

8
2ej-



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN



"EVALUACION DEL COLECTOR DE ENERGIA Y
ESTUDIO DEL PROCESO DE SECADO DE
ZANAHORIA EN UN SECADOR SOLAR"

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO EN ALIMENTOS

P R E S E N T A :

MARTIN DIAZ PEREZ

ASESORA: M. en C. MARIA ELENA VARGAS UGALDE



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 está 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.

INDICE

PAGINA

Indice de cuadros

Indice de figuras

Resumen

Introducción.....	1
1 Generalidades.....	2
1.1 Secado.....	2
1.1.1 Definición.....	2
1.1.2 Características.....	2
1.1.3 Clasificación de los procedimientos y equipos.....	4
1.1.4 Descripción del fenómeno de secado con aire.....	6
1.1.5 Periodos de secado.....	8
1.2 Zanahoria.....	13
1.2.1 Normas de calidad.....	14
1.2.2 Composición y valor nutritivo.....	16
1.2.3 Utilización.....	16
1.3 Energía.....	18
1.3.1 Antecedentes energéticos.....	18
1.3.1.1 Fuentes de energía.....	18
1.3.1.2 Producción y consumo nacional de energía..	19
1.3.2 Energía solar.....	20
1.3.2.1 Aplicaciones.....	21
1.3.2.2 Secado solar.....	24
1.3.2.3 Conceptos básicos sobre energía solar.....	25
1.3.2.4 Radiación solar sobre la superficie de	

la tierra.....	31
2 Diseño experimental.....	35
2.1 Objetivos particulares.....	35
2.2 Hipótesis.....	36
2.3 Materiales y equipos.....	37
2.4 Descripción del equipo.....	38
2.5 Mantenimiento, modificaciones y creación de partes del equipo.....	41
2.6 Procedimiento.....	42
3 Análisis de resultados.....	48
3.1 Tratamiento de datos.....	48
3.2 Resultados.....	60
5 Conclusiones.....	80
6 Recomendaciones.....	82
Bibliografía.....	84
Nomenclatura.....	90

INDICE DE CUADROS

CUADRO	NOMBRE	PAGINA
I	Clasificación por Tamaños de la Zanahoria.....	15
II	Composición Química de la Zanahoria.....	17
III	Clasificación de las Fuentes de Energía.....	19
IV	Producción Total de Energía en México en 1989.....	20
V	Consumo Nacional de Energéticos en 1989.....	20
VI	Arreglo experimental en el secador.....	43
VII	Angulo de inclinación del colector y fecha en la cual se realizó cada prueba experimental.....	43
VIII	Eficiencias del colector (η) en convección forzada y aletas captadoras con características especulares.....	60
IX	Eficiencias del colector (η) en convección forzada y aletas captadoras con superficie negra.....	60
X	Incrementos de temperatura de aire máximos en el colector en convección forzada.....	63
XI	Relación $\Delta T/I_r$ en convección natural y aletas captadoras con características especulares.....	66
XII	Relación $\Delta T/I_r$ en convección natural y aletas captadora con superficie negra.....	66
XIII	Diferencias de temperatura de aire entre la parte superior de la cabina y la salida del colector.....	70
XIV	Valores de velocidad de secado en el periodo constante (N_c), de humedad crítica (X_c) y de coeficientes de transferencia de masa (K_y) para el periodo de secado a velocidad constante bajo diferentes condiciones de secado.....	76

INDICE DE FIGURAS

FIGURA	NOMBRE	PAGINA
1	Esquema del movimiento aparente del sol para ilustrar la declinación (δ).....	28
2	Angulo de incidencia (θ) en dos latitudes diferentes..	29
3	Ecuación del tiempo.....	31
4	Piranómetro termodiferencial con sombreador Insolar and Metrix, S. A.; conectado a un multímetro digital Precision.....	34
5	Esquema del secador empleado en la experimentación....	39
6	Esquema de la distribución para medir la velocidad del aire en la cabina deshidratadora.....	44
7	Diagrama del pretratamiento de la zanahoria para el secado.....	45
8	Gráfica de eficiencia promedio del colector vs velocidad de aire; para convección forzada en colector pintado y no pintado.....	61
9 a 12	Gráficas de aumento de temperatura en el colector (ΔT) y de radiación total real (I_T) vs hora del día; para diferentes velocidades de aire en convección forzada; colector no pintado.....	64
13 a 16	Gráficas de aumento de temperatura en el colector (ΔT) y de radiación total real (I_T) vs hora del día; para diferentes velocidades de aire en convección forzada; colector pintado.....	65
17 a 19	Gráficas de aumento de temperatura en el colector	

	(ΔT) y de radiación total real (I_r) vs hora del día; para diferentes inclinaciones del colector en convección natural; colector no pintado.....	68
20 a 22	Gráficas de aumento de temperatura en el colector (ΔT) y de radiación total real (I_r) vs hora del día; para diferentes inclinaciones del colector en convección natural; colector pintado.....	69
23	Gráficas de humedad adimensional (X/X_0) vs tiempo de secado. Convección natural; inclinación del colector de 7 grados; colector no pintado.....	73
24	Gráficas de humedad adimensional (X/X_0) vs tiempo de secado. Comparación entre diferentes velocidades de aire; colector no pintado.....	73
25	Gráficas de humedad adimensional (X/X_0) vs tiempo de secado. Comparación entre diferentes inclinaciones del colector; colector pintado.....	74
26	Gráficas de humedad adimensional (X/X_0) vs tiempo de secado. Comparación entre diferentes velocidades de aire; colector pintado.....	74

RESUMEN

Con la finalidad de contribuir al desarrollo de equipos de secado de alimentos que emplean energía solar como fuente de calor se realizó una evaluación experimental del comportamiento de un colector de energía de un secador solar de frutas y hortalizas tipo cabina, y un estudio del proceso de secado de zanahoria en este equipo. Para esto, se efectuaron pruebas bajo diferentes condiciones de diseño y operación del secador, tales como: características de la superficie del colector de energía, tipo de convección, inclinación del colector y velocidad del aire. Con los resultados obtenidos fue posible determinar que con las aletas del colector pintadas de negro se obtenían valores más altos de eficiencia de captación de energía que con las aletas con características especulares¹; se comprobó también que con ángulos de inclinación del colector mayores se presenta una mayor movilidad del aire a través del equipo, lo cual favorece el aprovechamiento de energía; también se obtuvo que en este diseño se presentan mayores eficiencias de captación de energía así como mayores reducciones de humedad del producto en el secado cuando se trabaja con mayores velocidades de flujo de aire.

¹Término utilizado para describir una superficie lisa con alta reflexión (2).

INTRODUCCION

El proceso de secado de alimentos presenta numerosas ventajas como método de conservación, tales como: facilitar la manipulación de los materiales en algún tratamiento posterior, reducir los costos de transporte y almacenamiento, conservar un producto durante largo tiempo, etc. (7, 9, 10, 16, 23) sin embargo requiere un alto consumo de energía (10, 24); esto ha motivado la búsqueda de métodos de secado que permitan el mayor aprovechamiento de energía posible y de equipos que puedan utilizar las diversas fuentes de energía disponibles.

Por otra parte, los resultados obtenidos de los estudios sobre las condiciones del sector energético en los últimos años han obligado a las naciones a desarrollar estrategias que permitan la transición de la era de los hidrocarburos a otras fuentes de energía. Es así como en los últimos años se ha motivado el desarrollo de las fuentes no convencionales de energía, como es el caso de la energía solar (12, 15, 21, 27). En consecuencia, en este trabajo se pretende contribuir al desarrollo de equipos de secado de alimentos que utilizan energía solar. Por ello, el objetivo general del mismo es:

Contribuir al desarrollo de equipos de secado de alimentos que emplean energía solar como fuente de calor, mediante la evaluación del colector de energía de un secador solar de frutas y hortalizas tipo cabina trabajado bajo diferentes condiciones de diseño y operación; así como estudiando la influencia de estas condiciones en el proceso de secado de un material alimenticio.

1 GENERALIDADES

1.1 SECADO

1.1.1 DEFINICION

En términos generales, se considera como deshidratación o secado de alimentos al proceso que permite eliminar por vaporización o sublimación (liofilización) la mayor cantidad del agua de un alimento líquido o sólido, y que resulta suficiente para asegurar la preservación del alimento (7, 10).

El proceso de deshidratación reduce la actividad de agua en los sólidos del alimento a valores donde los microorganismos que causan su deterioro no pueden crecer ni multiplicarse y las reacciones enzimáticas y químicas que provocan cambios indeseables en su composición se reducen (7, 10).

El secado se emplea en muchos productos alimenticios, dentro de los principales están los siguientes: granos de cereal, leche en polvo (completa o descremada), frutas, café, legumbres (en especial puré de papa, legumbres para sopas, ajos cebollas, champiñones), huevo en polvo, pastas alimenticias, algunas preparaciones de carne, algunos alimentos para animales, etc. (7, 9).

1.1.2 CARACTERISTICAS

El secado es uno de los métodos más antiguos de preservación

de alimentos empleados por el hombre (7, 9, 10). En la actualidad constituye uno de los métodos más ampliamente usados para conservar los alimentos debido a las ventajas que presenta, tales como:

- 1.- Aumentar considerablemente el tiempo de conservación.
- 2.- Mantener las propiedades químicas y nutritivas de los productos en la mayoría de los casos.
- 3.- Reducir el peso y algunas veces el volumen de los productos.
- 4.- Permitir la utilización satisfactoria y cómoda del producto final.
- 5.- Aumentar el valor y la utilidad de desperdicios o subproductos y aprovechar la sobreproducción.

- El secado aumenta considerablemente el tiempo de conservación, logrando un mayor tiempo de permanencia del producto en almacenes mientras se le traslada, permitiendo que llegue a un mayor número de consumidores, factor muy importante pues muchas veces el tiempo es un obstáculo para el abastecimiento de ciertos productos en diferentes lugares del país y en el caso de exportación, en diferentes países del mundo.

- En algunos casos el secado permite mantener las propiedades químicas y nutritivas de los productos, los cuales llegan a ser más afectados por el empleo de otros métodos de conservación tales como el enlatado; por ejemplo la degradación de vitaminas que sufren las hortalizas por causa del tratamiento térmico en la esterilización.

- La reducción de peso y algunas veces de volumen facilita y economiza el manejo, almacenamiento y transporte de los productos, lo cual es importante sobre todo en la importación y exportación de alimentos. Esta característica también facilita la manipulación en algún tratamiento posterior y aumenta la capacidad de otros aparatos o instalaciones del proceso; un ejemplo de esto es el huevo en polvo, el cual se utiliza como materia prima de varios productos.

- En ocasiones modifica las características físicas de los materiales de forma tal que permite la utilización satisfactoria y cómoda del producto final, como en el caso de café o leche soluble instantáneos (7, 23).

- Permite obtener productos de utilidad a partir de desperdicios o subproductos, a la vez permite aprovechar la sobreproducción que existe comunmente en cada cosecha debido a la falta de comercialización completa de ciertos productos (16, 23).

1.1.3 CLASIFICACION DE LOS PROCEDIMIENTOS Y EQUIPOS DE SECADO

Los procedimientos y equipos de secado pueden clasificarse tomando en cuenta diversos criterios que permiten diferenciarlos, tales como (9, 31):

1) Presión de operación: si la deshidratación se efectúa a la presión atmosférica o a vacío.

2) Mecanismo de transferencia de calor: si la transferencia

de calor se hace por convección, conducción o radiación.

3) Características del material a secar: la forma y el estado de dispersión del producto: sólido, película líquida más o menos viscosa, aerosol, etc.

4) Movimiento de los componentes: el movimiento del producto, del fluido de calentamiento o de ambos.

5) Tipo de operación del equipo: si la operación es continua o discontinua (por lotes).

6) Presencia de reciclado de aire: si existe o no reciclado parcial de aire.

7) Forma de calentamiento de aire: el modo de calentamiento del aire: directo, por mezcla con gases de combustión o indirecto.

De acuerdo con las condiciones físicas usadas para adicionar calor y extraer el vapor de agua hay tres clases diferentes de procesos de secado:

1) Secado por contacto con aire a presión atmosférica, en el que se transmite calor a la sustancia alimenticia por aire caliente (convección) o por superficies calientes (conducción). En todos los casos el vapor de agua formado se mezcla con aire, que constituye así el medio que sirve para eliminar el vapor.

2) Secado a vacío, en donde se aprovecha la propiedad de que

la evaporación del agua tiene lugar más fácilmente al disminuir la presión. La transmisión de calor se produce casi siempre por conducción y raras veces por radiación a partir de una superficie caliente o calentamiento dieléctrico. Generalmente el vapor de agua se retira por condensación en estado líquido o por aspiración (eyector de vapor).

3) Liofilización o criodesecación, donde el vapor de agua se extrae por sublimación desde el alimento previamente congelado; la estructura del alimento se conserva mejor. Lo más frecuente es eliminar el vapor de agua por condensación.

Los procedimientos que utilizan el aire caliente son los más empleados en la industria alimentaria. (7, 9, 10).

Entre los equipos de secado más comunes en la industria alimentaria se encuentran los siguientes: secadores de bandejas, de anaqueles, de gabinete o de compartimento, secadores de túnel o túneles de secado, secadores rotatorios, secadores de tolva, secadores de cinta, secadores de rodillos o de tambor, secadores de lecho fluidizado, secadores neumáticos, secadores por vacío, secadores liofilizadores, secadores de banda transportadora perforada, secadores por atomización, horno de aire caliente, secadores de platos y secadores solares (7, 10, 23).

1.1.4 DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO DE SECADO CON AIRE

En el secado con aire la velocidad de extracción de agua depende de las características del aire, de las propiedades del

alimento y del diseño del secador (10).

La humedad puede estar ligada al producto en diversos grados. Ciertos términos que se utilizan para describir el contenido de humedad son (35):

Humedad de equilibrio X^* : es el contenido de humedad de una sustancia que está en el equilibrio con una presión parcial dada de vapor.

Humedad no ligada: se refiere a la humedad de una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio igual que la del líquido puro a la misma temperatura.

Humedad ligada: se refiere a la humedad contenida en una sustancia que ejerce una presión de vapor en el equilibrio menor a la del líquido puro a la misma temperatura.

Humedad libre: es la humedad contenida en una sustancia en exceso de la humedad de equilibrio: $X - X^*$. Sólo puede evaporarse la humedad libre; el contenido de humedad libre de un sólido depende de la concentración del vapor en el gas.

En muchos casos la mayor parte del agua está retenida débilmente, pudiéndose considerar, para fines de secado, como agua libre en la superficie (10).

Desde el punto de vista físico, la eliminación de agua de un alimento húmedo se hace normalmente retirándola bajo la forma de

vapor. En la operación intervienen dos fenómenos fundamentales:

1) La transferencia de calor que aporta la energía necesaria para la transformación del agua en vapor (principalmente calor latente de vaporización).

2) La transferencia de agua a través y fuera del alimento.

Entre los parámetros que permiten regular la intensidad de estos fenómenos se encuentran: la superficie de intercambio, el contenido de humedad y presión de vapor de equilibrio del agua contenida en el producto, humedad, temperatura, presión y movimiento del aire que rodea el alimento. Del valor de estos parámetros dependen la velocidad de deshidratación, las características del producto, el rendimiento energético del secador, el costo de la operación, etc. (7, 10).

1.1.5. PERIODOS DE SECADO

El comportamiento del proceso de secado de los alimentos se estudia experimentalmente a través de la medición de la pérdida de peso de un producto sólido en función del tiempo; a partir de esta información es posible construir las curvas de secado, las cuales son una representación gráfica del proceso y se obtienen llevando sobre un diagrama varias relaciones como son: contenido de agua del producto en función del tiempo de secado, relación entre el contenido de agua del producto entre su contenido de agua inicial en función del tiempo, velocidad de secado en función del tiempo y la velocidad de secado en función del contenido de agua del

producto. A partir de ellas se pueden obtener los valores de humedad crítica, tiempo de secado, coeficientes de transferencia de masa, coeficientes de difusión, energía requerida y los periodos de secado. Estos se describen a continuación.

Generalmente hay dos partes principales en la curva de velocidad de secado (35), un periodo de velocidad constante y uno de velocidad decreciente.

En el periodo de velocidad constante ocurre la evaporación superficial de la humedad no ligada. Si w es la masa del material a secar, para una velocidad de secado constante:

$$\frac{dw}{dt} = \text{Constante} \dots\dots\dots(1)$$

en donde:

dw = diferencial de la masa del material en secado.

dt = diferencial de tiempo.

Se ha demostrado que la velocidad de secado en esta etapa se establece mediante un balance de las necesidades caloríficas para la evaporación y la velocidad con la cual el calor alcanza la superficie.

Si un sólido se encuentra inicialmente muy húmedo, la superficie estará cubierta con una delgada película de líquido, se supondrá como humedad total no ligada. Cuando se expone a aire relativamente seco, la evaporación tendrá lugar desde la superficie. La velocidad a la cual se evapora la humedad puede

describirse en función de k_y , un coeficiente de transferencia de masa del gas y de la humedad entre el gas en la superficie líquida Y_s y la corriente principal Y .

La velocidad de secado en esta etapa se puede acelerar modificando las condiciones del aire, por ejemplo: aumentando su temperatura, aumentando su velocidad y disminuyendo su humedad. Los efectos físicos que se pueden presentar en el producto al aumentar la velocidad de secado en esta etapa son: menor encogimiento del producto y en ciertos casos mayor pérdida de constituyentes volátiles (7, 16, 35).

Ya que los productos alimenticios contienen agua en su interior, después de un cierto tiempo de secado a velocidad constante, se observa que el agua se separa más lentamente.

El paso de la velocidad de secado constante a una velocidad más lenta tiene lugar a diferentes contenidos de humedad para los distintos productos alimenticios, a este valor de humedad se le conoce como humedad crítica X_c .

Muchos alimentos no presentan un periodo de secado a velocidad constante; algunos productos exhiben un cambio de pendiente abrupta después de un periodo de disminución de velocidad lento y continuado, por lo que en estos casos el concepto de velocidad de secado constante es una aproximación útil (10).

El final del periodo de velocidad constante significa que el

agua ha dejado de comportarse como si estuviera sobre una superficie libre y que otros factores distintos a las diferencias de presión controlan la velocidad de secado, la cual disminuye progresivamente; a esta etapa se le denomina periodo de velocidad decreciente. Los factores que regulan la velocidad de secado en esta etapa son complejos y están regidos por el movimiento interno del agua por difusión, por movimiento capilar a través del alimento, por gradiente de presiones que obliga a salir a la humedad del interior y de los diversos patrones de energía de unión de las moléculas de agua (10, 16).

En esta fase la velocidad del aire tiene poca influencia sobre la velocidad de secado porque el fenómeno que la limita es la transferencia de agua, o de vapor, del interior a la superficie del producto. Esta agua está ligada a los constituyentes del alimento y su desplazamiento a través de la capa seca es muy lento. Cuando ocurre la evaporación superficial debe haber un movimiento de la humedad desde el interior del sólido hasta la superficie. La naturaleza del movimiento modifica el secado durante el periodo de velocidad decreciente.

La difusión de la humedad puede derivarse de los gradientes de concentración entre el interior del sólido, donde la concentración es alta, y la superficie, donde es baja. Estos gradientes se fijan durante el secado de la superficie. Por otro lado la humedad no ligada en sólidos granulares y porosos se mueve a través de los capilares e intersticios de los sólidos mediante un mecanismo en el que interviene la tensión superficial (35).

En el periodo de secado de velocidad decreciente la temperatura aumenta progresivamente porque la pérdida de calor por evaporación se reduce; entonces la temperatura del producto tiende de la temperatura de bulbo húmedo del aire a la temperatura de bulbo seco del aire. La actividad de agua del producto al final del secado tiende a ser igual a la humedad relativa del aire de secado utilizado durante este periodo, por lo que para obtener productos con muy bajo contenido de humedad es recomendable utilizar un aire de muy baja humedad relativa al final del secado.

Casi siempre resulta necesario determinar el tiempo de secado mediante pruebas experimentales debido principalmente a que el valor de humedad crítica depende de la velocidad de secado, de las dimensiones del producto y de las isotérmicas de sorción del alimento.

La velocidad de cada una de las fases de secado depende de las condiciones de secado y en gran parte de las características propias del alimento. En general una concentración elevada de constituyentes polímeros, tales como proteínas, almidones (sobre todo gelatinizados) y azúcares amorfos, aumenta la proporción de agua ligada y prolonga la segunda fase de secado. Por el contrario, las sales, los azúcares cristalizados y los lípidos absorben muy poca agua, por lo que la primera fase de secado es más prolongada (7, 24, 31).

1.2 ZANAHORIA

Actualmente se conserva una gran cantidad de frutas y hortalizas por el método de secado, tales como pasas, manzanas, papas, ajos, chiles, zanahorias, etc. Algunos de estos vegetales se consumen secos y otros se reconstituyen y se pueden usar en sopas, ensaladas, guisados, pasteles, etc. Algunos otros se muelen recién secados y se pueden utilizar para hacer purés para bebés, condimentos y otros productos industriales (1, 9, 24).

En este trabajo se decidió efectuar el secado de zanahoria porque es una de las hortalizas más importantes en la alimentación humana debido a sus cualidades nutritivas y organolépticas, y por la disponibilidad que presenta para la realización de la experimentación. Las características más importantes de la misma son las siguientes:

Para efectos de la Norma Oficial Mexicana (29), se entiende por zanahoria a la raíz de la planta herbácea que pertenece a la familia de las Umbelíferas, al género *Daucus* y especie *carota*.

La zanahoria es una planta en cuya parte superior de la raíz primaria se acumulan las sustancias nutritivas de reserva, por lo que se engrosa formando la raíz carnosa (raíz verdadera). Si hacemos un corte transversal a las raíces carnosas de las zanahorias se observan claramente dos regiones: la parte interior o cilindro central (corazón) y la parte exterior (corteza). En el cilindro central hay tejidos más fibrosos y en ellos se encuentran

menos sustancias nutritivas. La corteza es más blanda, más rica en sustancias nutritivas y de color más intenso (11).

1.2.1 NORMAS DE CALIDAD

Las zanahorias se pueden clasificar de varias maneras: basandose en el color, según su forma, considerando la época de recolección (tempranas a principios de junio y tardías a principios de octubre) (28), y tomando en cuenta la longitud (cortas 3-6 cm, medio-largas 12 cm, largas 18 cm) (14, 17).

Sin embargo, para efectos de la Norma Oficial Mexicana (29), las zanahorias se clasifican de acuerdo a sus especificaciones en tres grados de calidad: México Extra, México No. 1 y México No. 2.

México Extra: las zanahorias deben de presentar como tamaño mínimo los correspondientes a las letras B ó C del Cuadro de Clasificación por Tamaños (cuadro I), y estar prácticamente libres de cualquier defecto.

México No. 1: las zanahorias pueden presentar cualquiera de los tamaños anotados en el Cuadro de Clasificación por Tamaños. Y pueden presentar como máximo un defecto menor con una tolerancia máxima de 12 %. Se consideran defectos menores a las raspaduras, grietas de hasta 1.0 cm de longitud y a las ligeras malformaciones.

México No. 2: las zanahorias pueden presentar cualquiera de

los tamaños anotados en el cuadro de Clasificación por Tamaños. Y pueden presentar como máximo un defecto mayor con una tolerancia de 7 %. Se consideran defectos mayores a las grietas de hasta 2.0 cm de longitud, raicillas secundarias y malformaciones medianas.

El tamaño de las zanahorias se determina con base en su grosor y longitud, y se clasifica de acuerdo al cuadro I:

CUADRO I. Clasificación por Tamaños de la Zanahoria.

Letra de Referencia	Longitud cm	Grosor * cm
A	menor de 9.5	mínimo 2.0
B	9.5 - 10.9	2.0 - 3.0
C	11.0 - 12.4	2.0 - 3.0
D	12.5 - 13.9	2.0 - 3.5
E	14.0 - 15.5	2.0 - 3.5
F	mayores de 15.5	2.0 - 4.0

* Grosor determinado en la base de la zanahoria.

FUENTE: Norma Oficial Mexicana NOM-FF-24-1982. Productos Alimenticios no Industrializados para uso Humano Tubérculo-Zanahoria (*Daucus carota*) Especificaciones. Secretaría de Patrimonio y Fomento Industrial. Dirección General de Normas (29).

De acuerdo a las especificaciones sensoriales y físicas de esta Norma, las zanahorias deben:

- Estar bien desarrolladas, enteras, sanas, frescas, limpias, de consistencia firme y razonablemente lisa.
- Tener forma, sabor y olor característicos.
- Estar exentas de humedad exterior anormal.
- Estar prácticamente libres de descomposición o pudrición.
- Estar prácticamente libres de defectos de origen mecánico,

entomológico, microbiológico y genético-fisiológico.

- Presentar un color que va del amarillo al anaranjado.

1.2.2 COMPOSICION Y VALOR NUTRITIVO

Respecto a la composición, la mayoría de las hortalizas contienen alta cantidad de agua y baja cantidad de proteínas y grasas. El contenido de agua por lo general es mayor del 70 % y frecuentemente mayor del 85 %, además son fuentes importantes de vitaminas y minerales, especialmente de las vitaminas A y C. Los suministros de la vitamina A, incluyendo el β -caroteno y otros carotenoides se encuentra en las frutas y en las hortalizas amarillo-anaranjadas y en las hortalizas de hojas verdes (28).

La zanahoria contiene un alto valor nutritivo, especialmente por su elevado contenido en carotenoides, α y β caroteno (provitamina A). Además de las vitaminas y de sales minerales de calcio, fósforo, hierro y potasio, de fácil asimilación, la zanahoria es fuente de cantidades considerables de carbohidratos (4, 25). La composición promedio de la zanahoria cruda se presenta en el cuadro II.

1.2.3 UTILIZACION

Con respecto a sus usos, las zanahorias se utilizan mucho como vegetal crudo o cocido; es ingrediente de sopas, guisados, ensaladas, postres y alimentos para niños. También son empleadas como materia prima para las conservas, jugos y ensaladas mixtas.

En algunos casos también se llegan a utilizar como alimento para animales y como materia prima para la extracción de algunas vitaminas (4, 6, 11, 14, 17, 36).

CUADRO II. Composición de la zanahoria en 100 gramos de peso neto.

Componente	gramos	Minerales	miligramos	Vitaminas	UI ó mg
Agua	89.0	Potasio	290.0	A	10 000 UI
Hidratos de carbono	7.9	Sodio	100.0	B ₁	0.1 mg
Fibra	1.7	Cloro	50.0	B ₂	0.5 mg
Cenizas	0.7	Calcio	41.0	C	9.4 mg
Proteínas	0.6	Fósforo	32.0	Ac. fólico	13.0 mg
Grasas	0.1	Azufre	22.0	Biotina	0.6 mg
		Magnesio	17.0		
		Hierro	7.0		
		Manganeso	0.6		
		Zinc	0.3		
		Cobre	0.14		
		Yodo	0.009		

FUENTE: Diccionario de los Alimentos, 1984. 2a. Ed. México. Ediciones CEDEL Editorial Mexicana, S. A. Barcelona-México. (6).

1.3 ENERGIA

1.3.1 ANTECEDENTES ENERGETICOS

Actualmente una de las preocupaciones mundiales más importantes es la referente al abastecimiento energético. Debido a esto se han realizado numerosos estudios para cuantificar las disponibilidades actuales y establecer las perspectivas para un futuro cercano. Los resultados de estos estudios pronostican el agotamiento inexorable de los combustibles fósiles: carbón, petróleo y gas natural. Esto ha motivado el desarrollo de fuentes no convencionales de energía; dentro de éstas, las fuentes denominadas nuevas o renovables van adquiriendo mayor importancia, como en el caso de energía solar (12, 21, 22).

1.3.1.1 FUENTES DE ENERGIA

Existen diversas fuentes de energía, pero estas pueden clasificarse en dos grupos:

1.- Fuentes de energía renovables, las cuales se reponen constantemente en la naturaleza.

2.- Fuentes de energía no renovables, las que son producto de un acumulamiento con el tiempo y cuando se consumen no se reponen fácilmente (32). En el cuadro III se resumen ambos tipos.

En dicho cuadro se puede apreciar que casi toda la energía disponible en la tierra proviene del sol. Por ejemplo la energía

producida a partir de los vegetales y animales se origina por el almacenamiento fotosintético que tiene lugar gracias a la energía solar, los combustibles fósiles como petróleo y gas son producto de procesos fotosintéticos que tuvieron lugar hace millones de años, la energía eólica tiene su fundamento en el movimiento de masas de aire originado por las diferentes fases de calentamiento que provocan los rayos solares.

CUADRO III. Fuentes de Energía.

FUENTES DE ENERGIA RENOVABLES	FUENTES DE ENERGIA NO RENOVABLES
<p>ENERGIA SOLAR DIRECTA (calor y luz): madera cosechas y ganadería biocombustibles potencia animal</p> <p>ENERGIA SOLAR INDIRECTA: agua viento oleaje gradientes térmicos mares</p> <p>ENERGIA GEOTERMICA (flujo de calor)</p>	<p>COMBUSTIBLES FOSILES: gaseoso (gas natural) líquido (petróleo, alquitran) sólido (carbón)</p> <p>ENERGIA NUCLEAR: fisión (U-235, U-239, torio-232) fusión (deuterio, litio-6)</p> <p>ENERGIA GEOTERMICA: (depósitos de calor)</p>

FUENTE: SOTO Garcia, J. F. 1984. La energía solar como alternativa de solución al problema energético. Monografía. F. O. UNAM. México, D. F. (32).

1.3.1.2 PRODUCCION Y CONSUMO NACIONAL DE ENERGIA

En nuestro país, los requerimientos energéticos se cubren principalmente por medio de fuentes de energía no renovables. La producción y consumo de energía en México en el año de 1989 se resumen en los cuadros IV y V.

CUADRO IV. Producción Total de Energía en México, 1989.
(Billones de Kilocalorías y Porcentaje).

CONCEPTO	Kcal E ²	%
Total	2 051.941	100.0
Hidrocarburos	1 841.531	89.8
Leña †	80.381	3.9
Hidroenergía	62.285	3.0
Carbón	35.204	1.7
Bagazo de caña †	19.567	1.0
Geoenergía	12.033	0.6
Nucleoenergía	0.940	n. s.

† Biomasa 4.º M

n. s. = No significativo.

FUENTE: Balance Nacional de Energía. 1989. Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal. 1990. México. D. F. (30).

CUADRO V. Consumo Nacional de Energéticos, 1989.
(Billones de Kilocalorías y Porcentaje).

CONCEPTO	kcal E ²	%
Total	1 334.218	100.0
Consumo del sector energético (Por transformación, autoconsumo y pérdida)	416.404	31.2
Consumo energético:		
Transporte	297.554	22.3
Industrial y minero	291.556	21.9
Residencial, comercial y público	185.827	13.9
Agropecuaria	23.864	1.8
Consumo no energético (Petroquímica y otros sectores)	119.013	8.9

FUENTE: Balance Nacional de Energía. 1989. Secretaría de Energía, Minas e Industria Paraestatal. 1990. México. D. F. (30).

1.3.2 ENERGÍA SOLAR

Como alternativa para garantizar el abasto energético de la humanidad se cuenta con la energía solar, la cual presenta numerosas características positivas, tales como: ser abundante, ser prácticamente ilimitada y estar libre de contaminación por no tener productos de desecho que deban eliminarse. Sin embargo,

también tiene características negativas como por ejemplo: ser intermitente, ser de muy baja intensidad en algunos lugares y estar sujeta a las variaciones astronómicas así como a las diversas condiciones meteorológicas (15, 21, 22, 26, 27, 32).

1.3.2.1 APLICACIONES

La utilización de la energía solar para diversos fines no es reciente; pero, sólo hasta la década de los 70's es cuando se ha incrementado la investigación y el desarrollo de sistemas para su captación y aprovechamiento debido a que sin necesidad de técnicas complicadas, cada vez encuentra más aplicaciones sumamente prácticas, tales como: calentamiento de agua para consumo doméstico y usos zootécnicos, destilación de agua, procesos de secado, calefacción y enfriamiento de ambientes, bombeo de agua y/o generación de cantidades moderadas de electricidad, etc. (18, 21, 22, 32).

Actualmente, las principales tecnologías para el aprovechamiento de la energía solar se pueden agrupar en cinco categorías básicas (22):

- a) Sistemas pasivos.
- b) Sistemas con colectores fijos.
- c) Sistemas con colectores móviles.
- d) Sistemas fotovoltaicos.
- e) Estanques solares.

El principio de estas tecnologías es el de convertir la radiación solar (fuente primaria) en calor y electricidad. Los sistemas solares son generalmente autónomos, aunque puede necesitarse de sistemas auxiliares de energía convencional

dependiendo de factores tales como disponibilidad oportuna de energía solar, costo de operación del sistema, eficiencia de funcionamiento, etc.

a) Sistemas pasivos

El diseño de estos sistemas involucra la adecuación de las edificaciones a su entorno físico, aprovechando al máximo los recursos del medio ambiente. Su finalidad es la de alcanzar niveles ambientales (de calefacción y enfriamiento) satisfactorios de bienestar fisiológico, prescindiendo de sistemas artificiales de climatización.

Estos sistemas hacen uso de los elementos arquitectónicos de la construcción, por lo que su instalación resulta económica en relación con la energía convencional que desplaza. Estos sistemas también se pueden utilizar para el tratamiento de agua y la producción de hielo en pequeña escala.

b) Sistemas de colectores fijos

Estos sistemas, denominados también fototérmicos, transforman la radiación solar en calor que puede ser utilizado directamente o convertido en energía mecánica y eléctrica. Constan de los siguientes elementos: cubierta transparente, placa absorbente, fluido de trabajo (aire o agua que se calienta al pasar por el colector) y aislante. Existen varios diseños y materiales dentro de los colectores planos convencionales, en donde el fluido de trabajo alcanza una temperatura de salida entre 50 y 70 °C, con eficiencias de 40 a 60 %. La aplicación de recubrimientos selectivos a la placa absorbente produce que la

temperatura de salida del fluido sea aún mayor.

Otro tipo de colectores son los llamados tubos evacuados que, al mantener alto vacío entre la cubierta y el absorbedor, reducen las pérdidas por convección y permiten que la temperatura final del fluido sea alrededor de 150 °C. Existen colectores planos que cuentan con sistemas de concentración de luz mediante espejos que reflejan la radiación en un área del absorbedor.

Entre las aplicaciones de los sistemas fijos se tiene el acondicionamiento del ambiente, el secado de productos agropecuarios y marinos, refrigeración, producción de hielo, generación de calor para uso doméstico e industrial, preparación de alimentos y tratamiento de aguas. Sus tiempos de vida son entre 5 y 10 años.

c) Sistemas de colectores móviles

Para que el fluido de trabajo alcance temperaturas superiores a los 200 °C es imprescindible la concentración de los rayos solares sobre el absorbedor. Para esto, se han diseñado colectores móviles (ya sea del concentrador o del absorbedor) que captan mayor cantidad de energía al seguir el movimiento del sol.

Estos sistemas se utilizan en bombeo y tratamiento de agua, en la preparación de alimentos y, en general, en la generación de energía mecánica, calor y electricidad.

d) Sistemas fotovoltaicos

El elemento unitario es la celda solar o fotocelda, la cual

es un dispositivo semiconductor que, por medio del efecto fotovoltaico, convierte directamente la energía solar en electricidad. Las celdas se unen en módulos llamados paneles, los cuales a la vez forman el generador fotovoltaico.

Desde hace varios años los sistemas fotovoltaicos son más viables económicamente para generar electricidad en zonas remotas. En la actualidad han desplazado a los generadores diesel en zonas rurales, tanto en usos domésticos como de bombeo de agua.

e) Estanques solares

Este sistema es un colector y almacenador de energía solar en forma de estanque, con una profundidad máxima de 2.5 metros y en la que el agua presenta un alto gradiente de salinidad. Por la supresión de los procesos convectivos, puede existir una diferencia de temperaturas entre la superficie y el fondo de 50 a 70 °C.

Los estanque solares pueden ser utilizados para procesos industriales de concentración de sales y para la generación de calor y electricidad (22).

1.3.2.2 SECADO SOLAR

La energía del sol ha sido usada desde la antigüedad para secar alimentos y otros productos tales como la madera; sin embargo, en la actualidad se pretende avanzar en el diseño de equipos que permitan realizar este proceso de manera más eficaz y rápida, y donde se obtengan productos de mejor calidad que los

conseguidos con la simple exposición directa al sol en la intemperie. Esto se basa en el hecho de que con los equipos de secado se puede conseguir mayor aprovechamiento de la energía recibida del sol, se puede evitar la contaminación de los productos alimenticios a causa del polvo, insectos, aves, roedores y otros animales; las velocidades de secado son mayores, y en algunos casos los componentes sensibles de los productos sufren menos deterioro que los secados al sol directamente (8, 14, 15). A partir de esto, se han diseñados equipos que permiten realizar el secado de granos, frutas, pescado, etc.

1.3.2.3 CONCEPTOS BASICOS SOBRE ENERGÍA SOLAR

El aprovechamiento de la radiación solar requiere del desarrollo de una tecnología orientada a la utilización eficaz y económica de la energía que llega. Para efectuar ésto, es necesario conocer, en forma general, la naturaleza de la energía solar, así como las características de esta energía al incidir sobre la superficie terrestre.

La estructura del sol es muy compleja, sin embargo, para fines de ingeniería es suficiente considerar que el sol se comporta como un cuerpo negro radiante a una temperatura efectiva de 5 762 °K (21).

Fuera de la atmósfera terrestre se puede fijar una intensidad de radiación que se conoce como CONSTANTE SOLAR (I_{cs}) y corresponde a la energía del sol recibida por unidad de tiempo y por unidad de superficie perpendicular a la radiación, en el

espacio y a la distancia promedio de la tierra al sol. Se han hecho numerosas mediciones directas e indirectas y uno de los valores medios más aceptados para la constante solar es el propuesto por Thekaekara y Drummond, que es de $1\ 353\ \text{W/m}^2$ (12). Dado que la distancia del sol a la tierra no es constante (mínima en el perihelio que se alcanza alrededor del 15 de enero, máxima en el afelio que se tiene a fines de junio), la energía solar que recibe nuestro planeta fuera de su atmósfera tampoco es constante, por lo que el valor de la constante solar varía más o menos 3.5 % con respecto al valor medio (21).

Algunas de las definiciones formales de los conceptos más importantes que se manejan en el campo de la energía solar son los siguientes:

RADIACION. Es la energía electromagnética emitida, transferida o recibida.

RADIACION SOLAR. Término genérico para la energía del sol.

INSOLACION. Ha sido usado como término general para describir la cantidad de energía recibida en una localidad por unidad de área en un periodo de tiempo; es un término aplicado específicamente a la radiación solar.

IRRADIANCIA. Energía solar incidente en una superficie por unidad de área por unidad de tiempo.

IRRADIACION. Energía solar incidente en una superficie por

unidad de área, encontrada al multiplicar irradiancia por un periodo de tiempo (12). Es decir, es la energía recibida durante un intervalo de tiempo en una unidad de área.

RADIACION SOLAR DIRECTA. Es aquella que se recibe del ángulo sólido del disco solar, que no ha sido dispersa por la atmósfera y por lo tanto no ha experimentado cambios en su dirección (21, 25).

RADIACION SOLAR DIFUSA. Es aquella cuya dirección original ha sido cambiada por la dispersión que producen los distintos componentes de la atmósfera por lo cual no tiene una dirección única o preferente.

RADIACION SOLAR TOTAL O GLOBAL. Está constituida por la suma de la radiación directa proveniente del disco solar y la radiación difusa que proviene de la bóveda celeste, de la tierra y de los objetos (12, 21, 25).

El conocimiento de la trayectoria del sol en su movimiento aparente en el cielo es necesario para realizar cálculos de la ganancia de energía solar y para determinar la ubicación y orientación adecuada de dispositivos solares. Para la mayoría de las aplicaciones en energía solar se necesitan predicciones razonablemente exactas de la posición del sol en el cielo a cualquier hora del día y del año. Las relaciones geométricas entre un plano con cualquier orientación relativa a la tierra y el sol, se pueden describir en función de varios ángulos:

DECLINACION (δ). Es la posición angular del sol al mediodía

solar con respecto al plano del ecuador. Es un índice del alejamiento que experimenta el sol hacia el norte o hacia el sur del ecuador y varía de $+23.45^{\circ}$ en el 21 de Junio, a 0° en los equinoccios (Marzo 21 y Septiembre 22) y a -23.45° en el 22 de diciembre. Por convención las declinaciones al norte del ecuador son positivas y negativas al sur. Este parámetro depende del día del año y puede calcularse con la expresión:

$$\delta = 23.45 \text{ sen } \left(60 \times \frac{284 + n}{365} \right) \dots\dots\dots (2)$$

en donde:

n = día del año.

El cambio máximo de la declinación en 24 horas (en los equinoccios) es menor de 0.5° ; de ahí que pueda usarse un sólo valor para cada día. Estos valores también pueden obtenerse de gráficas y tablas (12, 21). En la figura 1 se ilustra este ángulo:

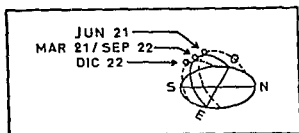


FIGURA 1. Esquema del movimiento aparente del sol para ilustrar la declinación (δ).

FUENTE: MANRIDUE, J. A. 1984. Energía solar. Fundamentos y aplicaciones fototérmicas. México. Ed. Harla. (21).

LATITUD (ϕ). Es el ángulo que determina el lugar de interés sobre la tierra con respecto al plano del ecuador. Por convención este ángulo es positivo cuando se mide hacia el norte del ecuador y negativo cuando se mide al sur. En la Ciudad de México la

latitud es de 19.43° (21).

ANGULO HORARIO (w). Es el desplazamiento angular del sol hacia el este u oeste del meridiano local debido a la rotación de la tierra sobre su eje. Es igual a cero al mediodía solar y adquiere un valor de 15 grados por hora (360° por día), siendo positivo en las mañanas y negativo por las tardes.

ALTURA SOLAR ANGULAR (α). Es la altura angular del horizonte celeste del observador y de ahí que sea un ángulo entre 0° y 90° ; es el complemento del ángulo zenital (θ_z).

ANGULO ZENITAL (θ_z). Es el que forman la dirección de la radiación directa y la vertical del lugar.

ANGULO DE INCIDENCIA (θ). Es el ángulo entre la dirección de los rayos solares sobre una superficie y la normal a dicha superficie. Es decir es el ángulo entre la normal a la superficie y el haz de radiación. Este ángulo se puede ver esquematizado en la figura 2.

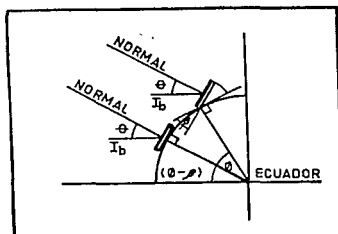


FIGURA 2. Ángulo de incidencia (θ) en dos latitudes (ϕ).
FUENTE: MANRIQUE, J. A. 1984. Energía solar. Fundamentos y aplicaciones fototérmicas. México. Ed. Harla. (21).

ANGULO AZIMUTAL (γ). Es el ángulo medido horizontalmente entre la proyección de la normal de la superficie y el meridiano local; tiene valores entre $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$ siendo negativo al este y positivo al oeste.

INCLINACION (β). Es el ángulo que forma la superficie con respecto al plano horizontal.

Otros conceptos importantes que hay que tomar en cuenta son:

LONGITUD DEL DIA (T_d). Es el número máximo de horas de asoleamiento diario, y se puede calcular con la ecuación:

$$T_d = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan\phi \tan\delta) \text{ [=] horas.....(3)}$$

en donde:

ϕ = latitud del lugar [=] grados.

δ = declinación [=] grados.

TIEMPO SOLAR (HORA SOLAR). El tiempo solar difiere del tiempo oficial (local aparente), ambos están relacionados entre si por la expresión:

$$\text{Tiempo solar} = \underset{\text{(hrs)}}{\text{tiempo oficial}} + [E + \underset{\text{(min)}}{\{l_{ref} - l_{loc}\}}] \dots (4)$$

en donde:

E es la ecuación del tiempo mostrada en la figura 3 [=] minutos.

l_{ref} = longitud del meridiano de referencia horaria oficial

para la zona en cuestión (90° Oeste para la Ciudad de México).

λ_{loc} = longitud del meridiano del lugar, en grados oeste (99° en la Ciudad de México) (21).

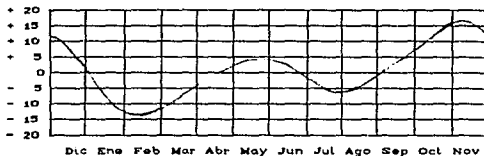


FIGURA 3. Ecuación del tiempo.

FUENTE: MANRIQUE, J. A. 1984. Energía solar. Fundamentos y aplicaciones fototérmicas. México. Ed. Harla. (21).

1.3.2.4 RADIACION SOLAR SOBRE LA SUPERFICIE DE LA TIERRA

No toda la radiación solar extraterrestre que intercepta la tierra llega a su superficie, aún en condiciones de cielo despejado. Sólo la radiación solar extraterrestre comprendida entre $0.25 \mu\text{m}$ y $2.3 \mu\text{m}$ es transmitida con atenuaciones a la superficie de la tierra. Esta atenuación se debe a los fenómenos de absorción por O_3 (absorbe casi totalmente las radiaciones ultravioletas), H_2O y CO_2 (absorben en las bandas infrarrojas) así como a la dispersión que ocasionan otros componentes en la atmósfera como moléculas de aire, polvo, vapor de agua, etc. (8, 21).

La intensidad de la radiación solar que llega a la

superficie terrestre depende, entre otros factores, de las propiedades del sol, de parámetros astronómicos, así como del estado y características locales de la atmósfera terrestre. Los factores que intervienen pueden ser clasificados de la siguiente manera:

ASTRONOMICOS

- 1) Espectro solar.
- 2) Magnitud de la constante solar.
- 3) Variación de la distancia entre la tierra y el sol.
- 4) Declinación solar.
- 5) Variación con el ángulo horario.

GEOGRAFICOS

- 6) Latitud.
- 7) Longitud.
- 8) Altitud.
- 9) Características geográficas de la localidad (costas, montañas, ciudades, desiertos, etc.).

GEOMETRICOS

- 10) Altura solar.
- 11) Azimuth del sol.
- 12) Inclinação del plano receptor.
- 13) Rumbo del plano receptor.

FISICOS

- 14) Contenido de agua en la atmósfera.
- 15) Turbidez de la atmósfera.

16) Contenido de gases permanentes.

17) Efecto del albedo (reflejo) del suelo.

Se puede considerar que los factores astronómicos, así como las propiedades del sol son suficientemente conocidas, mientras que la estructura de la atmósfera de la tierra es compleja y su comportamiento es más difícil de predecir (12).

Para predecir o evaluar el funcionamiento de cualquier sistema de conversión fototérmica es necesario conocer la magnitud de la radiación solar directa y difusa que llega a un lugar dado sobre la superficie de la tierra.

Varios investigadores han desarrollado metodologías para estimar la intensidad de la radiación solar que llega a la superficie terrestre: en general parten del flujo de radiación extraterrestre (constante solar) y le restan la radiación que ha sido atenuada por la absorción y dispersión atmosférica. Sin embargo, la atenuación ha sido considerada en forma diferente por los autores: las diferencias surgen principalmente de las suposiciones referentes al orden y manera en la cual los procesos ocurren, y del tratamiento que se le da a la radiación difusa (12, 21).

Debido a lo anterior, algunos autores incluso indican que no resulta práctico basarse en las predicciones sobre disponibilidad de energía solar de acuerdo a la atenuación que tiene la radiación extraterrestre debido a fenómenos meteorológicos, y que es más conveniente utilizar las medidas de radiación de la localidad o de

las cercanías para los procesos solares (12, 32).

Existen varios instrumentos que se emplean para medir experimentalmente la radiación solar; todos estos la convierten a otra forma de energía, dando como resultado una medida o lectura proporcional a la intensidad de la radiación. Los principales instrumentos empleados son: el piranómetro y el piroheliómetro.

El piranómetro es el instrumento más común y se emplea para registrar la radiación total dentro de un campo de vista hemisférico. El aparato usualmente se coloca sobre una superficie horizontal y registra, en consecuencia, la radiación global en un sitio dado. Este instrumento puede modificarse para que indique únicamente radiación difusa, empleando una banda metálica que obstruya la radiación directa del sensor; en la figura 4 se muestra uno de estos instrumentos.



FIGURA 4. Piranómetro termodiferencial con sombreador. Insolar and Metrix, S. A., conectado a un multímetro digital Precision.

2 DISEÑO EXPERIMENTAL

Se realizó el diseño experimental planteando los siguientes objetivos:

2.1 OBJETIVOS PARTICULARES

1.- Determinar el funcionamiento del colector de un secador solar de frutas y hortalizas, previamente construido, bajo diferentes condiciones de operación y de diseño para poder establecer las mejores condiciones de trabajo.

2.- Estudiar la influencia de las condiciones de diseño y operación del secador solar en el proceso de deshidratación de zanahoria (*Daucus carota*).

3.- Contribuir a la determinación de la viabilidad del uso de equipos de este tipo en el secado de alimentos y dar sugerencias que contribuyan a su desarrollo.

Para cubrir experimentalmente los objetivos planteados se formularon los siguientes objetivos específicos:

1.- Determinar el comportamiento de la eficiencia térmica del colector y del proceso de secado de zanahoria bajo dos condiciones diferentes de diseño de las aletas captadoras: con características especulares y con superficie negra.

2.- Determinar la influencia del ángulo de inclinación del

colector en la movilidad del aire en condiciones de convección natural.

3.- Determinar el efecto de la velocidad de circulación del aire sobre la eficiencia del colector y sobre el proceso de secado de zanahoria.

Con base en estos objetivos específicos se plantearon las siguientes hipótesis:

2.2 HIPOTESIS

1.- Para el diseño del secador en estudio se consideró que si las superficies de las aletas del colector se encontraban con características especulares entonces se tendrían mayores eficiencias de captación de energía en el colector que cuando estuvieran pintadas con un color absorbente; debido a la mayor reflexión que presentan por el diseño (5). Y por lo tanto velocidades de secado mayores con superficies de las aletas con características especulares bajo velocidades de aire iguales.

2.- Se consideró que entre mayor fuera el ángulo de inclinación del colector (β) entonces se obtendría mayor circulación de aire a través del equipo en convección natural, lo cual favorecería a la eficiencia del colector y al proceso de secado. El fenómeno de ascenso de masas de aire de menor densidad (ocasionado por la diferencia de temperaturas existente), se realiza en forma más cercana a la vertical.

3.- Se consideró que al tener mayores velocidades de flujo de aire en convección forzada entonces se tendrían mayores eficiencias del colector y procesos de secado más rápidos. Entre mayor es la velocidad de aire se tiene menor diferencia de temperaturas entre el aire que circula por el colector y el aire del ambiente por lo que la pérdida de calor es menor. Así mismo, entre mayor es la velocidad del aire, es mayor el coeficiente de transferencia de calor en el colector, así como los coeficientes de transferencia de masa y calor en el secador, lo cual favorece a la velocidad de secado.

2.3 MATERIALES Y EQUIPOS

Para el desarrollo experimental se requirió básicamente del siguiente material y equipo:

EQUIPO

- Secador solar completamente adaptado construido en la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas en el Departamento de Graduados e Investigación en Alimentos del IPN (33).
- Rebanadora Horbat Industrial, modelo LTDA.
- Refrigerador Ojeda.

INSTRUMENTOS Y MATERIALES

- Termoanemómetro de veletas digital Airflow Developments LTD, modelo DVA 6000t con rango de cero a 99.99 m/s y resolución de 0.01 m/s.
- Psicrómetro Taylor con termómetros de mercurio para medir temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo, con resolución de

0.5 °C.

- Cuatro termómetros de mercurio Taylor con escala de 0 - 100 °C.

- Cuatro termómetros metálicos Metron con escala de 0 - 100 °C.

- Piranómetro termodiferencial con sombreador Insolar and Metrix, S. A.; este equipo va conectado a un multímetro digital Precision, con resolución de 0.1 milivolts (ver figura 4).

- Reloj Casio con resolución en segundos.

- Balanza electrónica digital Sartorius con capacidad de 8 kg y con resolución de 0.1 gramo.

- Termobalanza Ohaus Brain Weigh con resolución de 0.1 %.

- Materia prima. Zanahorias variedad nantes con grado de calidad México Extra y de tamaño correspondiente a la letra C de la clasificación por tamaños de la Norma Oficial (de 11.0 a 12.4 cm, ver cuadro I, página 15). Fue adquirida en el mercado de Tacuba, México, D. F.

2.4 DESCRIPCION DEL EQUIPO

El equipo en donde se realizó la experimentación es un secador solar para frutas y hortalizas tipo cabina el cual está compuesto de tres elementos principales: la cabina o cámara deshidratadora, el colector de energía y el ventilador; en la figura 5 se muestra un esquema del equipo.

La cabina deshidratadora consiste en una cavidad con doble cubierta (de vidrio la interior, de madera la exterior y con unical en la separación), en donde es posible colocar 5 charolas

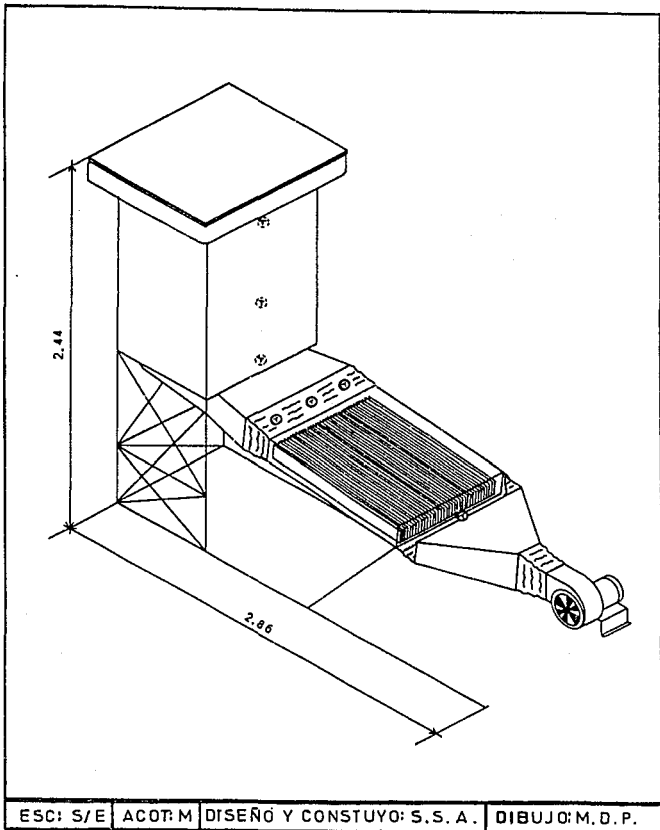


FIGURA 5. Esquema del secador empleado en la experimentación.

de rejillas de 0.6 x 0.6 m, una sobre otra separadas entre si 0.2 m.

El colector consta de una placa de aluminio de 0.002 m (2 mm) de espesor, 0.71 m de ancho y 1.0 m de largo sobre la cual están colocadas en forma perpendicular 60 aletas del mismo material, de 0.1 m (10 cm) de altura, de 1 m de largo y separadas entre si 0.01 m (1 cm). Este conjunto metálico está colocado dentro de un soporte con marco de fierro, con cubiertas de plástico acrílico de 0.005 m (5 mm) de espesor en la parte superior y en las laterales, y con una placa de madera en la parte inferior.

El colector va unido a la cabina deshidratadora y está colocado sobre una estructura que permite variar su inclinación. El diseño de este colector está basado en el propuesto por Bevill y Brandt (2).

El ventilador es de tipo centrífugo y cuenta con un motor de 1 HP. Se le instaló un regulador de flujo en la succión y un distribuidor de aire en la descarga. Para las pruebas en convección forzada, el ventilador se conecta al colector por medio de una ampliación hecha de madera con conexiones de lona y tela ahulada (33).

2.5 MANTENIMIENTO, MODIFICACIONES Y CREACION DE PARTES DEL EQUIPO

Esto fue necesario ya que se trabajó con un secador solar que había estado expuesto a la intemperie, por lo que presentaba varias partes dañadas que debían sustituirse; también carecía de regulador y distribuidor de flujo de aire, por lo cual se realizaron las siguientes actividades:

- Sustitución de partes rotas y/o deterioradas del equipo, tales como el techo de la cabina de secado con triplay de 0.0127 m (1/2 in), las cubiertas del colector con plástico acrílico de 0.005 m (5 mm) de espesor, la ampliación que conecta el ventilador con el colector con triplay de 0.0127 m (1/2 in), conexiones entre las partes del equipo (de lona y tela ahulada) y empaques del colector con hule semiporoso de 0.0254 m (1 in) de ancho por 0.005 m (5 mm) de espesor.

- Recubrimiento externo del equipo con pintura anticorrosiva.

- Cambio del motor del ventilador, de 1/2 HP por uno de 1 HP, para conseguir un rango de flujo más amplio.

- Colocación de un distribuidor de aire en la entrada del colector y de un regulador de flujo en la succión del ventilador (de lamina galvanizada no. 18).

2.6 PROCEDIMIENTO

El procedimiento fue el siguiente:

1) Se calibraron los termómetros metálicos para asegurar lecturas confiables, esto se hizo ajustando su lectura con la que indicaban los termómetros de mercurio sometidos a las mismas condiciones.

2) Se decidió la geometría y dimensiones del producto a secar en base a los siguientes criterios principalmente: que la forma sea fácil de realizar y que el tamaño permitiera secar el producto aproximadamente en el lapso de una corrida experimental.

3) Pruebas experimentales en el secador donde se procedió de la siguiente forma:

a) Realización de pruebas sin materia prima con la superficie de las aletas del colector con características especulares bajo las condiciones mostradas en el cuadro VI: en convección natural se tomaron los dos ángulos de inclinación extremos a los que podía colocarse el colector y el valor intermedio; en convección forzada se trabajó con ángulos de inclinación con los cuales se obtuviera un valor de ángulo de incidencia (θ) máximo de 11 grados al medio día solar para conseguir mayor radiación en el colector. En el cuadro VII se presenta el ángulo de inclinación utilizado en cada prueba y la fecha en que se realizó.

CUADRO VI. Arreglo experimental en el secador.

ALETAS ESPECULARES Y ALETAS PINTADAS	CONVECCION NATURAL	INCLINACION DEL COLECTOR (°)	
		7.0 *	
		24.0	
	41.0		
	CONVECCION FORZADA	VELOCIDAD DE AIRE (m/s)	
		En la cámara de secado	En el colector
		0.25 *	0.69
		0.50	1.38
		0.75 *	2.07
		1.00	2.76
1.25 *		3.45	

* EXPERIMENTOS REALIZADOS CON MUESTRA Y SIN MUESTRA.

CUADRO VII. Angulo de inclinación del colector (β) [=] grados y fecha* de cada prueba experimental.

CONVECCION FORZADA VELOCIDAD DE AIRE EN LA CAMARA [=] m/s	ALETAS ESPECULARES				ALETAS PINTADAS			
	SIN MUESTRA		CON MUESTRA		SIN MUESTRA		CON MUESTRA	
	β	FECHA	β	FECHA	β	FECHA	β	FECHA
0.25	7	MAY-18	19.5	OCT-02	19.5	NOV-15	19.5	NOV-05
0.50	7	JUN-08	-	-	19.5	NOV-20	-	-
0.75	7	MAY-29	19.5	OCT-08	19.5	NOV-14	19.5	NOV-06
1.00	7	MAY-24	-	-	19.5	NOV-19	-	-
1.25	7	MAY-25	19.5	OCT-09	19.5	NOV-12	19.5	NOV-21
CONVECCION NATURAL	7	MAY-16	7	JUN-01	7	OCT-22	7	NOV-01
	24	MAR-23	-	-	24	OCT-15	-	-
	41	MAR-21	-	-	41	OCT-17	41	OCT-31

* MES Y DIA DEL AÑO 1990.

Se registraron cada 30 minutos, durante ocho horas, en días con cielo despejado, a partir de 9 de la mañana, para cada

prueba sin materia prima, los datos de: temperatura de aire en la entrada y salida del colector en tres puntos, temperatura del aire en la cabina de secado en tres posiciones diferentes, temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo, velocidad de aire a la salida de la cámara deshidratadora, voltaje del multímetro conectado al piranómetro y hora del día.

La velocidad de aire, en el caso de convección forzada, se midió en 9 puntos de la parte superior de la cabina, como se muestra en la figura 6; y para determinar si el flujo era homogéneo, se calculó estadísticamente el coeficiente de variación, éste fue en todos los casos menor que 10%, lo cual indicó que la velocidad del aire a través de las charolas de secado era semejante en todos sus puntos. Por otra parte las velocidades de aire correspondientes a la sección transversal del colector se presentan en el cuadro VI. Las velocidades de aire empleadas en las pruebas se determinaron tomando como base el rango de velocidades permitido por el ventilador usado; el rango se dividió en cinco puntos para observar mejor la tendencia del comportamiento.

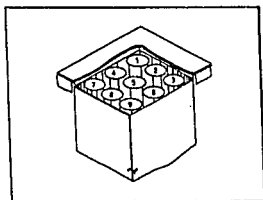


FIGURA 6. Esquema de la distribución para medir la velocidad del aire en la cabina deshidratadora

b) Para las pruebas con materia prima se realizó un pretratamiento a las zanahorias, el cual se muestra en la figura 7:

FIGURA 7. Pretratamiento de la zanahoria para el secado (13).



- Lavado a fondo con cepillo y chorro de agua.
- Pelado manual con mondador doméstico de 0.16 m (16 cm) de largo con mango de plástico.
- Lavado con agua con objeto de eliminar los residuos de piel.
- Saneado, eliminando las zonas de color verde cerca del cuello con cuchillo.
- Cortado en rodajas de 0.003 m (3 mm) de espesor.
- Blanqueo mediante inmersión en agua hirviendo durante 10 minutos para la desnaturalización de la enzima peroxidasa y ablandamiento de los tejidos (13).
- Carga en la charola de secado colocando 2 Kg de materia prima, lo cual corresponde a una densidad de carga de aproximadamente 7.3 Kg/m².

- Secado bajo las condiciones de proceso determinadas en el cuadro VI correspondientes para cada prueba.

c) Realización de pruebas de secado en el equipo en convección natural y en convección forzada a tres velocidades de aire (0.25, 0.75 y 1.25 m/s); con materia prima; estas velocidades se eligieron porque correspondían a los dos valores extremos de velocidad de aire y al valor medio del rango de velocidades empleado. En estas pruebas se registró el peso de la charola con producto durante el proceso de secado, además de los datos señalados en el inciso (a) (cada 15 minutos en las primeras 2 horas y después cada media hora). Paralelamente a estas pruebas se registró el proceso de secado de lotes control: uno a sol directo y otro a la sombra, con la misma densidad de carga que el producto que se encontraba secando en el equipo (aproximadamente de 7.3 Kg/m²).

d) Se recubrieron las aletas y base del colector con pintura de color absorbente negro mate y se repitieron los experimentos descritos en los incisos a, b y c.

Las variables referentes al producto se mantuvieron constantes: variedad, grado de calidad, geometría y dimensiones de los trozos a secar, densidad de carga en las charolas y pretratamiento. No se realizaron repeticiones porque las condiciones ambientales son diferentes e impredecibles en cada prueba. Las pruebas efectuadas sin muestra se realizaron principalmente para obtener la mayor información posible del efecto de las variables manejadas en la eficiencia térmica del colector;

las pruebas con muestra se efectuaron para conocer el efecto de las variables manejadas en el proceso de secado y para reforzar la información obtenida de las pruebas sin muestra respecto a la eficiencia del colector bajo las diferentes condiciones. El realizar pruebas con muestra y sin muestra permitió también conocer el cambio en la movilidad del aire a través del equipo que se presenta en convección natural cuando hay material secándose.

3 ANALISIS DE RESULTADOS

3.1 TRATAMIENTO DE DATOS

3.1.1 EFECTO DE LA VELOCIDAD DEL AIRE EN LA EFICIENCIA DEL COLECTOR

Para determinar el efecto de la velocidad del aire en la eficiencia térmica del colector en las pruebas de convección forzada se emplearon los datos de: día del año, inclinación del colector, hora del día, voltaje del multímetro conectado al piranómetro, temperatura del aire a la entrada del colector, temperatura del aire a la salida del colector, temperatura del bulbo húmedo, temperatura de bulbo seco, velocidad de aire a la salida de la cámara deshidratadora, además de los referentes a las dimensiones propias del equipo.

A partir de estos datos se realizó la siguiente secuencia de cálculo (5):

Para determinar la eficiencia del colector se empleó la ecuación:

$$\eta = \frac{G C_p \Delta T}{A_c I_T} \times 100 \dots\dots\dots(5)$$

en donde:

η = eficiencia del colector [=] %.

G = flujo másico de aire [=] Kg de aire húmedo/s.

Cp = Capacidad calorífica del aire [=] KJ/kg de aire húmedo
°C.

ΔT = Aumento de temperatura del aire en el colector [=] °C.

A_c = Área de captación del colector [=] m².

I_r = Radiación total real [=] W/m².

Para calcular el flujo másico de aire (G), se empleó la ecuación:

$$G = \frac{v \cdot a}{V_H} (1 + Y) \dots\dots\dots (6)$$

en donde:

v = velocidad del aire húmedo [=] m/s.

a = Área transversal (con respecto a la lectura de la velocidad del aire) [=] m² (a = 0.2756 m²).

V_H = volumen específico del aire húmedo [=] m³/Kg de aire seco.

Y = Humedad absoluta del aire [=] en Kg de agua/Kg de aire seco.

El volumen específico del aire húmedo (V_H) se determinó a partir de la ecuación:

$$V_H = \frac{(0.00283 + 0.00456 Y)(T_o + 273)}{0.76974} \dots\dots\dots (7)$$

en donde:

T_o = Temperatura del aire [=] °C.

La humedad absoluta del aire (Y) se obtuvo empleando los

datos de temperatura de bulbo húmedo y temperatura de bulbo seco en una carta psicrométrica construida para la presión de la Ciudad de México (585 mm de Hg).

La capacidad calorífica del aire (C_p), se obtuvo a partir de la ecuación del C_p para una mezcla aire-agua:

$$C_{pmezcla} = C_{paire}(X_{aire}) + C_{pagua}(X_{agua}) \dots\dots\dots (8)$$

en donde:

X_{aire} = fracción de aire seco en la mezcla [=] Kg de aire seco/Kg de aire húmedo.

X_{agua} = fracción de agua en la mezcla [=] Kg de agua/Kg de aire húmedo.

Considerando los valores de C_p del aire seco y del agua en unidades de KJ/Kg°C se tiene que (35):

$$C_p = 1005(X_{aire}) + 1884(X_{agua}) \dots\dots\dots (9)$$

y refiriendo las fracciones de aire y agua de la mezcla a un kilogramo de aire húmedo se obtiene:

$$C_p = \frac{1005 + 1884 Y}{1 + Y} \dots\dots\dots (10)$$

El aumento de temperatura del aire que se presenta al pasar a través del colector (ΔT) también es conocido como salto térmico (33) y se emplea para referir la diferencia de temperaturas aire

entre la entrada y la salida del colector ; se calculó con la ecuación:

$$\Delta T = \bar{T}_s - T_e \dots\dots\dots(11)$$

en donde:

\bar{T}_s = Temperatura promedio del aire a la salida [=] °C.

T_e = Temperatura de aire a la entrada [=] °C.

La temperatura de aire promedio a la salida del colector (\bar{T}_s) se obtuvo calculando la media aritmética de las tres lecturas registradas correspondientes a tres puntos de esta zona (lado derecho, centro y lado izquierdo de la salida).

El área de captación del colector (A_c), se determinó en base a las dimensiones de la placa y aletas colectoras descritas anteriormente ($A = 0.8343 \text{ m}^2$) (pág. 40).

La radiación total real (I_r), se obtuvo mediante el siguiente procedimiento:

Las lecturas en milivolts del multímetro conectado al piranómetro, pueden ser transformadas a radiación total y difusa utilizando la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{Lectura del milivoltmetro}}{\text{Constante del piranómetro}} = \text{Radiación en } \frac{\text{Langley}}{\text{min}} \dots\dots\dots(12)$$

estos valores a su vez, se pueden expresar en unidades de W/m^2 empleando el factor de conversión:

$$1 \text{ Langley/min} = 698 \text{ W/m}^2 \dots\dots\dots(13)$$

por lo que los datos se transformaron directamente usando la constante de calibración del instrumento (20.00 mV min/Ly) y el factor de conversión conjuntamente, quedando la radiación:

$$\text{Lectura del milivoltímetro} \times 34.9 = \text{Radiación en W/m}^2 \dots\dots(14)$$

Estos datos fueron utilizados para calcular las relaciones de orientación que sirvieron para obtener los valores reales de radiación total, directa y difusa incidentes en el colector. Las relaciones de orientación son las siguientes:

$$I_r = \text{Radiación total real} = I_t \times R \dots\dots\dots(15)$$

$$I_b = \text{Radiación directa real} = I_b \times R_b \dots\dots\dots(16)$$

$$I_p = \text{Radiación difusa real} = I_r - I_b \dots\dots\dots(17)$$

en donde:

I_t = Radiación total [=] W/m^2

I_b = " directa [=] W/m^2

R = Relación de orientación para radiación total, adimensional.

R_b = Relación de orientación para radiación directa, adimensional.

Para el cálculo de las relaciones de orientación se emplearon las siguientes ecuaciones:

$$R = R_b \frac{I_b}{I_t} + R_s \frac{I_d}{I_t} + \rho R_g \dots\dots\dots (18)$$

en donde:

R_s = Relación de orientación para radiación difusa del cielo, adimensional.

R_g = Relación de orientación para radiación difusa de la tierra, adimensional.

I_d = Radiación difusa [=] W/m^2

ρ = Reflectividad de la tierra (el valor reportado en la bibliografía es $\rho = 0.2$) (2).

La relación de orientación para la radiación directa se evaluó mediante la ecuación:

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos w + \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \cos w + \sin \delta} \dots (19)$$

La definición de estos ángulos y la forma de calcularlos ya fue descrita anteriormente (pág. 27-30).

La relación de orientación para la radiación difusa se calculó con las siguientes ecuaciones (21):

Para el cielo:

$$R_s = (1 + \cos \beta) / 2 \dots\dots\dots (20)$$

y para la tierra:

$$R_g = (1 - \cos \beta)/2 = 1 - R_a \dots\dots\dots (21)$$

3.1.2 EFECTO DE LA INCLINACION DEL COLECTOR EN LA MOVILIDAD DEL AIRE EN CONVECCION NATURAL

Para determinar este efecto se emplearon los datos de temperatura del aire dentro de la cabina de secado además de los necesarios para calcular la radiación total real y el aumento de temperatura del aire en el colector.

En el caso de convección natural, no es posible realizar el cálculo de la eficiencia del colector empleando la ecuación utilizada para convección forzada debido a que la velocidad de aire no es constante; pues ésta se ve muy afectada por las corrientes de aire que circundan el equipo. Por lo tanto, para determinar el efecto de la inclinación del colector en la movilidad de aire a través del equipo, se recurrió al análisis de los incrementos de temperatura del aire en el colector y a la diferencia de temperatura del aire existente entre la salida del colector y la parte superior de la cabina de secado (34).

Para poder realizar la comparación de los incrementos de temperatura del aire en el colector a las distintas inclinaciones empleadas se utilizó la relación $\Delta T/I_r$ en donde el incremento de temperatura del colector es dividido entre la radiación total real.

3.1.3 EFECTO DE LAS CARACTERISTICAS DE LA SUPERFICIE DEL CAPTADOR DE ENERGIA EN LA EFICIENCIA DEL COLECTOR

Para determinar el efecto en la captación de energía de las dos características de la superficie del colector trabajadas, se realizó la comparación de eficiencias para convección forzada y de $\Delta T/lr$ para convección natural.

3.1.4 EFECTO DE LAS VARIABLES MANEJADAS EN EL PROCESO DE SECADO DE ZANAHORIA

Para determinar el efecto de las diferentes condiciones manejadas de diseño y operación del equipo en el proceso de secado de zanahoria, se procedió a realizar la comparación de ciertos parámetros de secado tales como la velocidad de secado en el periodo constante (N_c), la pérdida de humedad adimensional (X/X_0) y el coeficiente de transferencia de masa (K_y).

Para obtener estos valores se efectuó el tratamiento de datos siguiente:

1.- Se calculó el peso del producto (P_p) durante el transcurso de los procesos de secado a partir de los datos de peso de la charolas con producto (P_{ch+p}) y el peso de las charolas vacías (P_{ch}) por medio de la ecuación:

$$P_p = P_{ch+p} - P_{ch} \dots\dots\dots (22)$$

2.- Se calculó la cantidad de sólido seco (S_s) para cada lote tomando en cuenta el valor de la humedad inicial del producto en base húmeda (H_{bh}) el cual fue determinado por termobalanza para cada corrida; para esto se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$S_s = P_{pi} \times F_{si} \dots\dots\dots (23)$$

en donde:

P_{pi} = Peso del producto al inicio del proceso [=] Kg de producto.

F_{si} = Fracción de sólidos al inicio del proceso [=] Kg de sólido/Kg de producto.

Para calcular F_{si} se empleó la relación:

$$F_{si} = \frac{100 - X_{bh}}{100} \dots\dots\dots (24)$$

en donde:

X_{bh} = Humedad inicial del producto en base húmeda, determinada en termobalanza [=] Kg de agua/Kg de sólido húmedo.

3.- Se determinó la cantidad de agua del producto en kilogramos (K_g) durante el transcurso del proceso de secado por medio de la ecuación:

$$K_g = P_p - S_s \dots\dots\dots (25)$$

Con estos datos se obtuvieron los valores de la fracción de agua del producto en base seca durante el proceso (X), por medio de la división:

$$X = \frac{Kga}{S_s} \dots\dots\dots (26)$$

en donde:

S_s = Sólidos secos del producto [=] Kg.

4.- Se calcularon los valores de la relación de humedad adimensional (X/X₀) dividiendo las fracciones de agua del producto en base seca durante el proceso (X) entre la fracción de agua del producto en base seca inicial (X₀). Y se construyeron las gráficas de humedad adimensional (X/X₀) en función del tiempo de secado.

5.- Por otra parte, se calcularon las velocidades medias de secado (N_m) sólo para el periodo de secado a velocidad constante de las pruebas realizadas a la velocidad de aire de 0.75 y 1.25 m/s ya que la duración fue en promedio de 2 horas, considerando en ese tiempo la temperatura constante; se empleó la forma aproximada:

$$N_m = - \frac{S_s \Delta X}{A_s \Delta t} \dots\dots\dots (27)$$

en donde:

A_s = Area de secado = 0.2756 m².

ΔX = Cambio de humedades que ocurre en cada intervalo de tiempo [=] Kg de agua/Kg de sólido seco.

Δt = Intervalo de tiempo [=] horas.

Para las pruebas realizadas en convección natural y a 0.25 m/s en convección forzada no se realizó este cálculo porque no se pudo considerar la temperatura constante en ese periodo por ser muy tardado.

6.- Se construyeron las gráficas de humedad del producto en base seca (X) en función del tiempo para las pruebas realizadas a la velocidad de aire de 0.75 y 1.25 m/s, y por medio de regresión lineal se determinó el valor de la humedad crítica del producto (X_c), la cual se consideró cuando el valor de la correlación en el tramo recto de la gráfica, empezaba a disminuir. El comportamiento de dichas gráficas es muy semejante al que se presenta en las figuras 24 y 26 en donde se encuentra graficada la relación de humedad adimensional contra el tiempo de secado (páginas 73 y 74).

7.- Se obtuvieron los valores de humedad media (X_m) y tiempo medio (t_m) para cada intervalo de tiempo, y se construyeron las gráficas de velocidad de secado en función del tiempo.

8.- Se determinó el valor de velocidad de secado en el periodo constante (N_c) para las pruebas realizadas a la velocidad de aire de 0.75 y 1.25 m/s empleando la pendiente del tramo recto de las gráficas del punto 6 (m); para esto se emplearon las ecuaciones:

como:
$$m = \frac{dX}{dt} \dots\dots\dots (28)$$

$$y \quad N_c = - \frac{S_e \, dX}{A_s \, dt} \dots\dots\dots (29)$$

$$\therefore \quad N_c = - \frac{S_e}{A_s} \, m \dots\dots\dots (30)$$

9.- Se calculó el coeficiente de transferencia de masa (K_y) para el periodo de secado a velocidad constante de las pruebas realizadas a la velocidad de aire de 0.75 y 1.25 m/s a partir de la ecuación:

$$N_c = K_y (Y_s - Y) \dots\dots\dots (31)$$

de donde:

$$K_y = \frac{N_c}{(Y_s - Y)} \dots\dots\dots (32)$$

en donde:

Y_s = Humedad de saturación del aire a la temperatura de secado [=] Kg de agua/Kg de aire seco.

Y = Humedad media del aire de secado [=] Kg de agua/Kg de aire seco.

Tanto los valores de Y_s como de Y se obtuvieron empleando la carta psicrométrica: Y_s a partir de la temperatura de secado y Y utilizando los datos de temperatura de bulbo seco y de bulbo húmedo del aire determinados con el psicrómetro. Con los valores de temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo del aire también se determinó la humedad relativa del aire por medio de la carta psicrométrica; los valores de humedad relativa que se obtuvieron fueron cercanos al 50 %.

3.2 RESULTADOS

3.2.1 EFECTO DE LA VELOCIDAD DEL AIRE EN LA EFICIENCIA DEL COLECTOR

Los valores de eficiencia del colector (η) en cada hora para los experimentos de convección forzada se resumen en los cuadros VIII y IX; los valores promedios se encuentran representados en la gráfica de la figura 8.

CUADRO VIII. Eficiencias del colector (η) en convección forzada y aletas captadoras con características especulares.

HORA	0.25 m/s η (%)	0.50 m/s η (%)	0.75 m/s η (%)	1.00 m/s η (%)	1.25 m/s η (%)
10	18.28	22.80	57.86	41.85	55.66
11	31.53	29.68	52.42	46.95	67.97
12	31.30	36.07	43.95	50.92	41.77
13	31.45	47.99	40.90	61.69	54.35
14	33.59	44.69	66.55	67.86	31.14
15	43.27	36.83	*	43.58	67.96
16	40.34	38.13	*	55.23	45.90
17	33.64	31.05	*	41.09	68.65
PROMEDIO	32.93	35.91	44.34	51.15	54.18

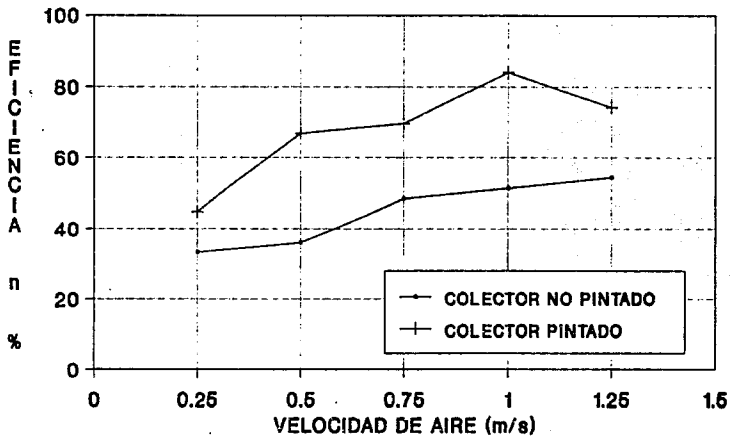
* Nublado

CUADRO IX. Eficiencias del colector (η) en convección forzada y aletas con superficie negra.

HORA	0.25 m/s η (%)	0.50 m/s η (%)	0.75 m/s η (%)	1.00 m/s η (%)	1.25 m/s η (%)
10	47.27	75.64	89.62	94.92	76.38
11	48.55	61.15	56.21	87.17	89.98
12	43.73	60.10	74.40	77.69	78.15
13	39.27	62.69	66.70	75.34	60.54
14	38.06	74.56	61.30	82.73	81.32
15	45.31	67.61	70.56	97.35	59.04
16	36.01	*	*	73.05	*
17	60.76	*	*	*	*
PROMEDIO	44.87	66.96	69.80	84.04	74.24

* Nublado

**EFICIENCIA PROMEDIO DEL COLECTOR
vs VELOCIDAD DE AIRE
COLECTOR PINTADO Y NO PINTADO**



CONVECCION FORZADA

FIGURA 8

En estos resultados se observa que el valor de la eficiencia del colector es mayor conforme aumenta el flujo de aire dentro de él, tanto para el colector con aletas con características especulares como para el colector pintado. Esto permite comprobar que la hipótesis 3 (pág. 37) es verdadera. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el aumento de temperatura del aire disminuye al aumentar el flujo de aire; por lo que al emplear velocidades de aire muy altas se tienen aumentos de temperatura demasiado pequeños y por lo tanto temperaturas de secado muy bajas. A pesar de esto, dentro del rango de velocidades de aire empleadas en la experimentación, se obtuvieron mayores velocidades de secado al emplear mayores velocidades de aire, pero esto fué por el aumento del coeficiente de transferencia de masa K_y , esto se explicará posteriormente. En la bibliografía (2) se encuentran eficiencias térmicas que van del 76 al 87 % para un colector con diseño semejante y con superficie de las aletas con características especulares; el hecho de que las eficiencias reportadas sean mayores a las obtenidas experimentalmente puede deberse a los materiales empleados en cada colector, por ejemplo, la cubierta del colector empleado en la referencia fue de vidrio y no de acrílico.

En las gráficas de las figuras 9 a 16 se presentan los aumentos de temperatura del aire junto a la radiación total real durante las pruebas realizadas a diferentes velocidades de aire. Los incrementos de temperatura del aire máximos en el colector ($\Delta T_{\text{máx}}$) se reportan en el cuadro X. En dicho cuadro se observa que hay una diferencia muy marcada de los valores de $\Delta T_{\text{máx}}$ con

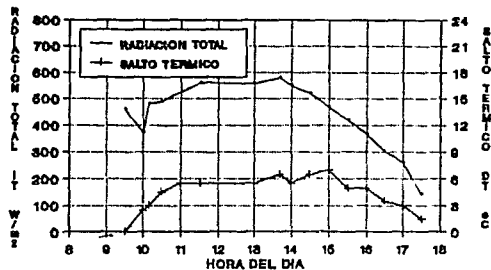
respecto a las velocidades de aire empleadas; se presentan incrementos de temperatura del aire máximos que van desde 7 °C para velocidades de aire en el colector de 0.69 m/s, hasta 2.5 °C para velocidades de aire de 3.45 m/s. También se observa que aparentemente no hay una diferencia de los $\Delta T_{\text{máx}}$ entre las dos condiciones de la superficie del colector en cada velocidad; sin embargo, esto no implica que tengan eficiencias muy semejantes ya que en el cálculo del $\Delta T_{\text{máx}}$ no se considera la radiación recibida y es un valor que no se presenta durante toda la corrida.

CUADRO X. Incrementos de temperatura del aire máximos en el colector ($\Delta T_{\text{máx}}$).

Velocidad del aire en el colector (m/s)	Colector con aletas especulares	Colector pintado
	$\Delta T_{\text{máx}}$ (°C)	$\Delta T_{\text{máx}}$ (°C)
0.69	7.0	7.0
1.38	5.5	5.5
2.07	3.5	4.5
2.76	3.5	3.5
3.45	2.5	3.0

Hay que considerar que los valores de $\Delta T_{\text{máx}}$ se obtienen sólo en la horas de mayor irradiancia, como lo muestran las gráficas de las figuras 9 a 16. Así encontramos que para la velocidad de aire en el colector de 3.45 m/s (1.25 m/s en la cámara de secado) se tienen incrementos de temperatura del aire de sólo 1 °C en otras horas del día (figuras 12 y 13); por lo que no se hace recomendable trabajar a velocidades de aire mayores.

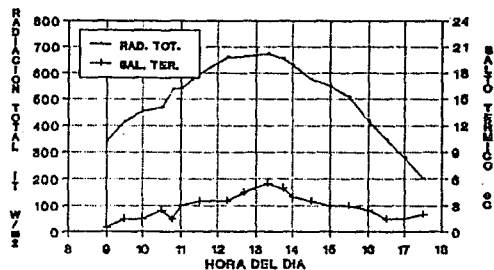
**RADIACION TOTAL Y SALTO TERMICO
EN EL COLECTOR vs HORA DEL DIA
VELOCIDAD DE AIRE 0.25 m/s**



COLECTOR NO PINTADO
CONVECCION FORZADA

FIGURA 9

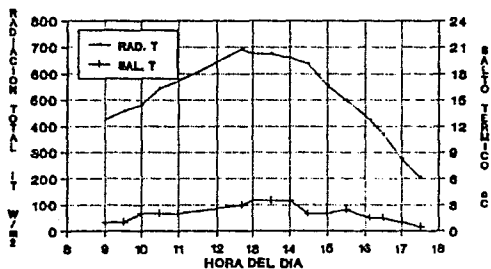
**RADIACION TOTAL Y SALTO TERMICO
EN EL COLECTOR vs HORA DEL DIA
VELOCIDAD DE AIRE 0.50 m/s**



COLECTOR NO PINTADO
CONVECCION FORZADA

FIGURA 10

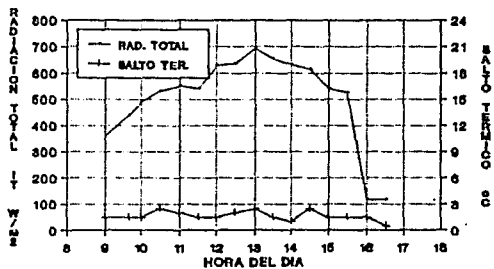
**RADIACION TOTAL Y SALTO TERMICO
EN EL COLECTOR vs HORA DEL DIA
VELOCIDAD DE AIRE 1.00 m/s**



COLECTOR NO PINTADO
CONVECCION FORZADA

FIGURA 11

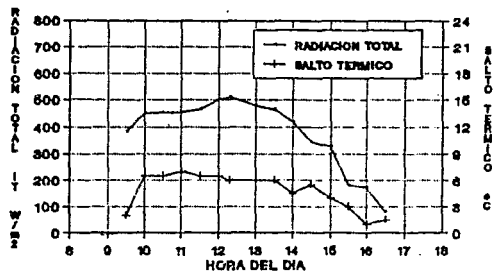
**RADIACION TOTAL Y SALTO TERMICO
EN EL COLECTOR vs HORA DEL DIA
VELOCIDAD DE AIRE 1.25 m/s**



COLECTOR NO PINTADO
CONVECCION FORZADA

FIGURA 12

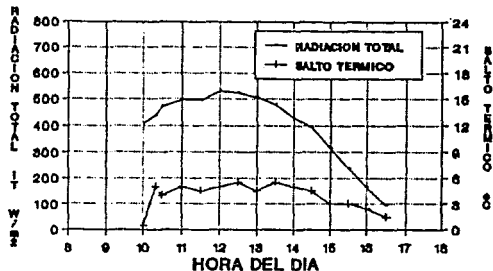
**RADIACION TOTAL Y SALTO TERMICO
EN EL COLECTOR vs HORA DEL DIA
VELOCIDAD DE AIRE: 0.25 m/s**



COLECTOR PINTADO
CONVECCION FORZADA

FIGURA 13

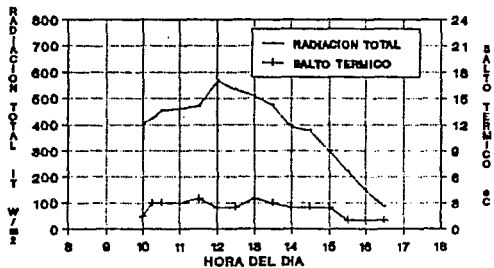
**RADIACION TOTAL Y SALTO TERMICO
EN EL COLECTOR vs HORA DEL DIA
VELOCIDAD DE AIRE 0.50 m/s**



COLECTOR PINTADO
CONVECCION FORZADA

FIGURA 14

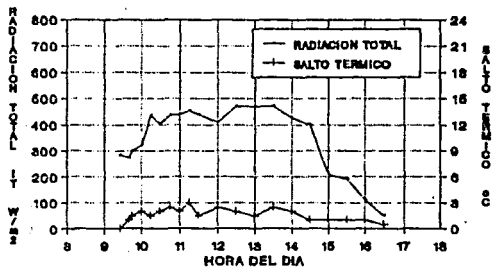
**RADIACION TOTAL Y SALTO TERMICO
EN EL COLECTOR vs HORA DEL DIA
VELOCIDAD DE AIRE: 1.00 m/s**



COLECTOR PINTADO
CONVECCION FORZADA

FIGURA 15

**RADIACION TOTAL Y SALTO TERMICO
EN EL COLECTOR vs HORA DEL DIA
VELOCIDAD DE AIRE: 1.25 m/s**



COLECTOR PINTADO
CONVECCION FORZADA

FIGURA 16

3.2.2 EFECTO DE LA INCLINACION DEL COLECTOR EN LA MOVILIDAD
DEL AIRE EN CONVECCION NATURAL

Los valores calculados de la relación $\Delta T/I_r$ en cada hora para las pruebas realizadas sin muestra se presentan en los cuadros XI y XII.

CUADRO XI. Relación $\Delta T/I_r$ en convección natural y aletas captadoras con características especulares.

HORA \ INCLIN.	$\Delta T/I_r$ ($^{\circ}\text{C m}^2/\text{W}$)		
	7 GRADOS	24 GRADOS	41 GRADOS
10	0.0151	0.0124	0.0140
11	0.0262	0.0208	0.0138
12	0.0238	0.0263	0.0166
13	0.0275	0.0284	0.0173
14	0.0303	0.0344	0.0167
15	0.0307	0.0325	0.0178
16	0.0348	0.0680	0.0289
17	0.0397	0.0620	0.0460

CUADRO XII. Relación $\Delta T/I_r$ en convección natural y aletas captadoras con superficie negra.

HORA \ INCLIN.	$\Delta T/I_r$ ($^{\circ}\text{C m}^2/\text{W}$)		
	7 GRADOS	24 GRADOS	41 GRADOS
10	0.0107	0.0224	0.0130
11	0.0278	0.0365	0.0178
12	0.0376	0.0372	0.0197
13	0.0370	0.0349	0.0184
14	0.0397	0.0328	0.0181
15	0.0789	0.0320	0.0236
16	0.1340	0.0471	0.0296
17	0.5731	0.1542	0.1115

Los datos de los cuadros XI y XII demuestran que se tienen incrementos de temperatura del aire mayores cuando el colector se encuentra con una inclinación de 7 y 24 grados y que disminuye al aumentar el ángulo de inclinación a 41 grados. Esto ocurre tanto

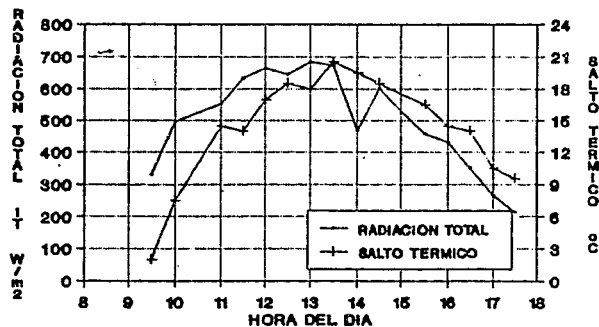
para el colector con aletas con características especulares como para el colector pintado. Esto lo podemos ver en las gráficas de las figuras 17 a 22, donde se presentan los aumentos de temperatura del aire junto a la radiación total real durante las pruebas realizadas a diferentes inclinaciones del colector.

En los cuadros XI y XII se observa que hay una diferencia mayor de las relaciones de $\Delta T/I_r$ entre los ángulos de inclinación de 41 y 24 grados que entre los ángulos de inclinación de 24 y 7 grados, esto puede atribuir al hecho de que a 7 y 24 grados el fuelle que conecta al colector y la cámara obstaculiza el paso del aire a través del equipo por encontrarse plegado, esto no ocurre cuando el colector se encuentra con un ángulo de inclinación de 41 grados porque el fuelle queda estirado.

En estos cuadros también se observa que el valor de la relación ($\Delta T/I_r$) aumenta considerablemente en las últimas horas de cada corrida, esto se debe al hecho de que el incremento de temperatura de aire al pasar por el colector (ΔT) se va reduciendo en menor velocidad que la radiación recibida (I_r) durante el atardecer; este comportamiento se ve claramente en las gráficas de las figuras 17 a 22.

El hecho de que los incrementos de temperatura del aire en el colector fueran menores cuando el ángulo de inclinación del colector era mayor permiten comprobar la suposición de la hipótesis 2 (pág.36), ya que el gradiente de temperatura existente

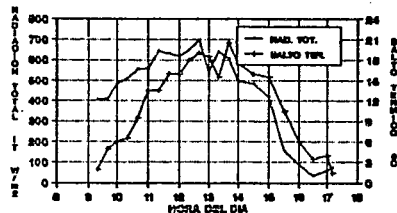
**RADIACION TOTAL Y SALTO TERMICO
EN EL COLECTOR vs HORA DEL DIA
INCLINACION DEL COLECTOR: 7 GRADOS**



COLECTOR NO PINTADO
CONVECCION NATURAL

FIGURA 17

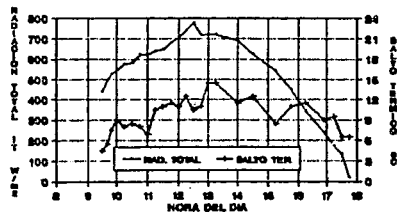
**RADIACION TOTAL Y SALTO TERMICO
EN EL COLECTOR vs HORA DEL DIA
INCLINACION DEL COLECTOR: 24 GRADOS**



COLECTOR NO PINTADO
CONVECCION NATURAL

FIGURA 18

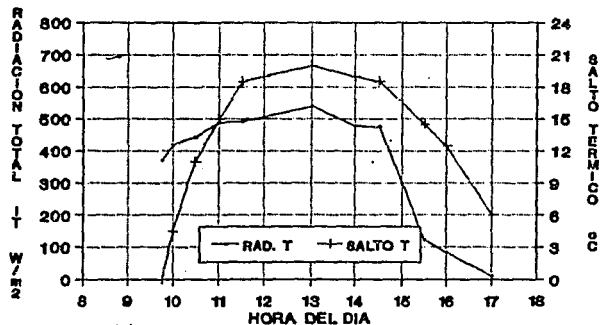
**RADIACION TOTAL Y SALTO TERMICO
EN EL COLECTOR vs HORA DEL DIA
INCLINACION DEL COLECTOR: 41 GRADOS**



COLECTOR NO PINTADO
CONVECCION NATURAL

FIGURA 19

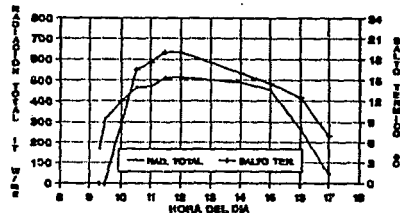
**RADIACION TOTAL Y SALTO TERMICO
EN EL COLECTOR vs HORA DEL DIA
INCLINACION DEL COLECTOR: 7 GRADOS**



COLECTOR PINTADO
CONVECCION NATURAL

FIGURA 20

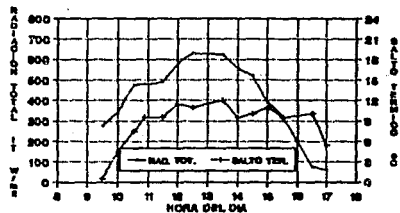
**RADIACION TOTAL Y SALTO TERMICO
EN EL COLECTOR vs HORA DEL DIA
INCLINACION DEL COLECTOR: 24 GRADOS**



COLECTOR PINTADO
CONVECCION NATURAL

FIGURA 21

**RADIACION TOTAL Y SALTO TERMICO
EN EL COLECTOR vs HORA DEL DIA
INCLINACION DEL COLECTOR: 41 GRADOS**



COLECTOR PINTADO
CONVECCION NATURAL

FIGURA 22

está relacionado con la movilidad del aire a través del equipo. Esto se corrobora al analizar los gradientes de temperatura del aire en la cabina de secado, éstos se presentan en el cuadro XIII. en donde se observa que las diferencias de temperatura del aire entre la parte superior de la cabina de secado y la salida del colector son menores para inclinaciones del colector de 41 grados y mayores para inclinaciones de 24 y 7 grados. Las diferencias de temperatura en la cámara se están tomando como una referencia de la movilidad del aire ya que resultó que cuando se trabajo con velocidades de aire mayores (convección forzada) las diferencias de temperatura tendieron a cero.

CUADRO XIII. Diferencias de temperatura de aire entre la parte superior de la cabina de secado y la salida del colector. Convección natural.

HORA \ INCLIN.	COL. CON ALETAS ESPECULARES			COLECTOR PINTADO		
	7°	24°	41°	7°	24°	41°
10	6.0	4.5	3.0	4.5	6.5	4.5
11	9.5	8.5	3.5	10.0	9.0	4.5
12	10.0	11.0	6.0	7.5	10.0	4.0
13	12.5	11.0	8.0	13.0	9.0	4.5
14	13.5	10.5	8.0	11.5	8.5	3.5
15	9.0	10.0	8.5	13.0	6.5	5.5
16	10.0	3.0	4.0	7.0	7.5	2.0
17	9.5	2.5	3.0	2.0	3.5	3.0

3.2.3 EFECTO DE LAS CARACTERISTICAS DE LA SUPERFICIE DEL CAPTADOR DE ENERGIA EN LA EFICIENCIA DEL COLECTOR

Para determinar el efecto en la captación de energía de las dos características de la superficie del colector trabajadas, se realizó la comparación de eficiencias para convección forzada y de

$\Delta T/Ir$ para convección natural. Así, al comparar los datos de eficiencia de los cuadros VIII y IX (pág 60) encontramos que son mayores con el colector pintado, para velocidades de flujo iguales.

En el caso de convección natural, al realizar la comparación de $\Delta T/Ir$ de los cuadros XI y XII (pág. 66), podemos apreciar que para inclinaciones iguales se tienen valores mayores de $\Delta T/Ir$ para el colector pintado.

Con base en lo anterior podemos inferir que se tiene mayor captación de energía cuando la superficie del colector presenta un recubrimiento de pintura de color absorbente que cuando se encuentra con las superficies con características especulares. Esto demuestra que de la hipótesis 1 es falsa para este tipo de superficie en particular; ya que se esperaba que se tuviera una mayor captación de energía en condiciones de las aletas con superficie especular debido al acomodo que presenta el diseño, el cual permite mayor reflexión de la radiación (5).

Por otra parte, el hecho de que en este tipo de equipos no sea necesario mantener las superficies de las aletas con características especulares para captar mayor cantidad de energía resulta favorable desde el punto de vista práctico, debido a que para mantener las aletas con estas características se requiere que se encuentren limpias y por lo tanto es necesario eliminar constantemente el polvo que se les acumula.

4.4 EFECTO DE LAS VARIABLES MANEJADAS EN EL PROCESO DE SECADO DE ZANAHORIA

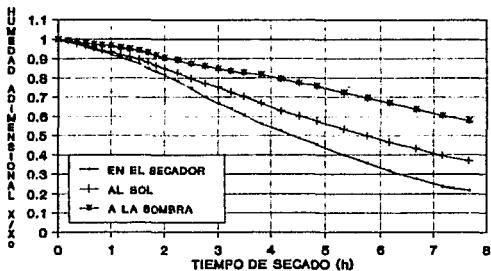
Al hacer la comparación del proceso de secado realizado en el equipo y a la intemperie podemos observar claramente en la gráfica de la figura 23 que la muestra secada en la cabina del equipo bajo convección natural presentó una disminución de humedad mayor que la muestra secada al sol directo; a la vez ésta tuvo una mayor pérdida de humedad que la muestra que no recibía radiación solar directa.

Si comparamos la humedad adimensional (X/X_0) alcanzada a las 7 horas de secado de esta prueba, obtenemos en la cabina un valor de 0.25; en el secado al sol directo de 0.41 y en la muestra que no recibía radiación directa de 0.62. esto demuestra que se tienen velocidades de secado mayores en la cabina que bajo las condiciones ambientales. Este comportamiento se obtuvo en todas las pruebas, tanto en convección forzada como en convección natural lo cual manifiesta una de las ventajas del empleo del equipo con respecto al secado bajo la simple exposición de los productos al sol directo a la intemperie.

3.2.4.1 EFECTO DEL TIPO DE CONVECCION EN EL PROCESO DE SECADO

Al comparar las curvas de secado de las figuras 23 a 26, en donde se encuentra graficada la humedad adimensional (X/X_0) vs tiempo de secado, encontramos que para las pruebas realizadas en

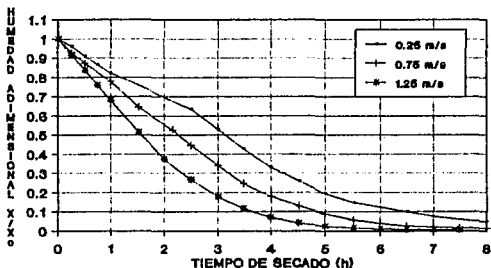
CINETICAS DE SECADO
HUMEDAD ADIMENSIONAL vs TIEMPO DE SECADO
INCLINACION DEL COLECTOR: 7 GRADOS



COLECTOR NO PINTADO
 CONVECCION NATURAL

FIGURA 23

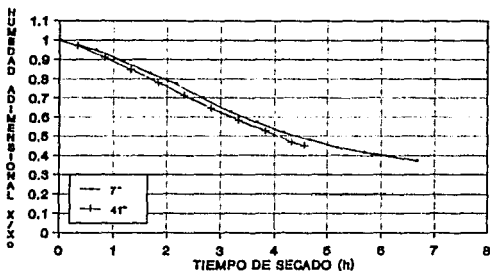
CINETICAS DE SECADO
HUMEDAD ADIMENSIONAL vs TIEMPO DE SECADO
COMPARACION ENTRE VELOCIDADES DE AIRE



COLECTOR NO PINTADO
 CONVECCION FORZADA

FIGURA 24

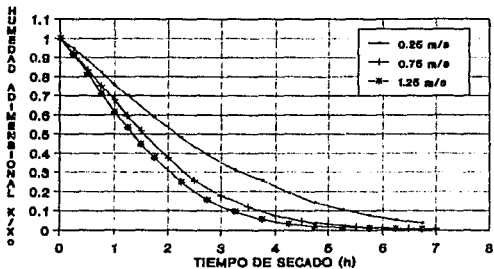
CINETICAS DE SECADO
HUMEDAD ADIMENSIONAL vs TIEMPO DE SECADO
COMPARACION ENTRE INCLINACIONES



COLECTOR PINTADO
 CONVECCION NATURAL

FIGURA 25

CINETICAS DE SECADO
HUMEDAD ADIMENSIONAL vs TIEMPO DE SECADO
COMPARACION ENTRE VELOCIDADES DE AIRE



COLECTOR PINTADO
 CONVECCION FORZADA

FIGURA 26

convección forzada se obtuvieron procesos de secado más rápidos que en convección natural. Por ejemplo, en las pruebas realizadas con las aletas con características especulares, a las 4 horas se alcanza una humedad adimensional de 0.54 en la muestra secada en convección natural; en cambio se obtiene un valor de 0.34 para la velocidad de aire de secado más baja utilizada en convección forzada que fué de 0.25 m/s (ver figuras 23 y 24); el valor de humedad adimensional de 0.34 se obtuvo hasta las 6 horas de secado en convección natural, en este tiempo ya se tenía un valor de 1.3 aproximadamente para el secado a 0.25 m/s en convección forzada. El mismo efecto se presentó en las pruebas realizadas con el colector pintado (ver figuras 25 y 26). Hay que hacer notar que es muy alta la humedad adimensional que se consigue en convección natural y que se obtiene un producto aun muy húmedo al terminar el tiempo disponible para utilizar el secador en un día.

La mayor velocidad de secado en convección forzada con respecto a convección natural se debe a la existencia de coeficientes de transferencia de masa (K_y) mayores.

3.2.4.2 EFECTO DE LA VELOCIDAD DEL AIRE EN EL PROCESO DE SECADO

En las pruebas de secado realizadas con convección forzada se obtuvo que la velocidad del proceso de secado era mayor conforme aumentaba la velocidad del aire. Esto se puede apreciar en las figuras 24 y 26, donde se encuentra graficada la humedad adimensional vs tiempo de secado. En el cuadro XIV podemos

apreciar el aumento del valor de la velocidad de secado en el periodo constante (N_c) causado por el aumento de la velocidad del aire, tanto para el colector no pintado como pintado de las pruebas realizadas a 0.75 y 1.25 m/s. La mayor velocidad de secado ocasionada por la mayor velocidad del aire se debe a la existencia de coeficientes de transferencia de masa (K_y) mayores, esto puede verse en los valores del cuadro XIV, en donde, para la velocidad de aire de 0.75 m/s se tuvieron valores de K_y de 104 Kg de agua/hm²ΔY en promedio, y para la velocidad de aire de 1.25 m/s el valor de K_y fue de alrededor de 200 Kg de agua/hm²ΔY en el periodo de secado a la velocidad constante.

CUADRO XIV. Valores de velocidad de secado en el periodo constante (N_c [=] Kg de agua/hm²), de humedad crítica (X_c [=] Kg de agua/Kg de sólido seco) y de coeficientes de transferencia de masa para periodo de secado a velocidad constante (K_y [=] Kg de agua/hm²ΔY).

CONDICIONES DE SECADO	N_c	X_c	K_y
COLECTOR NO PINTADO			
VELOCIDAD DEL AIRE:			
0.75 m/s	1.33	2.0819	85.0
1.25 "	2.63	4.2407	196.11
COLECTOR PINTADO			
VELOCIDAD DEL AIRE:			
0.75 m/s	2.12	4.8711	123.09
1.25 "	2.96	3.6951	197.45

3.2.4.3 EFECTO DE LA INCLINACION DEL COLECTOR EN EL PROCESO DE SECADO

En la gráfica de la figura 25 se puede observar que las cinéticas de secado de las pruebas realizadas en convección

natural bajo diferentes ángulos de inclinación del colector son muy semejantes; tenemos por ejemplo que para las 4 horas de secado se alcanza un valor de humedad adimensional de 0.51 para la inclinación del colector de 41° y de 0.54 para una inclinación de 70° . Esto demuestra que, para este equipo en convección natural y bajo las condiciones de secado manejadas tales como densidad de carga (7.3 Kg de material a secar/ m^2) y acomodo del producto: el proceso de secado no se ve favorecido por una mayor movilidad del aire al aumentar el ángulo de inclinación del colector, como se planteó en la hipótesis 2. Esto se puede explicar por el hecho de que la ganancia en movilidad del aire a través del equipo, que se obtiene por emplear ángulos de inclinación mayores con el equipo vacío, se vió contrarrestada por la presencia de producto dentro de la cabina de secado.

Tomando en cuenta que sucedió el fenómeno anterior (a pesar de que la cantidad y la densidad de carga del producto a secar no era alta) se puede decir que para este tipo de equipos no es conveniente el cambio del ángulo de inclinación del colector con fines de obtener mayor movilidad del aire en el secado con convección natural.

Por otro lado, numerosas referencias bibliográficas (1, 2, 15) señalan que, para efectos de captación de energía, es recomendable que el ángulo de la inclinación (β) de este tipo de colectores sea fija e igual al valor absoluto de la latitud del lugar (ya que es la inclinación donde se obtiene el promedio anual menor de la diferencia entre el ángulo de declinación (δ) y la

superficie colector); esto se recomienda principalmente para simplificar la construcción y para facilitar la operación del equipo; sin embargo, como en el secador empleado en la experimentación se tiene la cualidad de poder variar los ángulos de inclinación del colector, se puede recurrir a trabajar con la inclinación que favorezca la captación de energía aunque no se modifique la movilidad del aire en convección natural durante el secado.

3.2.4.4 EFECTO DE LAS CARACTERISTICAS DE LA SUPERFICIE DE LAS ALETAS DEL COLECTOR EN EL PROCESO DE SECADO

Al analizar las cinéticas de secado de las gráficas de las figuras 23 a 26 encontramos que para el secado en la cabina, en casi todos los casos la disminución de la humedad adimensional es mayor para las pruebas realizadas con el colector pintado; esto ocurre en las tres velocidades de aire empleadas en convección forzada (fig. 24 y 26) a pesar de que la disminución de humedad adimensional de los lotes control son semejantes o en algunos casos incluso menores que en las pruebas con el colector no pintado. En convección natural, con una inclinación del colector de 7 grados, se tuvieron disminuciones de humedad casi iguales durante las primeras cuatro horas de secado y después fue mayor la disminución de humedad bajo las condiciones del colector no pintado (fig. 23 y 25) por lo que se hace recomendable realizar más pruebas en convección natural para determinar mejor el efecto. A pesar de esto podemos decir que, en general, es más favorable para el secado el colector con superficie negra debido a la mayor

**ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA**

eficiencia que presenta el colector pintado (con lo cual proporciona mayor incremento de temperatura del aire y con ello una menor humedad relativa del aire de secado), factores que favorecen la velocidad del proceso.

4.4.5 CAPACIDAD DEL EQUIPO

Para la mayor velocidad de secado que se obtuvo experimentalmente (que correspondió a las condiciones de convección forzada a una velocidad de aire de 1.25 m/s y con el colector pintado), se encontró que la humedad relativa del aire de secado en el periodo constante pasaba de 37.5% a 56.5%; tomando en cuenta la humedad absoluta del aire antes del atravesar el material y su humedad de saturación, así como la velocidad de secado, se calculó que la capacidad de captación de humedad era de 2.4 veces la humedad captada. Considerando que la cantidad de material empleado fue de 2 Kg, se estima que en el equipo podrían secarse 6 Kg/corrida.

5 CONCLUSIONES

Con base en los resultados anteriores se llegó a las siguientes conclusiones:

1.- Para equipos de este tipo y de este material, es más conveniente utilizar las aletas con un recubrimiento de pintura absorbente que usarlas con superficies especulares, ya que de esta forma se consigue mayor eficiencia de captación y con ello ventajas en el proceso de secado de los productos. Esto fue evidente en las pruebas realizadas en convección forzada: sin embargo en convección natural sólo se pudo observar que la captación de energía era mayor al ser mayores las relaciones $\Delta T/lr$ para el colector pintado, pero en las pruebas de secado no se notó la diferencia bajo las dos características de las aletas captadoras, por lo cual se requiere hacer más pruebas de secado para determinar mejor el efecto.

2.- En este diseño es más conveniente el empleo de una inclinación fija del colector cuando se trabaja en convección natural ya que la ganancia en movilidad que se presenta por emplear inclinaciones mayores (con el equipo vacío) se ve nulificada por la presencia de producto dentro de la cabina de secado. Por otro lado, al tomar en cuenta que las disminuciones de humedad en el producto son tan pequeñas al secarse en convección natural (ocasionadas por las bajas velocidades de secado) se infiere que, salvo excepciones, para este tipo de equipos, con diseño y arreglo semejantes, es más aconsejable trabajarlos en convección

forzada, por lo cual se hace necesario disponer de energía eléctrica.

3.- Para este diseño y en el intervalo de velocidades de aire manejado, se tiene un aumento de la eficiencia del colector junto con el aumento del coeficiente de transferencia de masa a mayores velocidades de flujo. Pero hay que considerar la temperatura del aire que se obtiene ya que a mayores velocidades de flujo se consiguen menores aumentos de temperatura del aire en el colector, lo cual ocasiona una disminución de la temperatura del aire de secado; esto resalta la importancia de manejar velocidades de flujo que permitan obtener eficiencias del colector altas y elevados coeficientes de transferencia de masa, pero que a su vez permitan tener temperaturas de aire adecuadas para el secado, de forma tal que el proceso sea rápido; para esto se debe de incluir una evaluación de la energía eléctrica requerida en el ventilador.

4.- De acuerdo con los datos obtenidos hasta el momento, los equipos con este tipo de diseño no permiten resolver satisfactoriamente las necesidades agrícolas e industriales de secado de alimentos debido a que las cantidades que pueden secarse son muy reducidas en relación a los volúmenes que suelen manejarse en la práctica. Esto se debe a que la energía captada con este tipo de colectores es relativamente baja, lo cual nos reafirma la importancia de seguir investigando sobre los diseños de colectores y equipos de secado solar.

6 RECOMENDACIONES

Para profundizar en el estudio del proceso de secado de la zanahoria y ampliar la evaluación del equipo empleado en la experimentación se propone:

1.- Realizar una evaluación cuantitativa de las características del producto obtenido bajo las diferentes condiciones de secado en este equipo, estudiando factores tales como: pérdida de vitaminas, reconstitución, color y textura. Esta información, junto con las referentes a las velocidades de secado, permitirán establecer las condiciones más adecuadas del proceso.

2.- Se recomienda llevar a cabo el secado en este equipo de otros materiales, como por ejemplo: chicharo, chiles, uvas y ajos, y comparar los resultados con los obtenidos empleando otros métodos de secado.

3.- Realizar experimentos con diferentes cantidades de material a secar y también trabajar con diferentes densidades de carga en las charolas para optimizar la operación en el equipo.

4.- Hacer una evaluación económica del equipo y compararlo con otros equipos.

5.- Modificar el diseño para favorecer más la movilidad del aire en convección natural y obtener mayores velocidades de secado, buscando prescindir del uso del ventilador y de esta forma

hacer un equipo más útil en zonas donde se carece de energía eléctrica.

6.- A pesar de que actualmente hay diversos diseños que satisfacen necesidades de secado reales éstos no se han difundido a gran escala; una de las causas principales de esto es que la cantidad de energía captada es relativamente baja; por lo que para contribuir al desarrollo de secadores solares que presenten mayores posibilidades de aplicación, se recomienda continuar con la investigación sobre diseños de colectores partiendo de la información más reciente de que se dispone acerca de materiales metálicos, aislantes, recubrimientos, reflectores y cubiertas. Además realizar estudios que profundicen en la viabilidad económica de los secadores solares tomando en cuenta la información técnica con que se dispone.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- BERNA, A. et al. 1988. "Deshidratación de alimentos por energía solar. I. Descripción de un prototipo experimental y ensayos exploratorios con zanahorias". Rev. Agroquím. Tecnol. Aliment. 28(2). España. pp. 241-249.
- 2.- BEVILL, V. D. and Brandt H. 1968. "A solar energy collector for heating air". Solar Energy. Vol. 12. Gran Bretaña. Pergamon Press. pp. 12-21.
- 3.- BOLIN, H. R. and Salunkhe D. K. 1982 "Food deshydration by solar energy". CRC Criticla Reviews in Food Scince and Nutrition. 16(4). pp. 327-354.
- 4.- BRAMBILA Paz, Alejandro. 1989. Influencia de la fecha de siembra en la emisión del tallo floral en zanahoria (Daucus carota) variedad nantes. Tesis. Lic. Ing. Agric. FES-C, UNAM, Edo. de Mèx. 112 p.
- 5.- CARBONELL, J. V., F. P. y J. L .P. 1983. Deshidratación de alimentos por energía solar. III. Descripción del prototipo piloto y ensayo de los colectores solares. Rev. Agroquímica y Tecnología de Alimentos. España. 23(1). pp. 107-117.
- 6.- CEDEL. 1984. Diccionario de los Alimentos. 2a. Ed.

México, Ediciones CEDEL Editorial Mexicana, S.A.
Barcelona-México.

- 7.- CHEFTEL, J.C., et al. 1976. Introducción a la Bioquímica y Tecnología de los Alimentos. Vol. II. Zaragoza España. Ed. Acribia. 404 p.

- 8.- DE LEON Vivar, Jesús Saul. 1979. Diseño y construcción de un secador de grano utilizando la radiación solar. Tesis, Lic. Ing. Quím. Facultad de Química. UNAM. México, D. F.

- 9.- DESROSIER, N W. 1963. Conservación de los alimentos. 2a. Ed. México. CECSA. 470 p.

- 10.- EARLE, R. L. 1988. Ingeniería de los alimentos. 2a. Ed. España. Ed. Acribia, S. A. 203 p.

- 11.- ESPINOZA Irigoyen, Raymundo. 1989. Determinación de un sistema mínimo de labores con diferente profundidad de fertilización en la producción de zanahoria (*Daucus carota L.*) en el Valle de México. Tesis Lic. Ing. Agric. FES-C. UNAM. Edo. de Méx. 86 p.

- 12.- ESTRADA Cajigal, Vicente. 1985. Análisis crítico de procedimientos para estimar la radiación solar. México. Instituto de Ingeniería. UNAM. 211 p.

- 13.- FERREZ de la Monja, Juan y Nacif Abrach, Said Humberto.

1971. Contribución al estudio teórico experimental del secado de productos vegetales. Tesis, Lic. Ing. Quím. Facultad de Química. UNAM. México D. F. 280 p.
- 14.- FERSINI, A. 1984. Horticultura práctica. México. Ed. Diana. 527 p.
- 15.- GARCIA, B. L., J. J. 1976. La energía solar el hombre y la agricultura. Serie Técnica. Ministerio de Agricultura. Secretaría General Técnica. España. Ed. Servicio de Publicaciones Agrarias. 285 p.
- 16.- GARCIA Castillo, Rosalba Julieta. 1985. Perspectivas actuales y futuras de la industrialización del plátano deshidratado en los mercados nacional e internacional. Tesis, Lic. Ing. Quím. Facultad de Química. UNAM. México, D. F. 137 p.
- 17.- HALFACRE, G. R. 1984. Horticultura. México. AGT-EDITOR, S. A. 727 p.
- 18.- JUAREZ Domínguez, Francisco. 1985. Empleo de un secador solar para frutas y hortalizas en el Valle de Guaymas Sonora. Tesis, Lic. Q. F. B. Facultad de Química. UNAM. México, D. F. 65 p.
- 19.- KHURDIYA, D. S. and Susanta K. Roy. 1986. "Solar drying of fruits and vegetables". Indian Food Packer. Jul.-Agost. pp. 28-39.

- 20.- LEON Vázquez, Medardo Juan. 1987. Optimización de un secador de aire directo. Tesis, Lic. Ing. Quím. Facultad de Química. UNAM. México D. F. 119 p.
- 21.- MANRIQUE, J. A. 1984. Energía solar. Fundamentos y aplicaciones fototérmicas. México. Ed. Harla. 255 p.
- 22.- MARTINEZ, M. y Nora Montes. 1984. "El sol, fuente de energía nueva y renovable". Información Científica y Tecnológica. México, D. F. Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología. Vol. 6. Num. 92. Mayo. pp. 29-31.
- 23.- MORALES Ballesteros, Alma Patricia. 1985. Deshidratación de plátano por secado de charolas. Tesis, Lic. Ing. Quím. Facultad de Química. UNAM. México, D. F. 67 p.
- 24.- NICKERSON, J. T. R. and Louis J. Ronsivalli. 1982. Elementary Food Science. 2nd. Edition. USA. AVI Publishing Company Inc. Westport, connecticut. 441 p.
- 25.- PLAZA, J. L. de la. 1984. "Problemática del tratamiento frigorífico de la zanahoria" Revista Alimentaria. pp. 41-45.
- 26.- RAU, H. 1984. Energía solar. Aplicaciones prácticas. Barcelona España. Marcombo Boixare Editores. 215 p.
- 27.- RODOT, M. 1983 "Energía solar, una respuesta razonable". Energía solar fotovoltaica. Barcelona España. Marcombo

Boixareu Editores. pp. 9-12.

- 28.- SANTILLAN Hinojosa, Ma. del Rocío. 1983. Elaboración de bebida a base de jugo de zanahoria reforzadas con jugo de frutas. Tesis, Lic. Q. F. B. Facultad de Química. UNAM. México, D. F. 68 p.
- 29.- SECOFI. Norma Oficial Mexicana NOM-FF-24-1982. Productos Alimenticios no Industrializados para uso Humano-Tubérculo Zanahoria (*Daucus carota*) Especificaciones. Secretaria de Patrimonio y Fomento Industrial. Dirección General de Normas.
- 30.- Secretaría de Energía Minas e Industria Parastatal. 1990 Balance Nacional de Energía 1989. México, D. F.
- 31.- SINGH, R. P and Heldman D. R. 1984. Introduction to Food Engineering. USA. Academic Press, Inc. 306 p.
- 32.- SOTO García, Jesús Fausto. 1984. La energía solar como alternativa de solución al problema energético. Monografía. Lic. Ing. Quím.. Facultad de Química. UNAM. México D. F. 144 p.
- 33.- SUAZO, Abarca Samuel. 1992. Construcción y caracterización de un secador solar piloto. Tesis M. en C. especialidad en alimentos. Méx. D. F., I. P. N., E. N. C. B.

- 34.- TABOR, H. 1978. "Testing of solar collectors". Solar Energy. Vol. 20. Gran Bretaña. Pergamon Press. pp 293-303.
- 35.- TREYBAL, R. E. 1980. Operaciones de transferencia de masa. 2a. Ed. Mexico. Mc Graw-Hill. 858 p.
- 36.- VEGA Leyva, Marisela. 1986. Innovación del cultivo de la zanahoria en el Ejido de Villa del Carbón, Municipio de Tepetzotlán, Estado de México, como alternativa para el aprovechamiento en el ciclo Otoño-Invierno. Tesis, Lic. Ing. Agric. FES-C. UNAM. Edo. de Mex. 117 p.

NOMENCLATURA

W = masa del material a secar [=] Kg

t = tiempo [=] h

dt = diferencial de tiempo [=] h

X = humedad del producto en base seca [=] Kg de agua/Kg de sólido seco

X^* = humedad de equilibrio [=] Kg de agua/Kg de sólido seco

X_c = humedad crítica del producto en base seca [=] Kg de agua/kg de sólido seco

X_o = humedad inicial del producto en base seca [=] kg de agua/kg de sólido seco

I_{cs} = intensidad de la constante solar [=] W/m^2

δ = ángulo de declinación [=] grados

n = día del año

ϕ = latitud [=] grados

w = ángulo horario [=] grados

α = altura solar [=] grados

θ_z = ángulo zenital [=] grados

θ = ángulo de incidencia [=] grados

γ = ángulo azimutal [=] grados

β = ángulo de inclinación [=] grados

T_d = longitud del día [=] h

E = ecuación del tiempo [=] min

l_{ref} = longitud de referencia [=] grados

l_{loc} = longitud local [=] grados

η = eficiencia térmica del colector [=] %

G = flujo másico de aire [=] Kg de aire húmedo/s

A_c = área de captación [=] m^2

C_p = capacidad calorífica del aire [=] KJ/Kg de aire húmedo $^{\circ}C$
 ΔT = aumento de temperatura del aire de la entrada a la salida del
 colector, o salto térmico [=] $^{\circ}C$
 v = velocidad del aire [=] m/s
 α = área transversal al flujo de aire [=] m^2
 V_h = volumen húmedo del aire [=] m^3/Kg de aire seco
 I_r = radiación total real [=] W/m^2
 Y = humedad absoluta del aire [=] Kg de agua/Kg de aire seco
 X_{aire} = fracción de aire seco en la mezcla aire-agua [=] Kg de
 aire seco/Kg aire húmedo
 X_{agua} = fracción de agua en la mezcla aire-agua [=] Kg de agua/Kg
 de aire húmedo
 T_a = temperatura del aire [=] $^{\circ}C$
 \bar{T}_a = temperatura promedio del aire a la salida del colector [=] $^{\circ}C$
 T_e = temperatura del aire a la entrada del colector [=] $^{\circ}C$
 I_t = radiación total [=] W/m^2
 I_b = radiación directa [=] W/m^2
 I_d = radiación difusa [=] W/m^2
 R = relación de orientación para radiación total [=] adimensional
 R_b = relación de orientación para radiación directa [=]
 adimensional
 I_{br} = radiación directa real [=] W/m^2
 I_{dr} = radiación difusa real [=] W/m^2
 A_s = área de secado [=] m^2
 m = pendiente de la recta de X vs t , (dX/dt) [=] kg de agua/kg de
 sólido seco h
 N_m = velocidad media de secado [=] Kg de agua/ hm^2
 N_c = velocidad de secado en el periodo constante [=] Kg de
 agua/ hm^2

P_p = peso del producto [=] Kg

P_{ch} = peso de la charola de secado vacía [=] Kg

P_{ch+p} = peso de la charola de secado con producto [=] Kg

S_s = sólidos secos del producto [=] Kg

F_{s_i} = fracción de sólidos secos al inicio del proceso de secado
[=] Kg de sólido seco/Kg de producto

K_{ga} = Kilogramos de agua del producto durante el proceso [=] Kg

K_y = Coeficiente de transferencia de masa [=] Kg de agua/ $hm^2\Delta Y$

Y_s = humedad de saturación del aire a la temperatura de secado [=]
Kg de agua/Kg de aire seco

X_m = humedad media [=] Kg de agua/Kg de sólido seco

t_m = tiempo medio [=] h