SK, Canada
S7N 5A9**

14.-Diseño de un secador Solar para Frutas Cristalizadas

Torres Ávila Carlos. 1994 Cuautitlan Izcalli. Ingeniería en alimentos

Pag. 22-25

15.-[99RE Design of an experimental solar assisted dryer for palm oil fronds.pdf](#)

Renewable Energy 16 (1999) 643-646

Supranto. Sopian, K., Daud, W.R.W., Othman, M.Y. and Yatim, B.

Solar Energy Research Group, University Kebangsaan Malaysia, Bangi, Selangor.

16.- [99SE Experimental studies on a solar air collector with metal matrix absorber.pdf](#)

Solar Energy Vol. 65, No. 2, pp. 91-98, 1999

, † A. KOLB*, E. R. F. WINTER* and R. VISKANTA**

*Lehrstuhl C für Thermodynamik, Technische Universität München, München, Germany

**Heat Transfer Laboratory, School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, IN 47907-1288, USA

17.- Metodología para el estudio de secadores por aspersión

Alvarado Barcenas Mario. 1985 Cuautitlan Izcalli Ingeniería Química

Pag. 45-47

18.- Comparación economía industrial de dos hornos secadores y de descomposición para producir carbonato de sodio. Cuautitlan Izcalli. Ingeniería en alimentos Villa Reveles Ernesto. 1961

Pag. 33-35

19.- [99RE Optimization of solar crop drying.pdf](#)

Renewable Energy 16 (1999) 749-752

I.A. McDoom, R. Ramsaroop, R. Saunders, A. Tang Kai

Department of Physics, The University of the West Indies, St. Augustine, Trinidad.

20.-Bases para el diseño de secadores de cama fluidizada.

Martines Peralta Sergio. 1969 Cuautitlan Izcalli. Ingeniería Química

Pag. 20-24

21.- Optimización en el diseño secadores continuos rotatorios.

Beristain Gomez Federico. 1965 Cuautitlan Izcalli. Ingeniería Química

Pag. 43-49

- 22.- Estudio monográfico sobre secadores rotatorios.**
Valencia Mulkay Gabriel. 1971 Cuautitlan Izcalli. Ingeniería Química
Pag.49-52
- 23.- Contribución al estudio sobre secadores por atomización**
Bazan Villegas Carlos. 1973 Facultad de Química.
Pag. 48-51
- 24.- Diseño de una practica de laboratorio sobre secadores rotatorios.**
Carranza Abasolo. 1976 Facultad de Química.
Pag. 38-39
- 25.-Metodología para el diseño de secadores por aspersion en la industria de**
proceso Cuautitlan Izcalli. Ingeniería Química
Gutiérrez Ramírez José. 1996
Pag. 25-29