PN-ABC-421

SECADO SOLAR DE GRANOS

D-307

INSTITUTO CENTROAMERICANO DE INVESTIGACION
Y TECNOLOGIA INDUSTRIAL
- I C A I T I -

S E C A D O S O L A R D E G R A N O S

D - 307

PROYECTO LEÑA Y FUENTES ALTERNAS DE ENERGIA
ICAITI - ROCAP NO. 596-0089
Guatemala, mayo de 1985

I N D I C E

1. **GENERALIDADES SOBRE SECADO**

1.1. Clasificación de los productos agrícolas por su contenido de humedad

1.2 Secado

1.3 Métodos usados

1.4 Ventajas del secado

1.5 Sistemas actualmente usados en Centroamérica

1.6 Otras técnicas de secado. Técnicas especiales

2. **PRINCIPIOS BASICOS DEL SECADO**

2.1 Equilibrio vapor-líquido. Sistema aire-agua

2.2 Curvas de secado

2.3 Humedad de equilibrio

2.4 Calor latente de vaporización del agua en granos

2.5 Modelos matemáticos de secado

3. **ALMACENAMIENTO DE GRANOS**

3.1 Agentes que afectan la conservación de granos almacenados

3.2 Sistemas domésticos de almacenamiento de granos

3.3 Almacenamiento de mediana escala

3.4 Sistemas masivos o de gran escala

4. **COLECTORES SOLARES PARA CALENTAMIENTO DE AIRE**

4.1 Principios básicos de captación de energía solar

4.2 Componentes de un colector solar

4.3. Modelos de colectores

4.4. Materiales para colectores solares

4.5 Eficiencia en colectores solares

5. **SECADORES SOLARES DOMESTICOS**

5.1. Secadores solares directos

5.2 Secadores solares indirectos

6. **SECADORES SOLARES DE MEDIANA Y DE GRAN ESCALA**

6.1 Componentes de un secador solar de mediana/gran escala

6.2 Características de secadores de mediana/gran escala

6.3 Aspectos técnicos de diseño de secadores solares

7. **RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DE OPERACION**

7.1 Curvas de secado

7.2 Condiciones de operación

8. **METODOLOGIA**

8.1 Métodos de determinación de humedad (campo y laboratorio)

8.2. Instrumentos para la medición de radiación solar

8.3 Equipo para medición de la humedad y de la velocidad del aire

8.4 Otros

9. **EL SOL, FUENTE DE ENERGIA**

9.1. Las ondas electromagnéticas y la energía solar

9.2. El flujo de las ondas electromagnéticas hacia y a través de la atmósfera terrestre

9.3. La constante solar

9.4. Insolación, tipos y características generales

9.5 Balance energético al nivel del suelo

9.6 Ventajas de la energía solar

10. **BIBLIOGRAFIA**

1. GENERALIDADES SOBRE SECADO

1.1. CLASIFICACION DE LOS PRODUCTOS AGRICOLAS POR SU CONTENIDO DE HUMEDAD.

La humedad natural de un producto que, para los fines del secado se considera la humedad inicial, está relacionada con la cantidad de agua que debe removerse de él. Con base en esa humedad inicial, los productos agrícolas se clasifican en cuatro grupos:

a) Productos con muy alta humedad inicial (del orden del 80 al 90 por ciento): frutas, tabaco en hoja, etc.

b) Productos con alta humedad inicial (del orden del 60 al 80 por ciento) : café, yuca, etc.

c) Productos con humedad inicial intermedia (del orden del 35 al 60 por ciento): cacao.

d) Productos con baja humedad inicial (del orden del 15 al 35 por ciento): cereales, leguminosas y oleaginosas.

1.2. SECADO

El secado es el proceso más utilizado comercialmente para la preservación de la calidad de los productos agrícolas.

El secado de un producto consiste en extraerle parte del agua que naturalmente contiene cuando ya ha alcanzado su maduración fisiológica, hasta que sólo contenga la humedad que permita almacenarlo durante un período largo en condiciones ambientales ordinarias, y aún que pierda sus propiedades nutricionales y organolépticas.

La masa de agua que se remueve en el proceso de secado puede llegar a ser hasta cinco veces la masa total del producto seco, tal como ocurre con los productos de muy alta humedad inicial (del orden del 85 %). En el producto ya secado, a causa de que cesan casi totalmente sus actividades metabólicas, se dan condiciones desfavorables para el desarrollo de los microorganismos.

1.3. MÉTODOS USADOS

Los método usados para secar los productos alimenticios, se pueden clasificar como sigue:

a) Secado con aire caliente. Se suministra calor al producto, básicamente, por convección. Hay tres variantes principales: 1) secado solar tradicional o secado natural, 2) secado artificial, y 3) secado solar modificado.

b) Secado por contacto directo con una superficie caliente. Se suministra calor al producto, principalmente por conducción, a través de una placa caliente.

c) Secado por energía radiante. Se aplica energía proveniente de una fuente de microondas o dieléctrica.

d) Secado por congelación. El agua contenida en el alimento se congela y luego se sublima, lo que normalmente se logra mediante la aplicación de calor en condiciones de muy baja presión.

e) Secado por ósmosis. Se aprovecha el efecto de la diferencia de concentración entre el agua del producto y una solución concentrada (de azúcar o de sal).

1.4. VENTAJAS DEL SECADO

Las principales ventajas del secado, comparado con otras técnicas de preservación tales como la refrigeración, la irradiación, los tratamientos químicos, el enlatado, etc., son el costo bajo y la sencillez.

El secado permite lograr economías en el manejo de los productos, al compirar con el caso de los productos frescos, por las tres siguientes causas: se disminuye el peso que hay que transportar por unidad de potencia alimenticia; se reduce el espacio necesario para almacenamiento; y, es posible almacenar el producto durante más tiempo.

Además, en el caso de los productos agrícolas, el uso del secado artificial (o bien, el secado solar modificado) tiene varias ventajas:

a) permite que la cosecha se haga más rápidamente que cuando el producto permanece secándose en la misma planta, con la consiguiente reducción de pérdidas causadas por insectos, pájaros, roedores y condiciones adversas del clima.

b) se puede hacer un mejor planeamiento de la cosecha, l que permite aprovechar mejor la mano de obra.

c) permite al productor ofrecer un producto de mejor calidad.

d) se puede lograr economías en los costos de transporte y manejo, ya que se elimina parte del peso (que corresponde al agua extraída). Esta reducción del peso representa una reducción de los gastos en energía y en mano de obra en algunas de las etapas de comercialización (traslado del producto desde el lugar en que fue cosechado, hasta los puntos de venta).

1.5. SISTEMAS ACTUALMENTE USADOS EN CENTROAMERICA.

En las regiones rurales de centroamérica y en algunas industrias pequeñas, pero no en las industrias altamente tecnificadas, se usan principalmente tres técnicas de secado, con base en aire caliente.

a) Secado solar tradicional o secado natural. Se aplica luego de que el producto ha alcanzado su madurez fisiológica. Para ello, se deja expuesto a las corrientes naturales de aire y a los rayos solares, ya sea en la misma planta o, luego de la cosecha, esparcido en superficies planas de concreto, ladrillo, tierra o esteras. La energía para este proceso procede completamente de fuentes naturales: la entalpía del aire y los rayos del sol.

Por un lado, este sistema tiene la desventaja de que los cultivos quedan expuestos también a rehidratación por las lluvias, a arrastre por el viento, y a ataques de insectos, hongos, pájaros. Por otro, no siempre se logra un secado uniforme.

A pesar de la naturaleza rudimentaria del proceso, en la mayoría de los países en vías de desarrollo, el secado tradicional es el único medio económicamente viable para secar muchos productos agrícolas.

Tanto el volumen de material que es posible secar, como el tiempo de secado y la calidad del producto seco final, dependen completamente de las condiciones del clima (humedad relativa del ambiente, lluvias, insolación, temperatura). Estas condiciones varían de lugar en lugar y de tiempo en tiempo, por lo que los resultados son imprevisibles y existen altos riesgos de que se pierda o tilde el producto que se desea secar.

b) Secado artificial. Se usa un secador mecánico en el que circula una corriente de aire forzada por un ventilador. Por regla general, el aire se calienta previamente (60° - 200°), mediante una fuente convencional de energía

(combustibles derivados del petróleo, leña o resistencia eléctrica). El producto se hace pasar dentro del secador mediante transportadores, y así es secado por la corriente de aire.

Según sea el tipo de transportador, la circulación del producto en el interior del secador puede ser en flujo cruzado, en el sentido de la corriente de aire o bien, en contracorriente.

Existen también secadores en los que el producto húmedo se coloca en lechos estacionarios y se hace pasar por ellos una corriente de aire forzado.

Todos estos secadores, por las características de su diseño, se usan para secar grandes cantidades de material en un corto tiempo.

c) Secado solar modificado. Consiste en aprovechar de manera más eficiente la radiación solar y las corrientes de aire. Se usan colectores de energía solar, cuya función es captar la energía de la luz del sol y transferirla al aire, en forma de calor. El aire así calentado se hace pasar por el producto húmedo que se desea secar (granos, frutas, hortalizas, carnes, maderas, plantas, ropa, etc).

Cuando el aire se calienta, su humedad relativa disminuye, y así resulta más eficaz para el secado. La humedad relativa del aire depende de su temperatura, y del contenido total de agua que tenga. La variación de la humedad relativa del aire, como consecuencia del cambio de su temperatura, se muestra en el cuadro siguiente.

CUADRO No. 1.1

Reducción de la humedad relativa del aire, como consecuencia del aumento de la temperatura.

Temperatura inicial del aire (°C)	Aumento de temperatura (°C) 00	06	11	17	22	28	33	39	45	50	55	61
	Humedad relativa (%)											
43	95	72	55	42	33	26	21					
38	95	71	53	40	31	24	19	15				
32	95	70	52	40	30	23	18	14	12			
27	95	70	50	38	29	22	17	13	10	08		
21	95	69	49	36	27	21	16	12	09	07	06	
15	95	67	49	36	26	19	14	11	09	07	05	04
10	95	66	47	32	24	18	13	10	08	06	04	04
04	95	64	45	31	22	16	12	09	07	05	04	04

1.6. OTRAS TECNICAS DE SECADO. TECNICAS ESPECIALES.

Para productos de difícil manejo se han desarrollado muchas técnicas especiales; en la aplicación de casi todas ellas se usan aparatos que son comunes en la industria, pero con algunas modificaciones. Tres ejemplos de estas técnicas son:

a) Secado por asperación ("spray-drying") Es una especie de secado al vacío, usado para tratar productos sensibles al calor, tales como los jugos concentrados de frutas. Por lo general, la operación se lleva a cabo en secadores de cámara en la que se hace un vacío de tal forma que, cuando se introduce el producto en forma de rocío, los líquidos que contiene se vaporizan. Como resultado, el sólido adquiere una estructura "porosa" y se logra un secado relativamente rápido que da productos de buena calidad y de fácil reconstitución.

b) Secado por formación de espuma (foam-mat) Se ha aplicado, experimentalmente, a jugos de frutas, papillas de papa y alimentos para niños. Esta es otra técnica con la que se logra formar una estructura "porosa". El producto líquido que se desea secar se mezcla con una pequeña cantidad de un agente espumante comestible y, luego, se inyecta aire o gas inerte dentro del líquido obtenido.

A continuación, la espuma que se forma se esparce sobre una cinta continua que pasa a través de un secador con aire caliente. Normalmente se usa un túnel en el que circula aire en contracorriente. Se logra un secado rápido y un producto de buena calidad.

c) Deshidratación y congelación. Se ha usado principalmente para frutas y hortalizas. Como paso previo, es necesario provocar un secado parcial del producto por medio de aire caliente hasta alcanzar una humedad menor del 50 por ciento en términos del peso fresco original. Luego se congela el producto, ya parcialmente seco, y a continuación se almacena en este último estado.

Este método tiene la ventaja de disminuir la masa y provocar una deshidratación parcial. La principal desventaja, es que resulta difícil lograr un contenido de humedad uniforme en la primera etapa; por eso, se prefiere usar secadores que movilizan los sólidos durante la etapa de secado, tales como los túneles de flujo cruzado, los secadores rotatorios y los secadores de lecho fluidizado o neumático.

2. PRINCIPIOS BASICOS DEL SECADO

2.1. EQUILIBRIO VAPOR-LIQUIDO. SISTEMA AIRE-AGUA

Humedad, temperaturas de bulbo seco y de bulbo húmedo.

Hay varias formas de expresar la cantidad de agua (o "humedad") que tiene un sólido. En cualquier caso, es necesario conocer ciertas condiciones que determinan el equilibrio entre el contenido de agua en el sólido, y el contenido de vapor de agua en el aire circundante. De la relación de equilibrio entre estos valores con la temperatura, depende en última instancia el "contenido de humedad" del sólido (en nuestro caso, de los granos).

Existe una relación definida de equilibrio en un sistema aire-agua, la cual se representa por medio de una "gráfica psicrométrica" (ver Figura 2.1, que corresponde a una gráfica para una presión de una atmósfera). Para poder usar una gráfica de este tipo, es necesario definir previamente algunos términos.

Temperatura de bulbo seco.	Es la temperatura leída en un termómetro corriente de bulbo, colocado en una mezcla de aire y vapor de agua (T_g).
Temperatura de bulbo húmedo.	Es la temperatura leída cuando el bulbo del termómetro se le coloca una gasa húmeda; la evaporación del agua produce un descenso de temperatura respecto a la temperatura del bulbo seco. Esta temperatura se denomina de bulbo húmedo (T_w).
Humedad absoluta.	Peso del agua (kg) por cada kilogramo de aire seco
Humedad relativa.	Cociente (expresado en porcentaje) entre la presión parcial del vapor de agua en el aire

considerado, y la presión de vapor del agua pura a la misma temperatura que tiene el aire. Esta forma de expresar la humedad da una idea de la cantidad de vapor de agua que contiene una mezcla de aire y vapor de agua, comparada con la cantidad que tendría si esa mezcla estuviera totalmente saturada (a las mismas temperatura y presión).

Para establecer la humedad de una mezcla de aire y vapor de agua, mediante la gráfica psicrométrica ilustrada, es necesario conocer las temperaturas de bulbo seco (Tg) y de bulbo húmedo (Tw) del aire considerado. Luego, se señala en el eje de abscisas el valor de Tw y se recorre una vertical a partir de este valor, hasta intersectar la curva del 100 por ciento de humedad o saturación, en un punto K; a partir de este punto K, se recorre una paralela a las líneas de saturación adiabática, hasta la intersección con una vertical que pase por Tg en las abscisas.

Este último punto, que llamaremos P, queda sobre una curva de humedad relativa (o entre dos de ellas) y sobre ésta se lee el porcentaje correspondiente; para obtener el valor de humedad absoluta, a partir del punto P se recorre una paralela al eje de abscisas, hasta cortar la línea de la extrema derecha de la gráfica, y en el punto de corte se lee la humedad absoluta del aire considerado, Y-1. En el punto de intersección, P, se puede interpolar un valor de la humedad relativa, también. Con la información obtenida se determina entonces la humedad del aire, que servirá posteriormente para estimar la humedad de equilibrio de los granos que se han de secar con dicho aire.

La gráfica psicrométrica ilustrada corresponde al caso de una presión de una atmósfera; cuando la presión no tenga este valor, debe usarse otra gráfica, o bien modificar los resultados obtenidos con aquélla, según las indicaciones apropiadas.

Como ejemplo, en un secador solar se tiene aire ambiente a 21°C (70°F), temperatura de bulbo seco Tg_1, y a 16 °C (61°F), temperatura de bulbo húmedo Tw. La localidad se encuentra situada al nivel del mar, por lo que puede usarse la gráfica psicrométrica ilustrada.

Con los valores de temperatura que se tienen, la gráfica indica que el aire tiene una humedad relativa del 65 por ciento y una humedad absoluta de 0.01 kg de agua por kg de aire seco. El valor de la humedad absoluta revela que el aire considerado, si llegara a condiciones de saturación completa, llegaría a contener hasta 0.016 kg de agua por cada kg de aire seco, lo que significa que aún podría absorber más agua, el equivalente a 0.016 - 0.01 = 0.006 kg de agua por cada kilogramo de aire seco.

La rapidez de secado, en kilogramos de agua evaporada por metro cuadrado y por hora, puede definirse mediante la ecuación:

$$N = \frac{(-Ls)}{A} \cdot \frac{dx}{dt} \quad \frac{\text{kg agua evaporada}}{m^2\ (h)} \qquad \text{Ecuación 2.1}$$

Ls = peso seco de sólidos (kg)
A = área expuesta al aire secante (m^2)
X = humedad del material (kg agua/kg sólido seco)
t = tiempo (horas)

Si se conoce el descenso de humedad en función del tiempo (Fig. 2.2), puede evaluarse la derivada dx/dt, ya sea gráficamente en la figura, bien mediante cálculo de diferencias $\Delta x/\Delta t$, o por métodos numéricos.

Al hacer una gráfica de rapidez de secado N en función de la humedad, se obtiene la curva que muestra la Figura 2.3, en la cual se indican mediante letras los mismos intervalos de tiempo que ya se describieron para la Figura 2.2. Existe un valor de humedad, llamado "humedad crítica" (xc), a partir del cual la rapidez de secado pasa de un valor constante, Nc, a valores decrecientes.

El tiempo de secado puede ser calculado, en general, así:

$$t = \frac{Ls}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dx}{N} \qquad \text{Ecuación 2.2}$$

En esta expresión, X1 y X2 son la humedad inicial y la humedad final que corresponden al intervalo de tiempo para el que se hace el cálculo. Para el intervalo de secado a rapidez constante, el tiempo de secado está dado por:

$$\frac{Ls\ (X2 - X1)}{A\ Nc} \qquad \text{Ecuación 2.3}$$

En el intervalo de rapidez decreciente de secado, para el caso general, se puede usar la ecuación 2.2 si se conoce la rapidez de secado. En un caso particular, en el que la curva de secado es lineal, o sea:

$$N = mx + b \qquad \text{Ecuación 2.4.}$$

Si este aire se calentara (Tg_2) a 35°C (95°F) (bulbo seco) en un colector solar, tendría la misma humedad absoluta (0.01 kg agua/kg aire seco), pero una humedad relativa menor (27 %, punto 5); esto representa que el aire, en estas nuevas condiciones, tendría capacidad de absorber humedad hasta un valor de saturación de 0.037 kg agua/kg aire seco, es decir, un aumento de 0.037 - 0.01 = 0.027 kg agua/kg aire seco, o sea 4.5 más que el mismo aire a 21°C (Tg).

Si este mismo aire se hace pasar por una cámara de secado, ahí sufre un enfriamiento de tipo adiabático; si, por ejemplo, a la salida las condiciones son Tg = 26.6 °C (80°F) y Tw = 21°C (70°F), el aire contendrá al salir una humedad absoluta de 0.014-0.01 = 0.004 kg agua/ kg aire seco, y en esa misma cantidad se ha reducido la humedad del grano en el secador, por unidad de masa de aire que fluye a través del mismo.

Lo que produce el efecto de secado es la capacidad del aire, cuando no está totalmente saturado, de absorber humedad adicional del ambiente circundante; en el caso del secado de granos, el aire absorbe el agua contenida en ellos, con lo que los seca y aumenta su propia humedad.

2.2. CURVAS DE SECADO

Para poder establecer las dimensiones del equipo necesario para secar un volumen dado de material, se requiere conocer el tiempo que se necesita para que ese material se seque hasta alcanzar una humedad estipulada. Además, se necesita conocer la influencia que sobre el secado tienen las distintas variables de operación, tales como la temperatura, el flujo de aire, etc.

La rapidez de secado de un material se puede estimar mediante el ensayo con una muestra que se suspende dentro de una cámara de secado y que es sometida a una corriente de aire. Si se registra el peso de la muestra en diferentes instantes durante el proceso, puede calcularse su humedad en cada uno de ellos y dibujarse una gráfica de tales valores, en función del tiempo.

En la Figura 2.2 se indica la forma típica de una curva de secado de una muestra, en la cual se distinguen tres etapas:

A-A´-B	Corresponde a un ajuste de temperatura y de humedad del material a las condiciones del secado.
B-C	Representa un período de rapidez constante de secado durante el cual se evapora uniformemente la humedad superficial del material.
C-D-E	Corresponde a un período de secado decreciente, durante el cual la humedad que el material tiene en su interior fluye hacia la superficie, para luego evaporarse.

se tiene que

$$t = \frac{Ls}{\Omega A} \ln \left(\frac{m X_1 + b}{m X_2 + b} \right)$$ Ecuación 2.5

En estas ecuaciones, m y b son constantes.

Por regla general, las curvas de secado de granos tienen la forma característica del intervalo de rapidez decreciente de secado y, por eso, está muy extendida la costumbre de usar algunos modelos logarítmicos. Esto es debido a que en la mayoría de los casos, si se hacen las gráficas con datos de humedad en forma adimensional, tal como

$$\frac{X - X^*}{X_1 - X^*}$$

X^* = humedad de equilibrio correspondiente a las condiciones ambientales a que se encuentra

X = humedad del grano en el tiempo t

X_1 = contenido inicial de humedad del grano

es posible obtener el tipo de curva mostrado en la Fig. 2.2, y con la cual puede obtenerse el tiempo de secado usando la siguiente expresión:

$$\ln \left(\frac{X - X^*}{X_1 - X^*} \right) = \frac{- Mc.t}{q_s Z_s (X_c - X^*)}$$ Ecuación 2.6

q_s = presión de vapor de saturación

Z_s = espesor de la capa del material que se seca

2.3. HUMEDAD DE EQUILIBRIO

La humedad contenida en un sólido húmedo o en una solución líquida, ejerce una presión de vapor. La intensidad de esta presión depende

de la temperatura, la naturaleza del sólido, y, principalmente, de la naturaleza de la humedad (agua libre, agua combinada).

Si el sólido húmedo se expone a una corriente continua de aire fresco con contenido de humedad constante, el sólido perderá agua por evaporación, hasta alcanzar un estado en que el contenido de humedad produce una presión parcial igual a la presión parcial que ejerce el agua en el aire; con esto se alcanza un estado de equilibrio en la transferencia de masa y, por lo tanto, el sólido ya no pierde humedad.

Si se cambian las condiciones del aire de secado, también cambiará automáticamente el contenido de la humedad de equilibrio (X^*) y, por consiguiente, el valor de la humedad del grano (X).

La humedad de equilibrio se obtiene experimentalmente, y se presenta en forma gráfica como una función de la humedad relativa del aire, si se tiene como parámetro la temperatura. En la Figura 2.4 se muestran unas curvas típicas de humedad de equilibrio; tal como lo indican esas gráficas, se involucran datos experimentales junto con valores calculados. Para calcular los valores no experimentales, se usan algunos modelos matemáticos, tales como la ecuación de Henderson-Thompson (ecuación 2.7) y el modelo propuesto por Chung Pfost (ecuación 2.8):

$$1 - Rh = \exp(- a_1 (t + a_2)(Meq)^{a_3}) \qquad \text{Ecuación 2.7}$$

$$\ln Rh = \frac{-a_4}{Ro\ (t+a_2)} \exp(-a_3\ Meq) \qquad \text{Ecuación 2.8}$$

Rh = humedad relativa del aire (fracción)
a1,a2, a3, a4, a5 = constantes de las ecuaciones.
t = temperatura de bulbo seco del aire (°C)
Meq = humedad de equilibrio del grano (% base seca)
Ro = constante universal del los gases

Existe otro modelo, propuesto por Roa, el cual tiene la forma:

$$Meq = (P_1\ Rh + P_2(Rh)^2 + P_3(Rh)^3).W$$

$$W = \exp((qo+q_1Rh+q_2(Rh)^2+q_3(Rh)^3+q_4(Rh)^4).(t + q_5))$$

Ecuación 2.9

y en el cual se tiene que P1, P2, P3, qC, q1, q2, q3, q4, q5 son constantes de la ecuación.

El error máximo relativo es de 1.25 % para el modelo de Henderson-Thompson, y de 0.70 % para el modelo de Roa.

2.4. CALOR LATENTE DE VAPORIZACION DEL AGUA CONTENIDA EN LOS GRANOS

El calor latente es la energía requerida para que se realice un cambio de fase. En el caso del secado, se emplea el calor latente de vaporización **hfg** (k cal/kg agua evaporada), como una medida de la cantidad de energía que es necesaria para secar un determinado material: esta medida permite dimensionar la fuente de dicha energía (colectores solares, quemadores de petróleo, etc).

Como el agua se encuentra en el material tanto libre como combinada, se han desarrollado modelos matemáticos que permiten calcular el calor latente de vaporización del agua presente en los granos. Uno de ellos está expresado por la ecuación siguiente:

$$L = (606-0.570t)(1 + 4.35 \exp(-28.25 M)) \quad \text{Ecuación 2.10}$$

M = humedad del material, base seca (fracción)
t = temperatura (°C) del producto

Otro modelo es el de Othmer, que tiene la siguiente forma:

$$\frac{\ln Pv}{\ln Pvs} = \frac{hfg^*}{hfg} + q \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Pv = presión de vapor (Pa)
Pvs = presión vapor saturado, igual temp. que Pv (Pa)
hfg = calor latente de vaporización agua libre (kJ/kg)
hfg* = calor latente de vaporización agua absorvida en grano (kJ/kg)
q = constante característica del grano y dependiente de su temperatura

Al comparar los calores de vaporización hfg con hfg*, se pone de manifiesto que cuando la humedad de los granos en base seca es baja, el hfg* es mayor; es decir, que, con contenidos bajos de humedad, se requiere más energía para vaporizar agua de un grano, que la energía correspondiente al agua libre.

En el cuadro 2.1 se da un valor característico para maíz con un 15 por ciento de humedad en base seca, y una temperatura de 38°C (100°F); se tienen los valores hfg^{*}= 2 923 J/g y hfg = 2 410 J/g, lo que representa 21.3 por ciento más para el primero, comparado con el segundo.

CUADRO 2.1

Calor de vaporización (J/kg) del maíz con 15 por ciento de humedad y a una temperatura de 38 °C.

MAIZ------ 2 928 322

AGUA------ 2 413 887

2.5. MODELOS MATEMATICOS DE SECADO

En vista de que resulta muy problemático realizar experimentación directa para obtener curvas de secado variando todas la condiciones de operación de un secador, existe una técnica llamada "de simulación", que puede usarse. Esta técnica consiste en el uso de un modelo matemático que permite predecir, con cierto grado de precisión, las condiciones del secado de un material dado.

Uno de los modelos más usados, es el logarítmico, el cual puede usarse para predecir la duración promedio de secado y el contenido promedio de humedad en una capa profunda de granos. Este modelo es así:

$$\overline{MR} = \frac{1}{D} \ln \left(\frac{e^{D} + e^{\theta} - 1}{e^{\theta}} \right) \qquad \text{Ecuación 2.12}$$

$$\overline{MR} = \frac{M - Meq}{Mo - Meq} \; ; \quad D = \left[\frac{Kd\ L(\ Mo - Me\ )}{Q\ Ca(\ to - te\ )} \right] . Y \; ; \quad \theta = Kt$$

θ = adimensional
Y = altura capa de granos (m)
K = constante de secado (horas^{-1}) : $bp^{m}s$
m = 0.6 a 0.83
b = 6.272 (m-seg)/g
Ps = presión de vapor de saturación
d = densidad aparente del grano
L = calor latente de vaporización del agua
M = humedad del grano
Q = masa de aire que circula, por unidad de tiempo
to = temperatura promedio aire entra secador (°C)
te = temp. promedio aire sale secador en equilibrio con el grano (°C)

Existen otros modelos matemáticos, unos derivados teóricamente con base en las ecuaciones de balance de masa y energía, y otros, de tipo empírico. La elección del modelo depende del error a que dé lugar al compararlo con datos experimentales.

El modelo logarítmico puede mejorarse si se incluye el efecto de la velocidad del aire de secado, así:

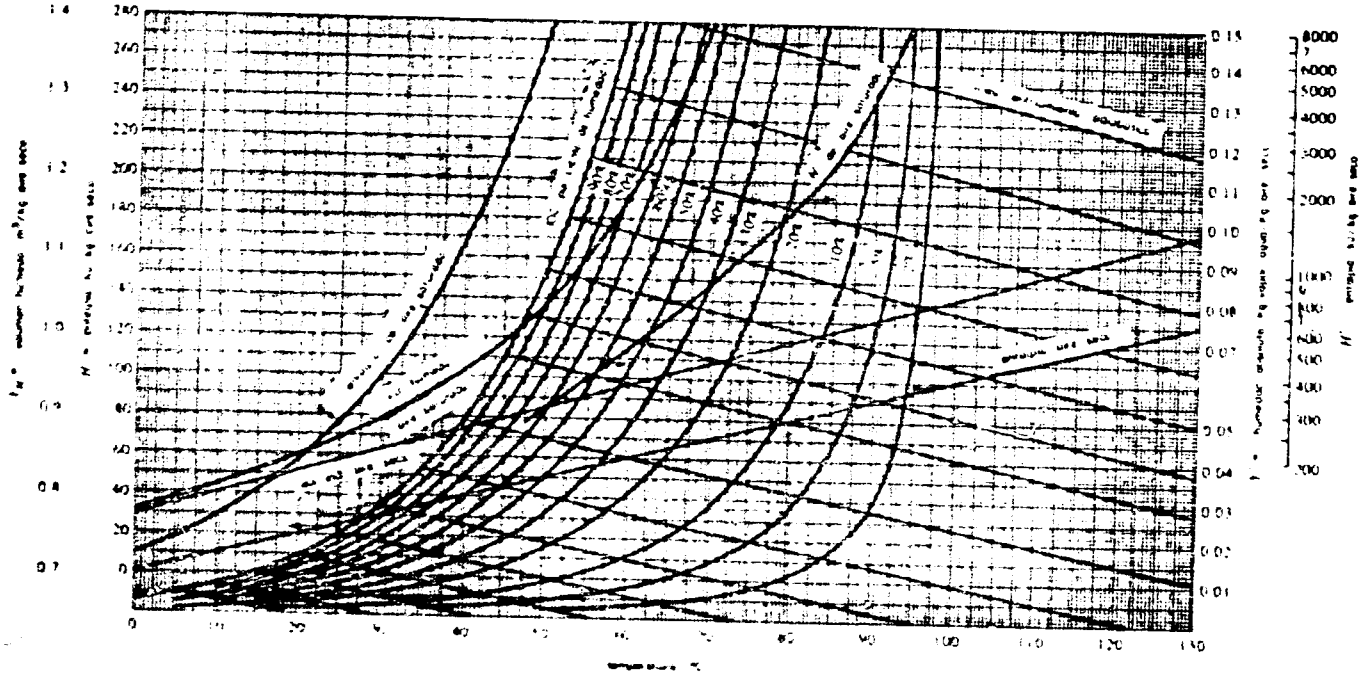
$$K = b(Ps)^{m}.V^{n} \qquad \text{Ecuación 2.13}$$

v = velocidad superficial del aire (m/s)
m, n = constantes
b = constante (M-sg)/g
K = adimensional
P_s^m = Presión de saturación del aire, g/m^2

En la Figura 2.5, se muestra la precisión lograda con valores simulados, al variarlos entre 0 y 0.80. Resulta notorio que para n = 0.80, la precisión es mayor.

Cuando se usa simulación para el secado de maíz desgranado, se ha encontrado que el intervalo de discrepancia entre los valores experimentales y los valores obtenidos con el modelo logarítmico, es de -33 a 31 %, según diferentes condiciones de secado.

***

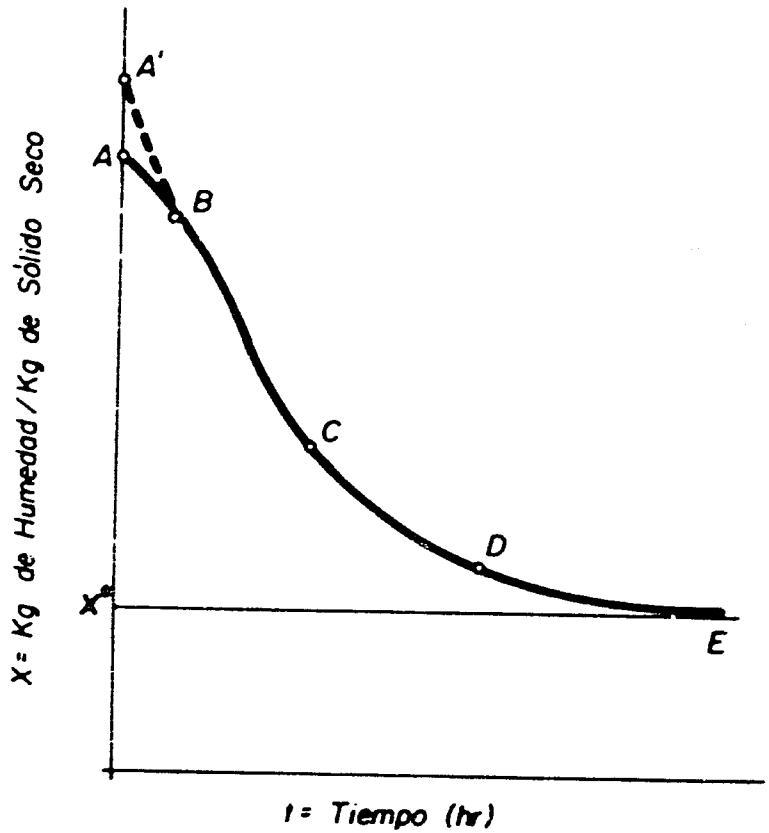


GRAFICA PSICROMETRICA

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

FIGURA 2.1



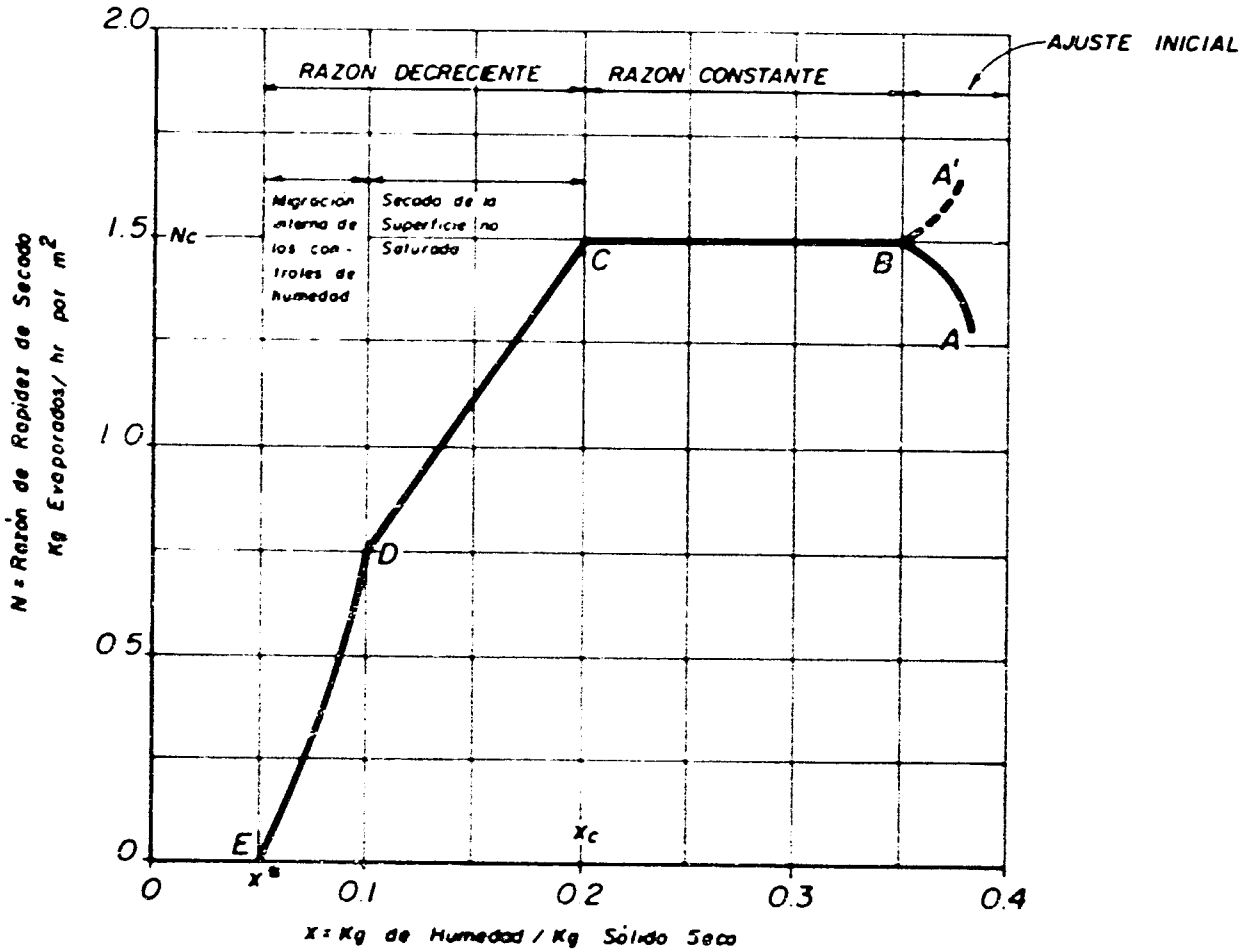
TASA DE SECADO Vrs. TIEMPO

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

FIGURA 2.2

1980



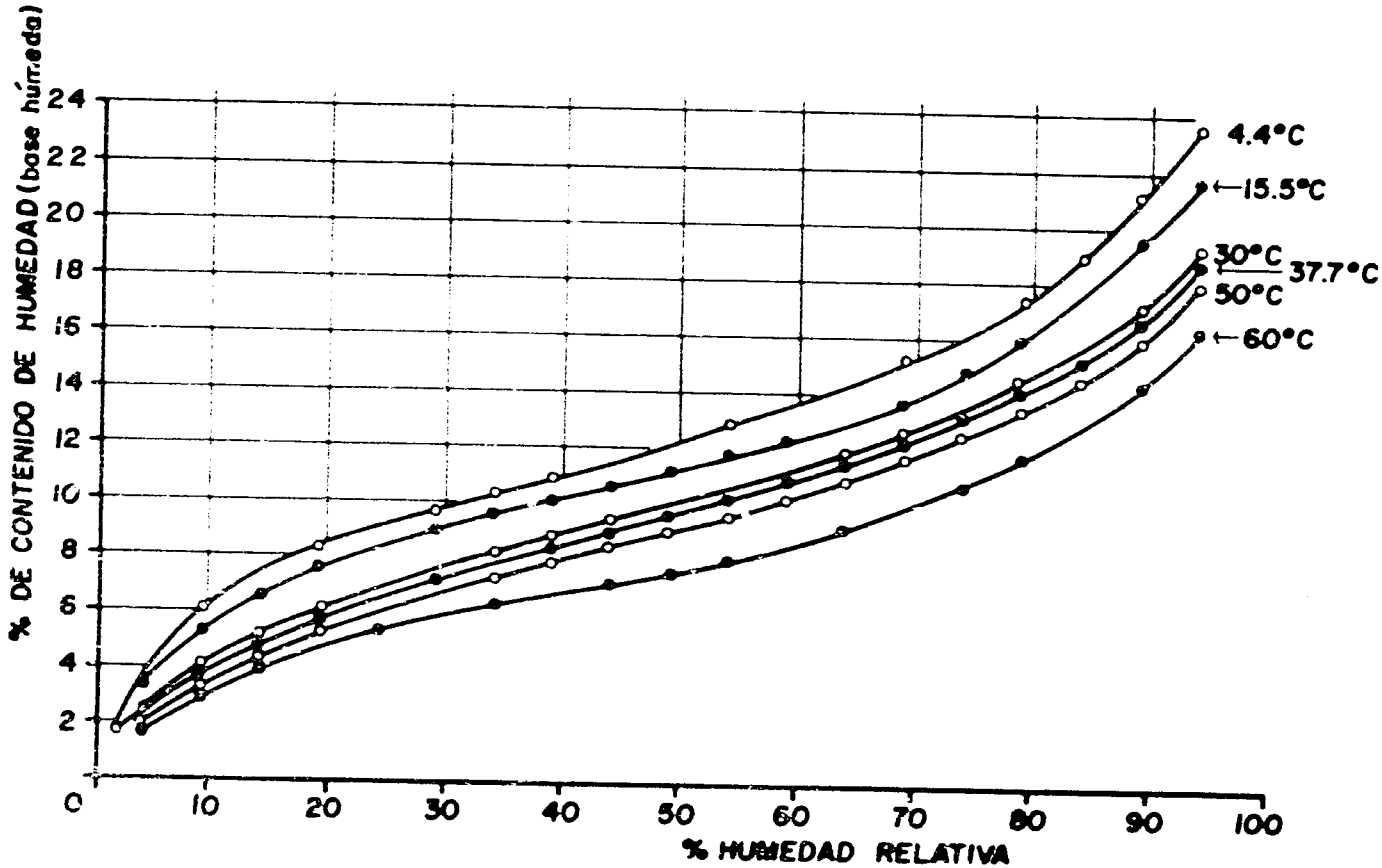
CURVA DE RAPIDEZ DE SECADO

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

FIGURA 2.3

1980



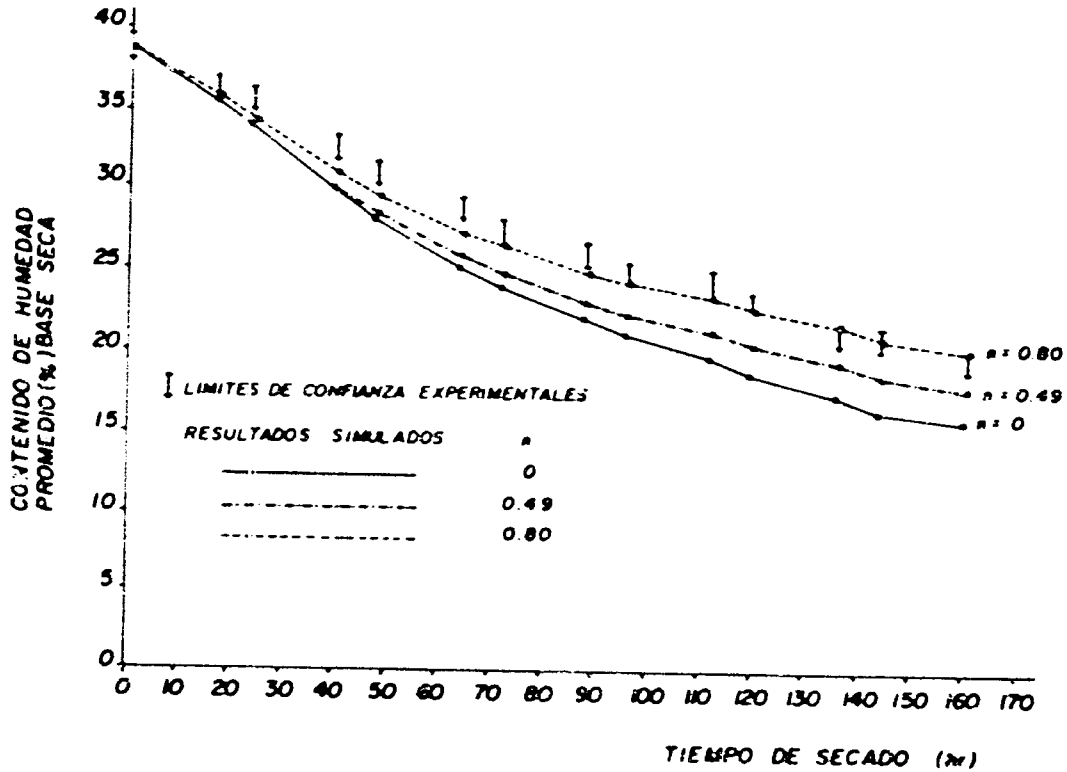
CURVAS DE CONTENIDO DE HUMEDAD
DE EQUILIBRIO PARA MAIZ EN GRANO
obtenidas con base en los datos exp. y calculadas
mediante un modelo matemático

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

FIGURA 2.4

1983



SIMULACION DEL EFECTO DE LA VELOCIDAD EN EL CONTENIDO DE HUMEDAD PROMEDIO DURANTE EL SECADO NATURAL

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

FIGURA 2.5

1980

3. ALMACENAMIENTO DE GRANOS

3.1. AGENTES QUE AFECTAN LA CONSERVACION DE GRANOS ALMACENADOS.

3.1.1. Calidad de los granos.

Los granos almacenados están sujetos a la acción de agentes físicos, químicos y biológicos, todos interrelacionados, que contribuyen a su deterioro. El objetivo principal de usar técnicas especiales de almacenamiento, es conservar la calidad original de los granos mediante la máxima reducción de los cambios que puedan sufrir.

La calidad de cada lote de granos depende de la variedad de grano que se trate, de las técnicas usadas en su cultivo, del período y el modo de recolección, del método de secado y de las condiciones en que se almacene.

Además, el concepto de "calidad" depende del uso a que se destinen; así, a un comerciante de granos le interesa un contenido de humedad bajo y uniforme, un escaso contenido de materias extrañas, limitada cantidad de granos quebrados, y en general, ausencia de otras características que hagan disminuir su aceptación; un productor de semillas buscará granos con alto poder germinativo y vigor; quien use los granos para alimentar animales, deseará granos con alto valor nutritivo, sin mohos; y, el industrial que procesa los granos requiere facilidad en la molienda, alto rendimiento de almidón, azúcares, aceites y otros derivados.

3.1.2. Condiciones del almacenamiento.

Cuando se trata del almacenamiento, además de las características citadas, se atiende a dos condiciones especiales: el contenido de humedad de los granos, y la temperatura dentro del almacén.

Debido a los procesos metabólicos que ocurren naturalmente en los granos, durante el almacenamiento la temperatura tiende a aumentar en el interior de la masa de granos. Esto tiene varias consecuencias desfavorables.

La mayoría de los hongos se desarrolla a temperaturas entre 4 y 49°C, aunque algunos pueden desarrollarse a temperaturas más bajas, y otros, soportan hasta 76 °C. Sin embargo, la mayoría de los hongos comunes en granos almacenados tiene su desarrollo óptimo con temperaturas de 20 a 35 °C.

Por otra parte, el desarrollo de los diversos hongos que proliferan en granos almacenados ocurre cuando el contenido de humedad de éstos excede del 13.5 por ciento; a temperaturas por debajo de los 10°C, algunos mohos se desarrollan bien, en tanto que otros lo hacen muy lentamente. Cerca de los 30 °C, si las condiciones de humedad lo permiten, ocurren serios daños. A 32°C, resultan ya evidentes el olor anormal, la decoloración de los gérmenes de las semillas, y un aumento pequeño de los ácidos grasos. A 43°C, el olor es fuerte, los granos tienden a adquirir un color marrón, hay un aumento rápido de ácidos grasos y una elevación del contenido de humedad. Los 57°C marcan el tope del aumento de temperatura; en estas condiciones se manifiestan oscurecimiento y elevada rancificación.

Resulta difícil lograr uniformidad en el contenido de humedad y una temperatura estable durante el almacenamiento. Dentro de un mismo lote de granos que se considere homogéneo, puede resultar que hay siempre diferencias, tanto de humedad como de temperatura. Además de eso, durante el mismo proceso de almacenamiento, ocurrirán variaciones de esas dos características, por varias causas: migración de la humedad, ataques de insectos, humedecimiento accidental y calentamiento de la masa de granos.

La gráfica No. 3.1 es el llamado Diagrama General de Conservación de Cereales, que se basa en resultados obtenidos por experimentación.

La región por arriba de la línea A, que corresponde en términos generales a temperaturas mayores de 18 °C, representa las condiciones favorables para el desarrollo de ataques de insectos. A la derecha y por arriba de la línea B, se tienen las condiciones de pérdida de poder germinativo, y a la derecha de la línea C, se presentan las condiciones propias para el deterioro de los granos.

Es de notar que la ordenada de la gráfica mide la temperatura de los granos almacenados, la cual se puede hallar mediante un termómetro introducido dentro de la masa que forman.

Para semillas almacenadas, ocurre que para un contenido de humedad del 5 por ciento, y a temperaturas por arriba de 47 °C, se inicia el proceso de pérdida de vitalidad germinal; y con un 10 por ciento de humedad, dicha pérdida se inicia a partir de los 4°C.

Es práctica común almacenar granos con 13 por ciento de humedad, aun a sabiendas de que la temperatura sea de 25°C, es decir en el límite crítico; según sea la duración del almacenamiento es posible que, aunque el proceso de deterioro ya se haya iniciado, no resulte perceptible.

Si las condiciones corresponden a puntos de la región por arriba de la línea A y por debajo de la línea B (la región en que no hay pérdidas de poder germinativo ni deterioro, pero sí posibilidad de desarrollo de insectos), es posible que el control de los insectos por medios convencionales resulte más económico que bajar la temperatura de la masa de granos y mantenerla fuera de esas condiciones (por debajo de 18°C).

El diagrama muestra que con los contenidos de humedad por debajo del 10 por ciento, se pueden permitir temperaturas más elevadas sin riesgo de deterioro, aunque esto no es válido para el caso de las semillas.

Al subir la temperatura, los insectos aumentan su actividad progresivamente hasta que la temperatura llega a 42°C; expuestos a esta temperatura por largo tiempo, mueren. A 15°C su desarrollo se retarda en forma notoria; y a 10°C o menos, pueden morir.

Teóricamente, cuanto más bajo sean el contenido de humedad y la temperatura, mejores serán las condiciones de almacenamiento. Por lo tanto, dependiendo del tipo de instalaciones y del local, el operador deberá examinar los costos, para establecer cuánto cuesta la reducción del contenido de humedad y cuánto, la reducción de temperatura; por ejemplo, en el caso de semillas, se puede optar entre almacenarlas con el 13 por ciento de humedad y conservar la temperatura por debajo de 22°C, o almacenar con 11 por ciento de humedad y mantener la temperatura por debajo de 30°C.

El equipo usado para medir la humedad debe ser confiable y debe usarse un termómetro o un sistema de termometría apropiado. Al medir las temperaturas de una masa de granos es necesario hacerlo en diversos puntos de la masa, y nunca deberá efectuarse ningún análisis con base en la temperatura media. Puede ocurrir que la temperatura que se desea hallar sea la de un foco de calentamiento dentro de la masa y que el sensor de temperatura, accidentalmente colocado a cierta distancia de aquél, indique una temperatura inferior a la real porque se interpone una capa de granos entre el foco y el sensor.

3.1.3. Período máximo aceptable de almacenamiento

La temperatura de los granos y su contenido de humedad determinan el período máximo aceptable (PMA), es decir, aquél durante el cual se puede almacenar los granos sin que sufran daño.

El Cuadro 3.1 contiene los valores del período máximo aceptable de almacenamiento para maíz en grano.

La información obtenida en el Cuadro 3.1 puede también presentarse en forma gráfica, tal como se muestra en la Figura 3.2.

CUADRO No. 3.1

Período máximo aceptable de almacenamiento para maíz en grano

Temperatura de los granos (°C)	Humedad del maíz (%) 18	20	22	24	26	28	30
-1.1	648	321	190	127	94	74	61
1.7	432	214	126	85	62	49	40
4.4	288	(142)	84	56	41	32	27
7.2	192	95	56	37	27	21	18
10.0	128	63	37	(25)	18	14	12
12.8	85	42	25	16	12	9	8
15.6	56	28	17	11	8	7	5
18.3	42	21	13	8	6	5	4
21.1	31	16	9	6	5	4	3
23.9	23	12	7	5	4	3	2
26.7	17	9	5	4	3	2	2

1.4. Normas de calidad establecidas por INDECA para la compra de granos básicos.

Frijol:	Precios de compra, $CA/qq	(Cosecha 1983-1984)
$CA 19.52	$CA 20.00	$CA 20.89

Tolerancia				Base				Bonificado			
H	I-Q	GD	C	H	I-Q	GD	C	H	I-Q	GD	C
18	2	10	3	16	2	10	3	14	0	10	3

H = Humedad del grano, %
I-Q = Grano con impurezas y quebrado
GD = Grano dañado
C = Grano con coloración

Estas normas prescriben que, en caso de duda se haga una prueba de cocción, y que si ésta no se produce en un 100 por ciento dentro de un intervalo de 90 minutos, no debe aceptarse los granos.

3.2 SISTEMAS DOMESTICOS DE ALMACENAMIENTO DE GRANOS

Como consecuencia de que en el mundo hay gran diversidad de climas, diferentes niveles de cultura de los grupos humanos y grandes variaciones de capacidad económica entre ellos, los métodos de almacenamiento de granos que se han desarrollado son muy numerosos y variados; según las materias primas de cada región o época, así son las características del sistema de almacenamiento usado.

Los granos que más comúnmente se cultivan y consumen en Centroamérica son el frijol y el maíz, aunque también se produce y consume el arroz. Los granos se almacenan por períodos de 6 meses a un año. La producción anual de granos lograda por una familia centroamericana, se distribuye así: una porción para vender; otra, para consumo de la misma familia; y, de ser posible, otra para resiembra (semilla).

En Guatemala existen varias formas tradicionales de almacenar el grano: en cántaros cerrados, en cilindros metálicos (de hojalata), en toneles, en cajas de madera revestidas con lámina de hojalata por dentro, en envases plásticos, etc. Periódicamente se saca el grano del recipiente y se asolea.

En ciertas regiones el maíz se deja en las mazorcas, y éstas se cuelgan por las hojas, de cuerdas que se tienen en ambientes cerrados tales como cocinas o habitaciones secas. En otras partes, en especial cuando el grano se destina a la resiembra, se coloca en recipientes cerrados, mezclado con arena de río o cenizas, materiales que impiden el desarrollo de ciertas plagas.

Tanto en Guatemala como en otros países de la región hay algunos métodos mejorados para almacenar los granos, tales como el uso de recipientes o silos de barro con paredes impermeabilizadas; para lograr la impermeabilización se pinta la cara interior del silo con pinturas apropiadas o se coloca, también en el interior, un revestimiento con película de plástico (Figuras. 3.3).

A veces se aplica a los granos un insecticida que no sea demasiado tóxico para el hombre o los animales que comerán el grano. También hay regiones en que se aplican fungistáticos a los granos. Hay quienes aplican cal para que se reduzca la humedad en el sitio de almacenamiento.

La recomendación general más importante es que se almacenen granos que estén lo más secos posible y que se haga en un ambiente seco y fresco. Es recomendable que los granos, de vez en cuando, se saquen y se ventilen y asoleen, para librarlos de ciertas plagas de insectos y hongos. Los recipientes deben estar secos y limpios de basuras y de restos de los granos anteriormente almacenados; es

necesario que en el recipiente que se use no sea posible que entren insectos ni roedores.

Se considera de tipo "doméstico" o "familiar" a todo almacenamiento de granos que no exceda de 4 500 kilogramos, porque no requiere silos especiales. Existen, sin embargo, almacenamientos "de mediana escala" y "de gran escala".

3.3 ALMACENAMIENTO DE MEDIANA ESCALA

Se puede decir que los granos, por regla general, se manejan en dos formas: en sacos y a granel. Cada forma tiene ventajas e inconvenientes pero resulta recomendable el uso de sacos en aquellas zonas en las que se tienen las siguientes condiciones:

a) Hay pocas carreteras y limitación en el servicio de transporte.

b) Se manejan diversos granos

c) Los tiempos de entrega son cortos y los volúmenes son pequeños.

d) El período de almacenamiento es reducido.

Esta forma es muy económica y se adapta a muchos diferentes tipos de granos, pero tiene varios inconvenientes: el manejo es lento, ocurren muchos derrames, no se presta para una mecanización adecuada y existe facilidad de que el grano sea atacado por roedores y plagas (Fig. 3.4).

El manejo a granel se recomienda en los casos siguientes:

a) Cuando no son muchos los tipos de granos diferentes que hay que almacenar.

b) Se dispone de suficiente energía para manejar mecánicamente los granos.

c) El período de almacenamiento es largo

d) Existen buenas vías de acceso y sistemas de transporte.

e) Se dispone de materiales de construcción a costo razonable.

El almacenamiento a granel tiene varias ventajas; es fácilmente mecanizable y, por lo tanto, el manejo del grano es rápido; ocurren pocos derrames del producto; y el riesgo de ataque por roedores es muy reducido. En cambio tiene los siguientes inconvenientes: re-

sulta poco adaptable ya que los silos o graneros que se requieren son fijos y se construyen para un tipo específico de grano; se requiere una inversión inicial alta; y se necesita incurrir en algunos gastos de operación (de secado, aireación, etc).

Cuando la cantidad de grano que hay que almacenar es de 4 500 o más kilogramos, sin exceder de 90 000, se usan sistemas de almacenamiento de mediana escala. Existen tres tipos de estos sistemas: en sacos, en graneros y en silos.

La estructura de la instalación que se escoja para el almacenamiento varía según las siguientes condiciones: cantidad de grano que se desea almacenar, variedad de grano, tipo de manejo (en saco o a granel), el grado de limpieza, el grado de desecación, la existencia de diferentes tipos de granos que hay que almacenar, los tratamientos que se apliquen, la disponibilidad de energía, los materiales de construcción de que se disponga, la duración del almacenamiento, el valor del producto que se requiera almacenar, y la capacidad económica que se tiene para instalar el depósito o silo. (Figuras 3.5 y 3.6).

Los sacos llenos de grano pueden a su vez guardarse en pequeños locales, casetas o cobertizos, construidos de metal, concreto, ladrillo, madera, barro, etc.

Los silos se fabrican generalmente de láminas o estructuras metálicas, de hormigón o de madera. Los silos metálicos son baratos pero se recomiendan sólo en regiones secas en que la temperatura sufre pocos cambios. La forma básica de un silo es el cilindro vertical con un diámetro equivalente al 60 % de su altura (Figs. 3.7 y 3.8).

Para silos pequeños (con capacidad de 4 500 a 90 000 kilogramos) es necesario elegir cuidadosamente el material que se utilizará en la construcción según el clima de la localidad, la disponibilidad de materiales y los tipos de plagas propios del lugar.

3.4 SISTEMAS MASIVOS O DE GRAN ESCALA.

Cuando el total de material que es necesario almacenar excede los 90 000 kilogramos se usan sistemas grandes, típicos de los centros de acopio que casi siempre están bajo control del Estado.

Estos centros de acopio en gran escala son claves en la economía y alimentación de un país o de una región, por lo que es recomendable distribuirlos en forma estratégica: en las zonas productoras de grano, en los puntos de gran consumo (ciudades) y en los puntos de comercialización internacional (puertos).

Los grandes centros de acopio deben estar conectados con los centros de consumo y exportación por buenas vías y servicios y de transporte pesado; es necesario también que haya vías de comunicación alternas. Es conveniente que estos centros de acopio mayor

estén situados cerca de, y con fácil acceso a otros centros menores de acopio.

Los sistemas más generalmente usados para almacenamiento masivo son:

1. A granel, a la intemperie, sobre suelo o sobre estructuras móviles

2. A granel, en silos sobre el nivel del suelo (Fig. 3.7).

3. A granel, en silos o recipientes parcial o totalmente enterrados (Figs. 3.9, 3.10 y 3.11).

4. En sacos cubiertos con lonas o plásticos (sin estructuras fijas)

5. En sacos, bajo techo permanente (bodegas) (Fig. 3.6)

Los métodos 1, 4 y 5 son comunes en los centros de acopio mediano rural. Los métodos 2, 3 y 5 se usan principalmente en centros de consumo urbano, en tanto el 2 y el 5 son comunes en instalaciones portuarias. El método 5 quizás sea el más corriente, pero el 2 y el 3 son los de mayor futuro.

Como es lógico, cada método implica una serie de detalles de dimensionamiento, operación, disposición, control y costo, pero por el alcance de este manual no se cubrirán aquí con mucho detalle.

El método 1 es el más barato, el más inseguro y resulta propio de países muy pobres como la India y el Africa seca (Sahel-Sudan, etc.).

El método 2 es el más usual en países desarrollados o en vías de desarrollo (América latina, Sudáfrica, Australia, medio oriente); requiere instalaciones versátiles y muy completas; los costos promedio son de 10 $CA/Tonelada instalada. En general los sistemas de silos operan a escala muy grande (200-100 000 Toneladas/hora), trabajan con 2 ó 3 tipos diferentes de granos, con regímenes estacionales o anuales. Los sistemas de compra, control y venta son muy completos en las instalaciones de este tipo (Figs. 3.12 y 3.13).

Hay silos de madera (los más pequeños y de menos costo, 10 $CA/Tonelada instalada); hay de metal y de hormigón. Estos últimos por ser los de mayor capacidad, tienen características muy tecnificadas, son los más seguros y versátiles; su costo es del orden de 30 a 70 $CA/Tonelada instalada.

En el método 3, se usan recipientes de alta resistencia, gran hermeticidad y bajo costo. No resultan muy caros, ya que el suelo ofrece apoyo estructural y buen aislamiento térmico. Son utilizados en almacenamientos de volúmenes grandes (100 000 Tonelada), por tandas.

El grano se carga en el recipiente de una sola vez, y no se retira ni carga sino al principio o al fin del ciclo de almacenamiento. El silo ya cargado, se cierra y se ventila. Es usual en Chipre, Medio Oriente y Africa; en América latina su uso se está generalizando; el costo es del orden de 15 $CA/Tonelada.

El método 4, se usa para volúmenes intermedios (2 000-5 000 Tonelada); es muy barato (2 a 5 $CA/Tonelada), pero no es muy seguro, así que se usa en aquellos casos en que el grano no va a estar mucho tiempo en depósito (menos de 4 meses), y el clima no es adverso para el grano. Se requiere colocar los sacos sobre un material impermeable y cubrirlos con lonas o plásticos. Se le usa en centros de acopio sub-regionales, si las condiciones del clima lo permiten.

El método 5, es muy usual en los puertos, requiere el uso de bodegas, cobertizos, hangares, estructuras grandes y elevadas, a veces hechas a próposito y, en otros casos, adaptadas. Su costo es variable (de 5 a 20 $CA/Tonelada). Es necesario disponer los sacos en una forma apropiada.

***

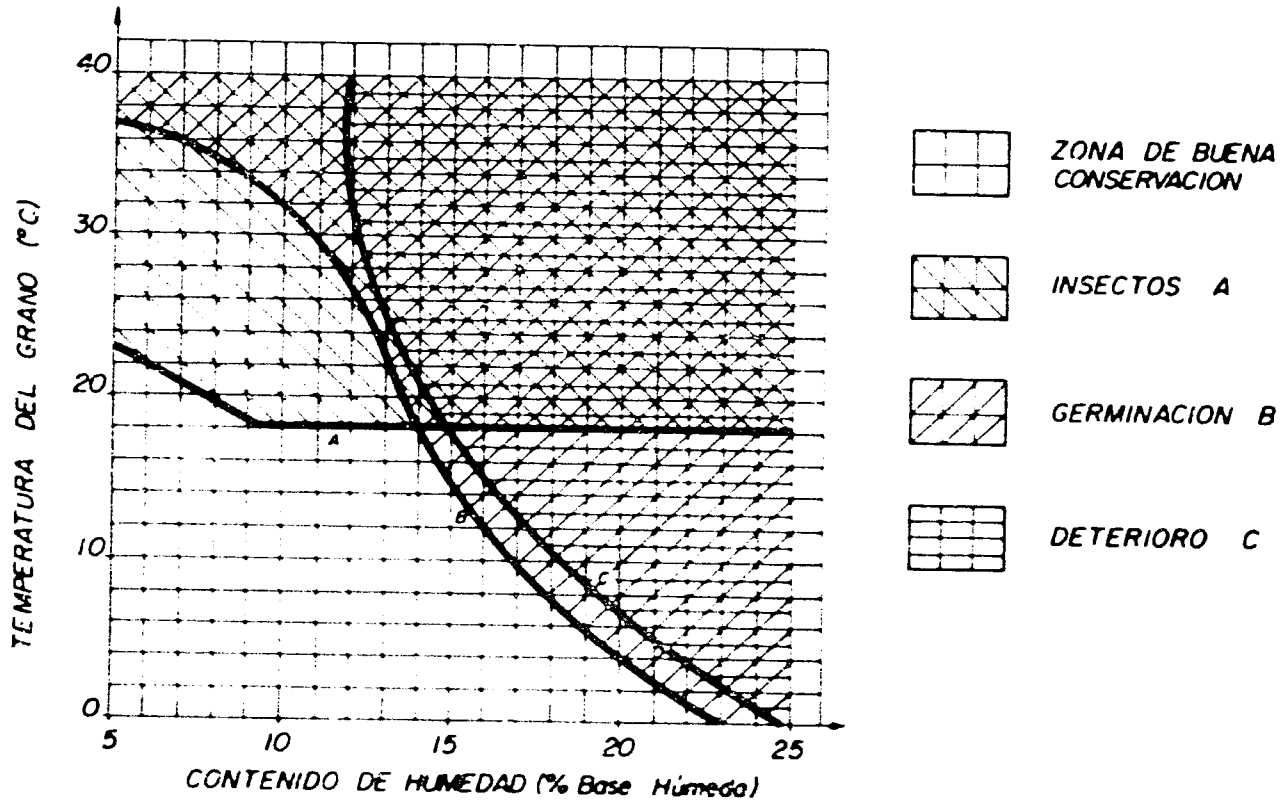


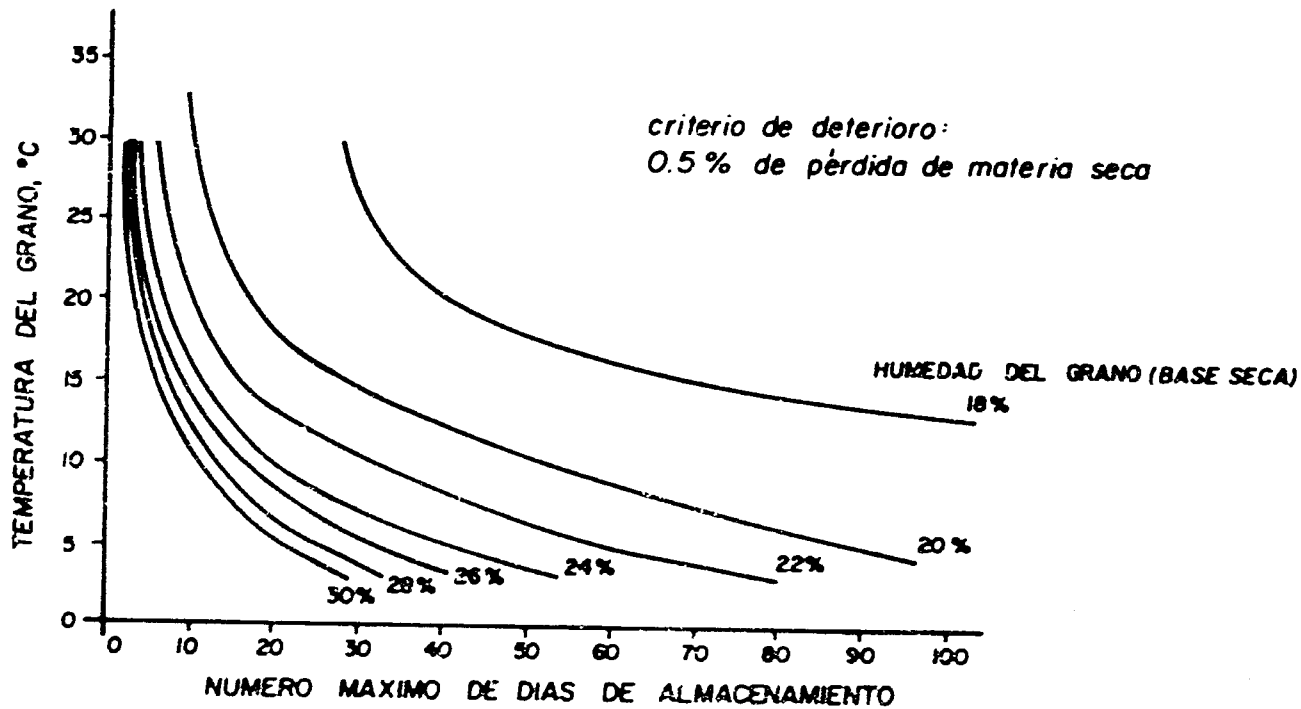
DIAGRAMA GENERAL DE CONSERVACION DE CEREALES

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

FIGURA 3 1

1980



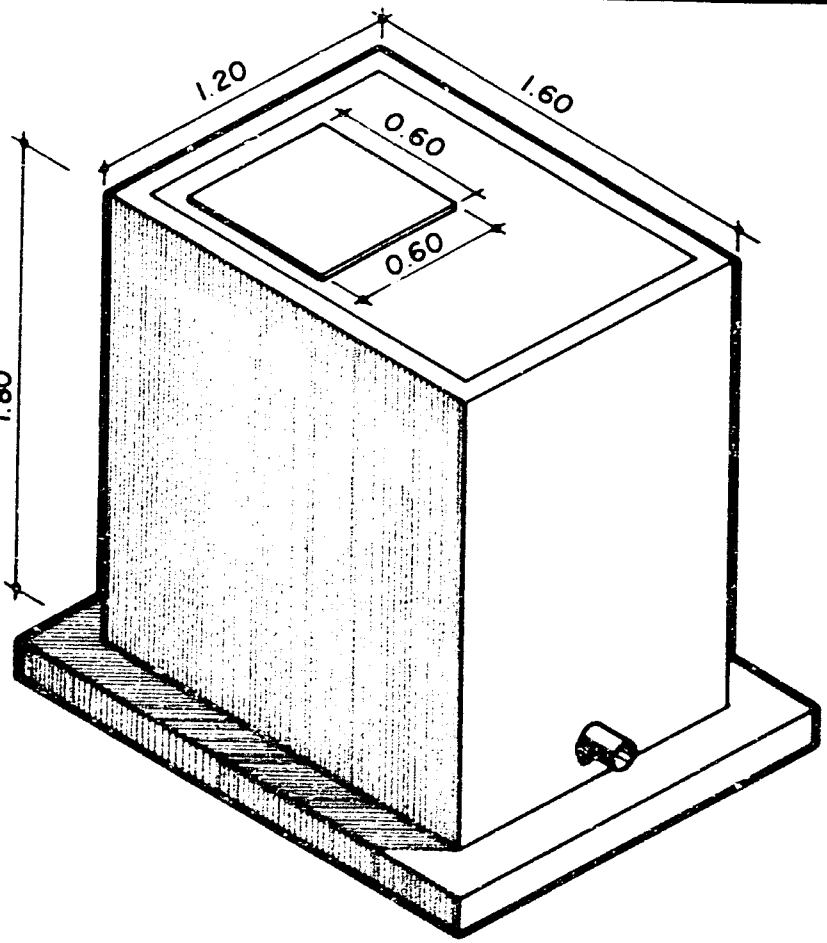
PERIODO MAXIMO DE ALMACENAMIENTO DEL MAIZ, COMO FUNCION DE SU CONTENIDO DE HUMEDAD Y DE LA TEMPERATURA DEL GRANO

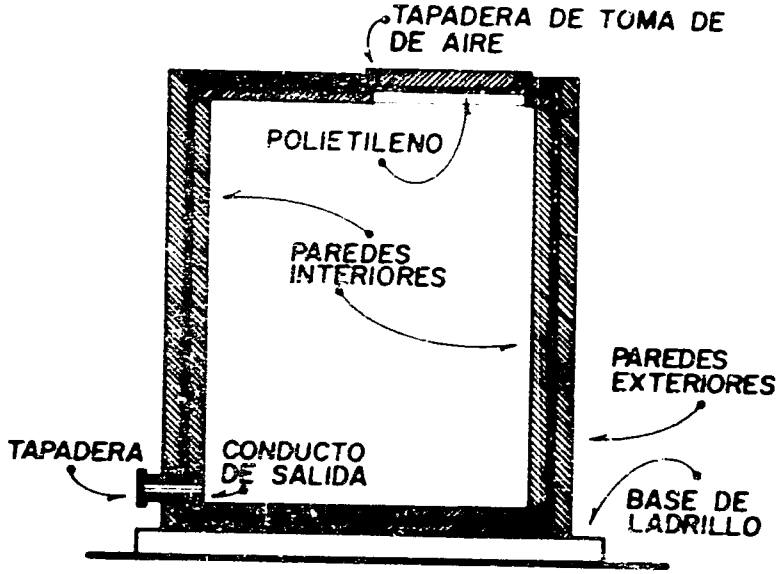
proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

FIGURA 3 2

1985





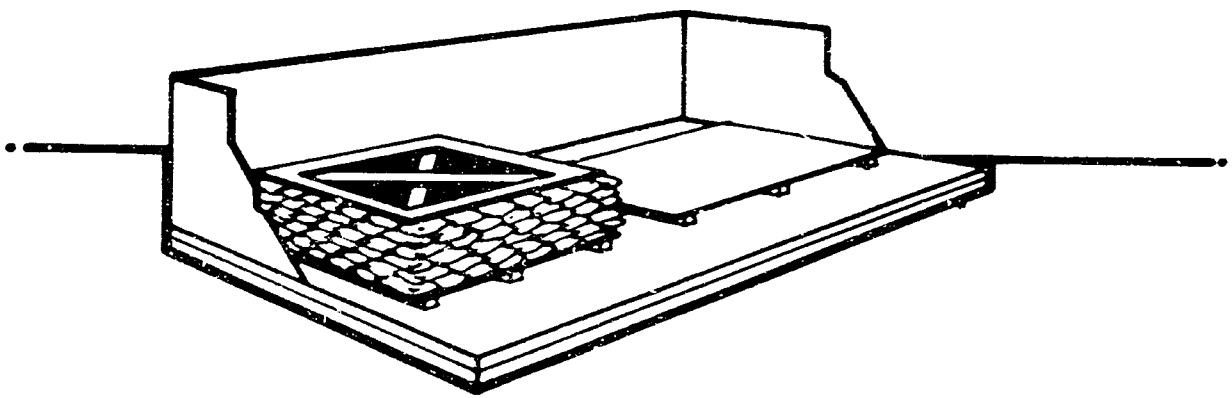
SILO "PUSA", CON PAREDES DE BARRO FORRADAS DE POLIETILENO.

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

FIGURA 3 3

1985

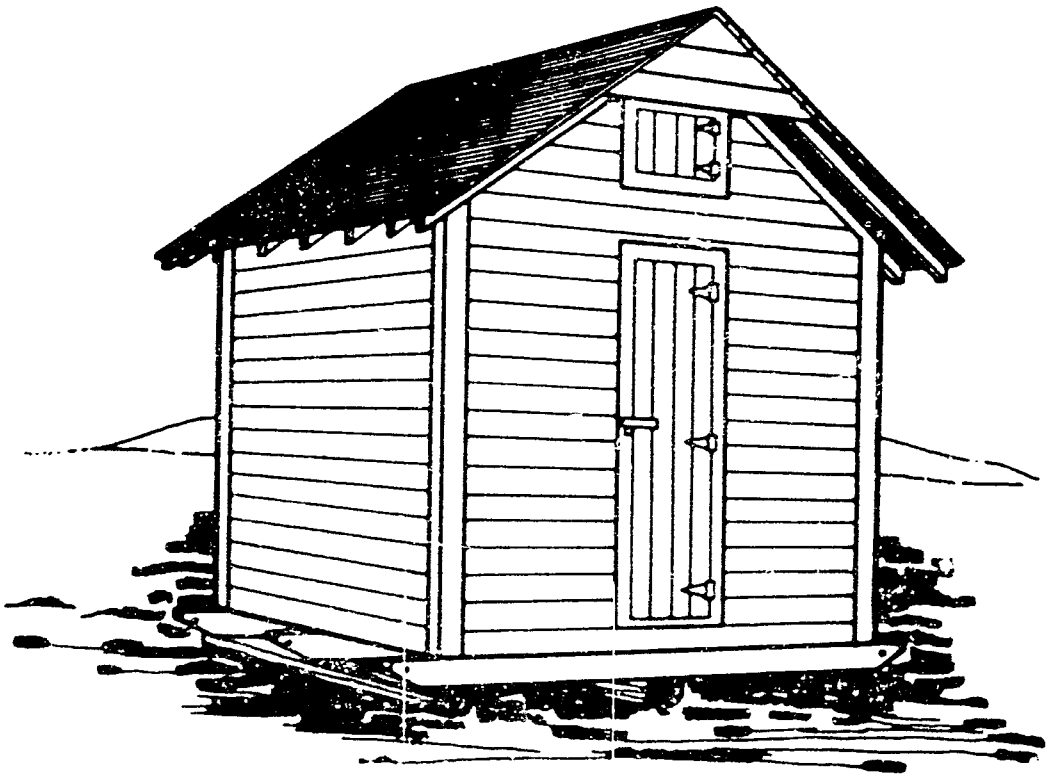


AMARRE INTERMEDIO PARA ESTIBADO

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

FIGURA 3.4

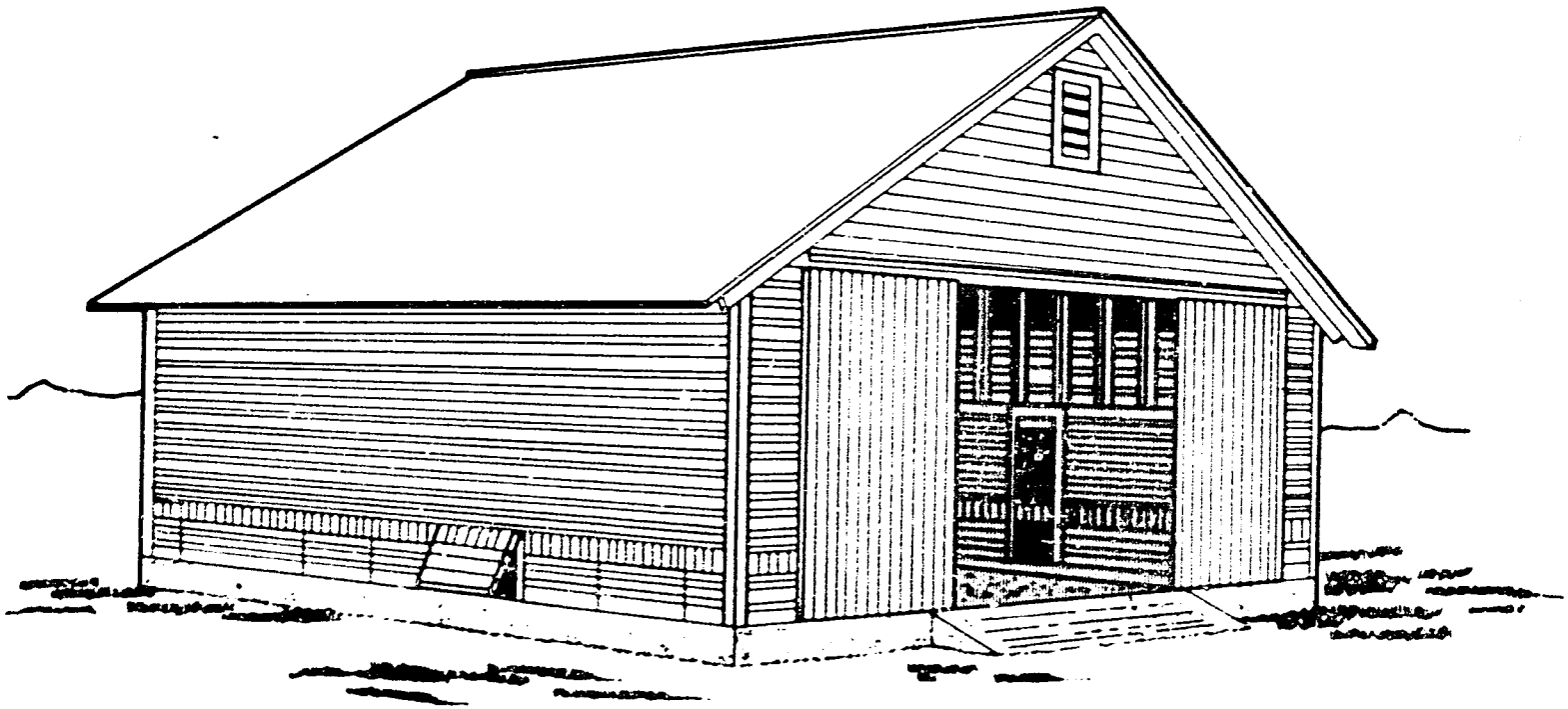


SILO MOVIBLE DE MADERA

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

FIGURA 3.5



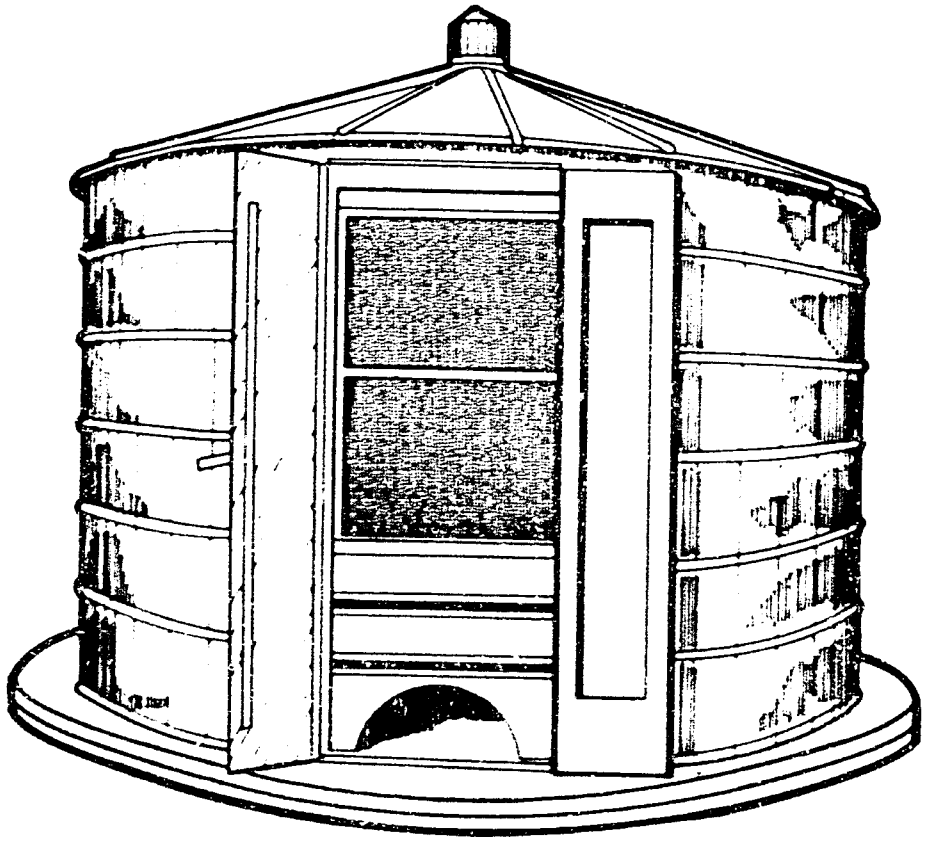
ALMACEN DE GRANOS DE GRAN CAPACIDAD

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

FIGURA 3.6

1985



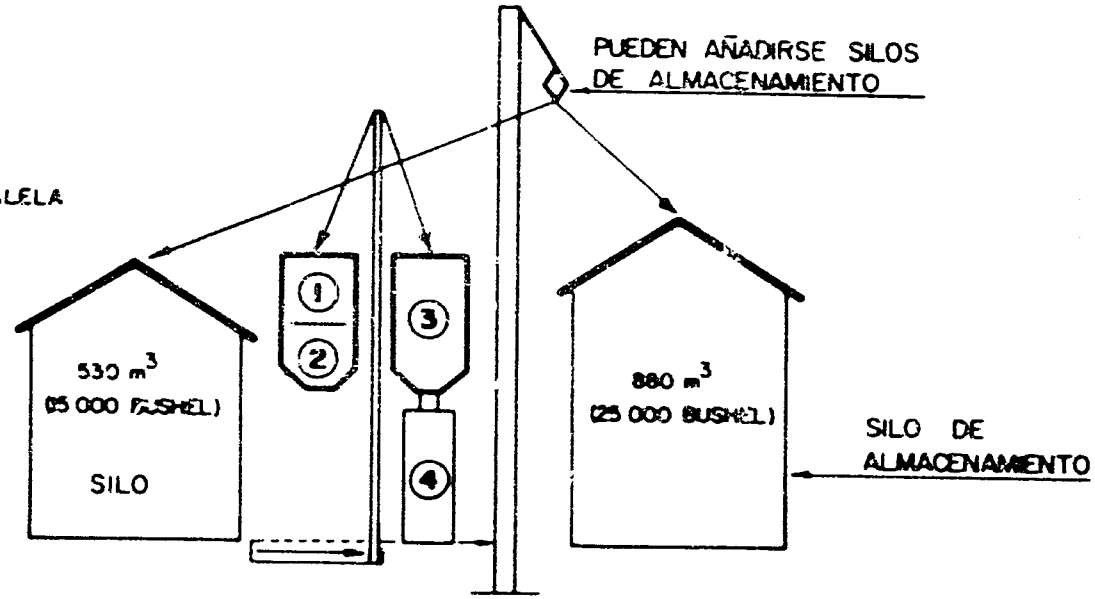
SILO METALICO EQUIPADO CON
EXTRACTOR DE AIRE

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

FIGURA 37

1985

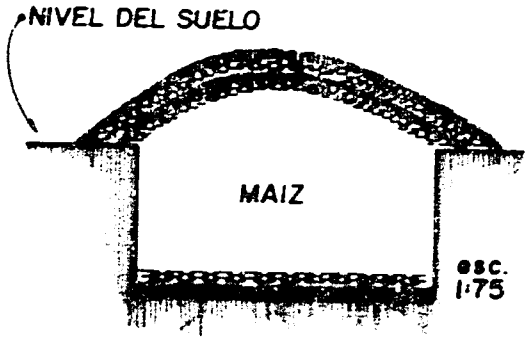


FLUJO DE GRANO HUMEDO - CENTRO DE SECADO Y ALMACENAMIENTO

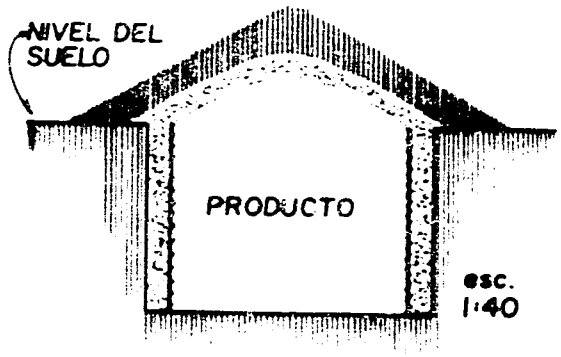
proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

FIGURA 3 8



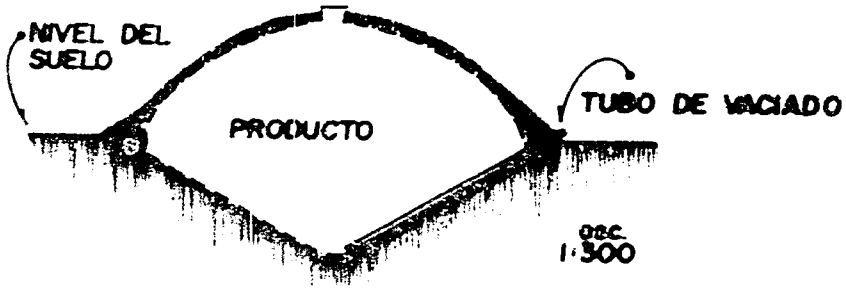
CORTE DE UN FOSO CUADRADO, TRADICIONAL, TIPICO DE SOMALIA.



CORTE DE UN FOSO CILINDRICO, TRADICIONAL, TIPICO DE BORNU, NIGERIA.

SIMBOLOGIA

- TIERRA
- TALLOS DE MAIZ
- ALGAS
- GRANZAS
- CAPA IMPERMEABLE
- PAJA ENTRETEJIDA
- HORMIGON



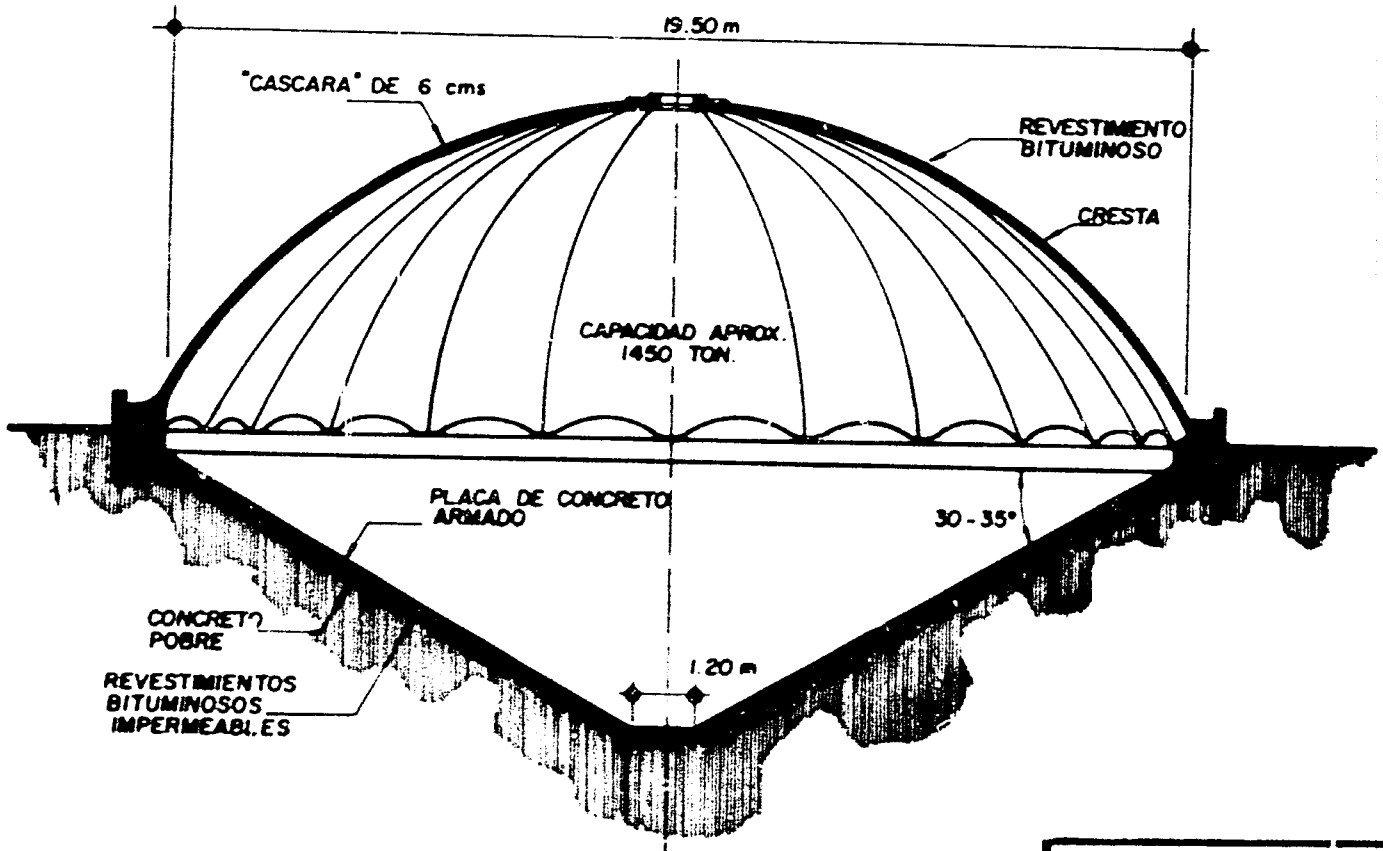
CORTE DE UNA CELULA EN FOSA CIRCULAR, MODERNA, TIPICA DE CHIPRE. PUEDE CONTENER 900 TONELADAS DE CEREALES.

DIAGRAMAS DE SILOS DE FOSO.

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

FIGURA 3 9



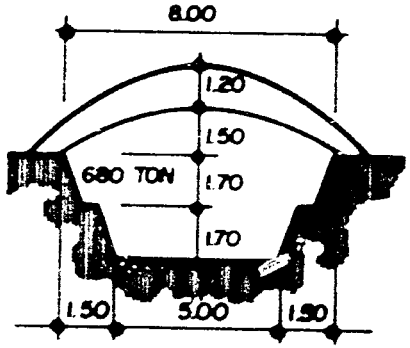
SILO HERMETICO TIPO CHIPRE

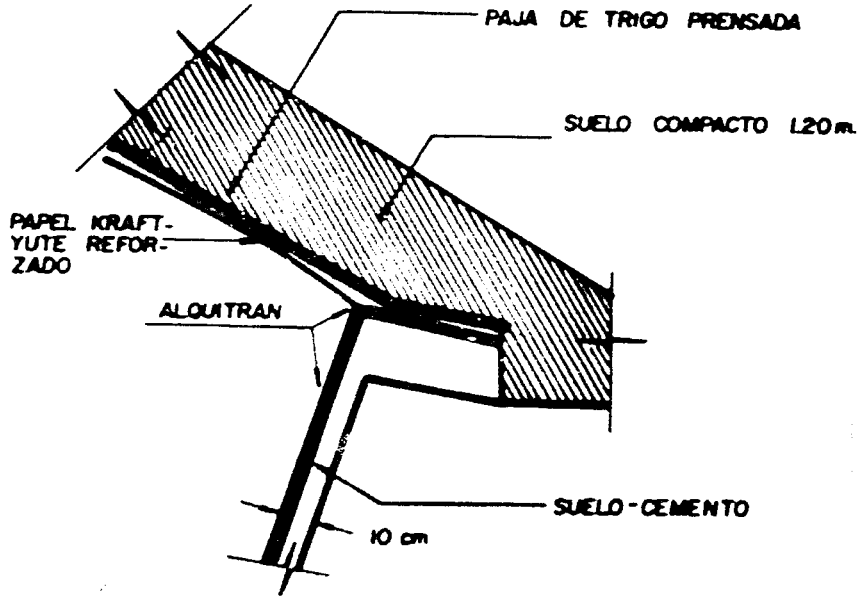
proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

FIGURA 3.10

1965





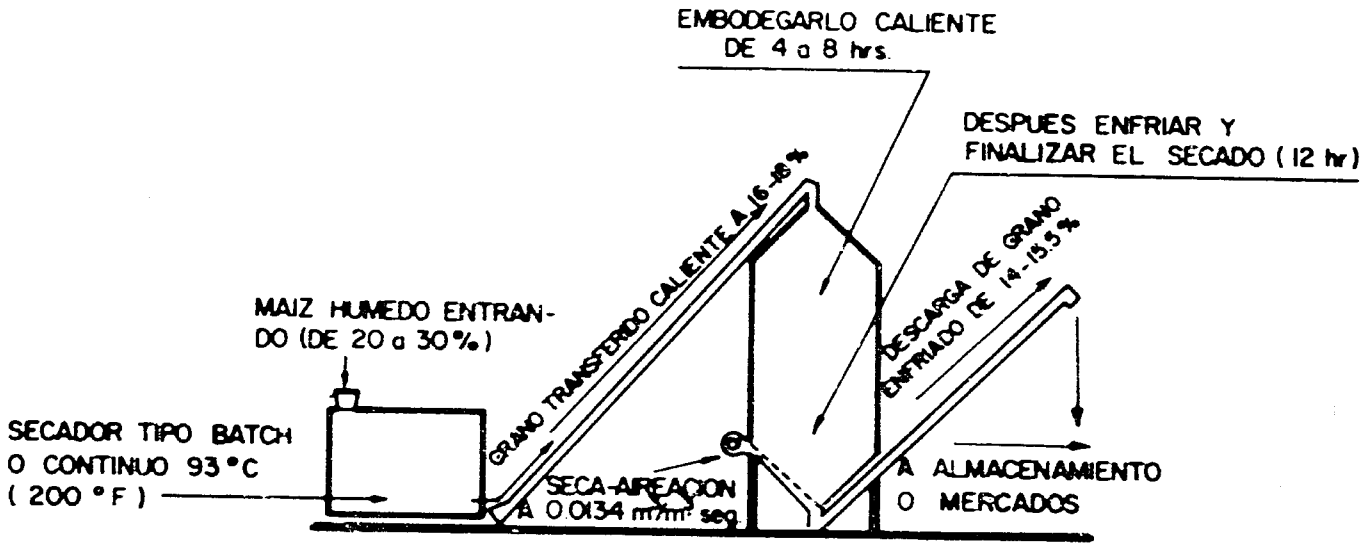
SILO HERMETICO TRADICIONAL

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

FIGURA 3 11

1980



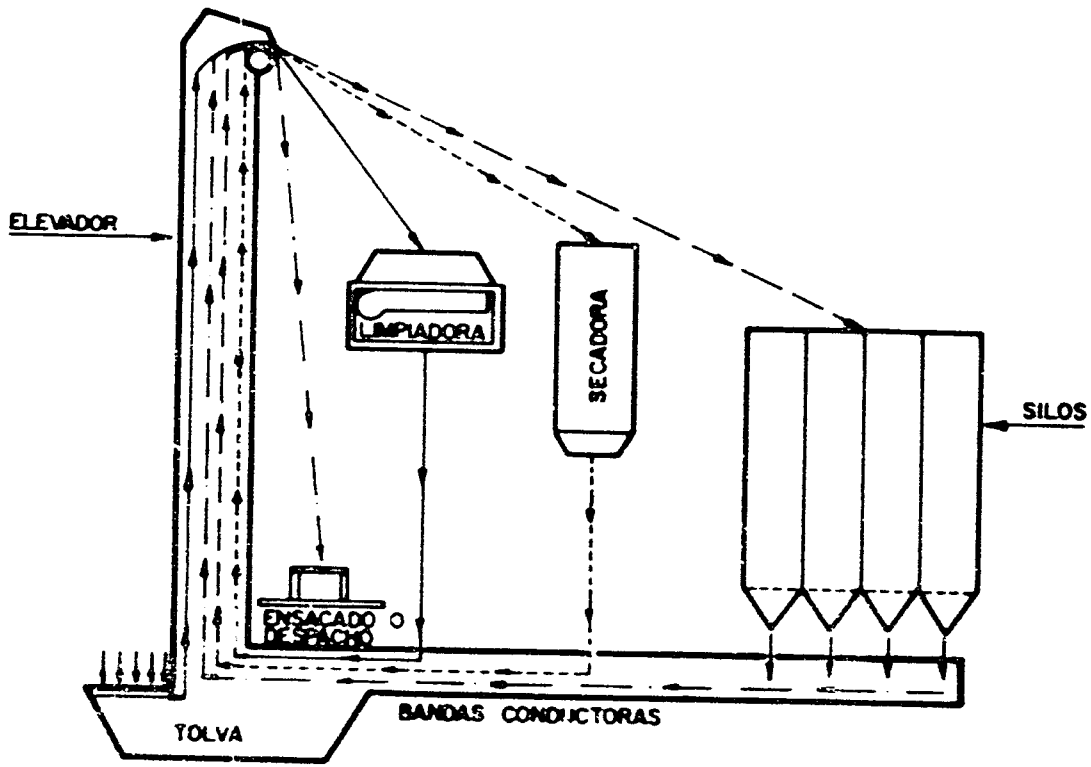
PROCESO DE SECA - AIREACION

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

FIGURA 3.12

1980



PRINCIPALES OPERACIONES EN UNA PLANTA DE ALMACENAMIENTO DE GRANOS

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

FIGURA 3.13

4. COLECTORES SOLARES PARA CALENTAMIENTO DE AIRE

4.1 PRINCIPIOS BASICOS DE CAPTACION DE ENERGIA SOLAR

Existen dos conceptos que son fundamentales para el estudio de la captación de energía solar; ellos son:

- Cuerpo negro, y
- Efecto de Invernadero

4.1.1 Cuerpo Negro

Al interponer un cuerpo opaco en la trayectoria de la luz se consigue atrapar con él parte de la energía transportada por los rayos luminosos. Si el cuerpo es obscuro y ligeramente rugoso, la cantidad de energía atrapada resulta ser mayor que si fuera claro y liso. A todo elemento material que atrape energía solar en esta forma, en mayor o menor cantidad, se le llama "absorbedor solar", "placa negra" o bien "cuerpo obscuro".

Un color obscuro capta mejor la energía radiante que cualquier color claro. Un "cuerpo negro perfecto", es un ente hipotético que en teoría es capaz de absorber toda energía que incida sobre él; no existe ningún cuerpo negro perfecto en la naturaleza, pero los objectos obscuros, opacos y ligeramente rugosos se le aproximan bastante.

El mecanismo de captación de energía, en forma simplificada es el siguiente: Los rayos solares, (predominantemente de los espectros visible y ultravioleta) al chocar con un cuerpo, ceden parte de su energía a los electrones exteriores de éste. Esta energía aumenta la amplitud de la vibración de los átomos del cuerpo, y lo calienta progresivamente. El remanente de energía, que no es absorbido, es devuelto o reflejado en forma de ondas de mayor longitud (rayos infrarrojos).

Esto significa que la interposición de un absorbedor da como resultado dos fenómenos: una captación de una parte de la energía, que provoca aumento de temperatura del cuerpo, y una reflexión de otra parte de la energía, pero con diferente longitud de onda que la original.

4.1.2 **Efecto de invernadero**

Los materiales transparentes (vidrio, plástico) permiten el paso de las ondas luminosas visibles y ultravioleta, pero no el de todas las radiaciones infrarrojas. Por eso, si una cámara cerrada tiene paredes transparentes, y en el fondo un absorbedor, la luz ingresa a través de las paredes y es parcialmente absorbida por aquél, en tanto que los rayos no absorbidos se reflejan como ondas infrarrojas que no pueden salir de la cámara, ya que las paredes no lo permiten. Estas ondas infrarrojas quedan atrapadas y calientan aire del ambiente interior de la cámara. Este es el llamado efecto de invernadero (Fig. 4.1).

4.2 COMPONENTES DE UN COLECTOR SOLAR

Un colector solar está integrado por diferentes componentes: uno, con función estructural, el apoyo; otros, que son los que realizan la función de convertir la luz en calor; y, además, componentes con función aislante.

Los componentes de conversión luz a calor son los más importantes de un colector, ya sea que éste se destine a calentar líquidos o a calentar gases. Estos componentes se describen a continuación (Fig. 4.2).

4.2.1 **Cubierta transparente**

Consiste en una o varias placas transparentes (o translúcidas), de vidrio o de material plástico. Su función es triple; por una parte, actúan como barreras provocando el efecto de invernadero, efecto del cual depende en gran medida el funcionamiento de un calentador solar, en especial en el caso de los calentadores de aire. Por otra parte, tienen la función de reducir las pérdidas de calor del aire encerrado, que se escaparía al exterior por los fenómenos de convección y radiación, ya que el aire encerrado entre las placas actúa parcialmente como aislante térmico. Y, en tercer lugar, protegen al absorbedor de los efectos de la intemperie (lluvia, polvo, nieve, etc.).

A mayor número de placas de cubierta corresponde una mayor eficiencia del colector; en sistemas para alta temperatura se usan varias, mientras que en los de temperatura intermedia, basta con una. En sistemas de baja temperatura, como en el caso de calentadores para agua de piscinas, no se necesita ninguna cubierta (Fig. 4.3).

4.2.2 **Absorbedor**

Se construye con uno de los siguientes materiales: placas metálicas, placas de plástico, arena, rocas, cemento, etc. El tipo, la forma y la disposición del absorbedor deben elegirse en concordancia con la disponibilidad de dinero y los requisitos

particulares de cada caso; existen diferentes clases o modelos. La función del absorbedor es captar energía y cambiar la longitud de onda de los rayos incidentes que resultan reflejados de su superficie.

4.2.3 **Aislante térmico**

Consiste en un material de baja conductividad térmica que se elige, dentro de lo posible, de manera que sea de bajo costo, que sufra pocos daños con el calor y que tenga baja densidad. Se coloca en el respaldo del absorbedor y su función es reducir al mínimo las pérdidas de calor a través del fondo del colector.

4.3 MODELOS DE COLECTORES

Existe gran diversidad de colectores, pero es posible catalogarlos en dos grandes categorías: Calentadores de agua (o líquidos) y calentadores de aire (o gases).

Aun cuando los principios básicos que rigen a ambos tipos son los mismos, la configuración resulta en general diferente de un caso al otro; esto es debido en gran parte a que el agua capta y almacena energía en cantidades unas 100 veces mayores que el aire. Por eso, los calentadores de agua y los calentadores de aire están formados de los mismos componentes ya descritos, pero para cada caso, con diferencias particulares.

En un calentador para agua el absorbedor debe hacerse con materiales de elevada absorbancia y baja emitancia de energía en la banda infrarroja; la superficie de contacto entre el agua y el absorbedor puede ser pequeña, aunque es conveniente que se produzca en el agua una turbulencia moderada.

En un calentador para aire el absorbedor debe tener una superficie de contacto extensa y alguna característica que facilite la producción de turbulencia en el aire tal como un ventilador, por ejemplo. Es muy conveniente en los calentadores de aire que las cubiertas se construyan con materiales que ofrezcan la mayor barrera posible a las radiaciones infrarrojas, para lograr una mayor eficiencia en el calentamiento (Fig. 4.4).

Existe gran variedad de modelos de calentadores de aire, desde los más sencillos invernaderos de plástico hasta los más complicados como los concentradores para gases. Una clasificación útil de los calentadores de aire es la siguiente:

a. Según el número de cubiertas transparentes

De una cubierta: Típicos invernaderos; secadores de ropa, de madera, de leña, de granos básicos, etc.

De dos cubiertas:	Deshidratadores de fruta, estufas solares.

b. Por los materiales con que se construye el absorbedor:

Metálicos:	Láminas, botes vacíos, etc.
Plásticos:	Películas de polietileno negro, PVC laminado, etc.
Pétreos:	Rocas, cemento, arena de mar, etc.

c. Por el grado de contacto entre el absorbedor y el aire:

De área expandida:	Convectores-calentadores, rollos de malla, lámina ondulada, lámina V, tubo aleteado, etc.
De área normal:	Láminas lisas, películas plásticas, etc.

d. Por la relación de paso del aire en el absorbedor (Figs. 4.5, 4.6 y 4.7).

Aire arriba del absorbedor

Aire abajo del absorbedor

Aire arriba y abajo del absorbedor

Aire en flujo cruzado respecto al absorbedor

4.4 MATERIALES PARA COLECTORES SOLARES

4.4.1 Cubiertas transparentes

Vidrio

Tiene excelente calidad óptica (0.90 a 0.95 de transmitancia), buena estabilidad térmica, bajo costo (11 a 16.5 $CA/metro2) y excelente apariencia; además, no se raya. Como desventajas, se pueden mencionar: fragilidad, elevado peso y necesidad de fabricar marcos especiales para colocarlo, dado su coeficiente de dilatación. Se recomienda usar vidrios con bajo contenido de hierro, y con espesores de 3 a 5 mm.

Láminas de acrílico

El material acrílico tiene buena calidad óptica (0.92 a 0.96 de transmitancia), su vida útil es de 5 a 10 años, a temperatura ambiente. Es liviano, resiste bien esfuerzos de compresión y tensión, pero se astilla fácilmente si no se corta en forma apropiada. Es muy estético, pero se raya. Por encima de los 100°C su estabilidad térmica es mala.

No es necesario fabricar marcos especiales, pues la dilatación no provoca la ruptura, como en el caso del vidrio. El costo es elevado: 21.50 a 27 $CA/m2.

El espesor recomendable para láminas de material acrílico que se usen como cubiertas para colectores es de 3 mm.

Lámina de fibra de vidrio (FRP)

La fibra de vidrio tiene una calidad óptica mediana (0.79 a 0.85 de transmitancia). Es extremadamente fácil de trabajar, muy fácil de transportar, resistente a golpes y muy liviano. Su costo es moderado: 10.75 a 16 $CA/m2. Se deteriora con el tiempo, opacándose, por lo que su vida útil normal es de 2 a 3 años, después de lo cual requiere revitalización o cambio.

El espesor apropiado para láminas de fibra de vidrio usadas en colectores solares es de 1 a 2 mm.

Plástico vinilo

El plástico vinilo tiene una transmitancia de 0.85 a 0.95. Es muy adecuado para secadores solares. Es bastante resistente a la degradación por rayos ultravioleta. Su costo es moderado (2.0 a 2.5 $CA/m2). Tiene cierta tendencia a cortarse espontáneamente, por lo que debe estar bien colocado de modo que el viento no lo golpee con fuerza. Es termodilatable y se raya. Para las uniones vinilo-vinilo se requiere de pegamentos especiales.

El espesor apropiado para plástico vinilo es de 0.254 a 0.50 mm (10 a 20 milésimas de pulgada).

Plástico polietileno

Su transparencia es menor que la del vinilo. Su costo es relativamente bajo (0.50 a 0.75 $CA/m2) y la unión polietileno-polietileno puede hacerse con cemento de contacto, del mismo usado en zapaterías. Se deteriora rápidamente por los rayos ultravioleta; su vida útil es de 6 a 9 meses. Es espesor apropiado para este material, cuando se usa en colectores solares es de 0.1524 a 0.254 mm (6 a 10 milésimas de pulgada).

4.4.2 **Absorbedores**

Láminas de cobre

Excelente absorbancia (0.90 a 0.95), elevada conductividad térmica (1 000 - 1 200 kcal/m2-h-°C), pero elevado costo (35 a 40 $CA/m2), espesor de 1/32"). Se usa especialmente en calentadores concentradores y en sistemas de alta temperatura.

Láminas de aluminio

Buena absorbancia (0.90 a 0.92), buena conductividad térmica (K=750 a 800 kcal/m2-h-°C). Costo moderado (13 a 15 $CA/m2 en espesores de 1/32" a 1/64").

Láminas de hierro galvanizado

Mediana absorbancia (0.7 a 0.9) y regular conductividad térmica (K=200 a 300 kcal/m2-h-°C). Bajo costo (3.0 $CA/m2 cal 28 a 6 $CA/m2, cal 24). Común en calentadores de agua para temperaturas intermedias (40-50°C) e instalaciones de costo moderado.

Película PVC negro

Este producto es muy resistente y duradero (5 años o más). Su costo es de 1.25 $CA/m2 (plástico salinero). Se puede adquirir en espesores desde 0.3048 a 0.508 mm (12 a 20 milésimas de pulgada).

Película de polietileno negro

Se le conoce como "plástico negro para labores agrícolas". Es muy barato (0.5 a 0.75 $CA/m2), pero poco resistente (las películas colocadas verticalmente duran varios años, mientras que las que se colocan horizontalmente duran de 1 a 2 años). Para esta aplicación se recomienda usar película con espesor de 0.3 a 0.5 mm.

Las películas de plástico se usan principalmente para secadores de granos y para calentadores de bajo costo para aire.

4.4.3 **Pinturas o recubrimientos**

Recubrimientos selectivos

Consisten en tratamientos químicos con compuestos como óxidos de cobre, óxidos de cromo, sulfuros de níquel y de plomo, óxidos de cobalto, etc., mediante electrodeposición, reacción intrínseca, deposición al vacío, etc., que dan elevadas absorbancias (0.88 a 0.98) y baja emitancia (0.07 a 0.30). Son tratamientos muy caros (10.00 a 38.00 $CA/.m2).

Pinturas termorresistentes

Son pinturas que resisten bien las temperaturas del orden de 150°C a 300°C, sin volverse quebradizas y sin perder adherencia. Sus propiedades ópticas son semejantes a las pinturas negro mate comercial corriente (absorbancia = 0.9; emitancia = 0.9). Su costo es de 1.0 $CA/m2.

Pinturas negro mate comercial

Son pinturas de alta absorbancia (0.95) y alta emitancia (0.95), poco resistentes a altas temperaturas y de adherencia moderada. Su costo es del orden de 0.50 $CA/m2.

4.4.4 Absorbedores pétreos

Los absorbedores se construyen con materiales de origen pétreo; ejemplos de este tipo de absorbedor son: patios de cemento teñido de negro, o de ladrillo quemado o pintado de negro, o de arena de mar o bien, lechos rocosos obscuros, etc.

Sus propiedades son variables pero en todos ocurre un fenómeno interesante, ya que poseen una gran inercia térmica y almacenan energía calorífica; se calientan mientras están expuestos a la radiación solar, almacenan la energía recibida y luego la devuelven en forma continua durante algún tiempo, aunque ya no reciban insolación directa o indirecta. Estos absorbedores son característicos de los secadores solares dinámicos grandes.

4.4.5 Aislantes térmicos

Espuma de poliuretano

Es un material adecuado para sistemas de alta temperatura. Baja conductividad térmica (0.024 W/m-°C), baja densidad, excelente resistencia al calor (hasta 400 - 800°C). Su costo es elevado (del orden de 20.00 $CA/m.² por cada 5 cm de espesor) porque requiere equipo especial de aplicación.

Espuma de poliestireno (Duropore-durapast-estyrofoam)

Conductividad térmica del orden de 0.034 W/m-°C, baja densidad, costo moderado (10.00 $CA/m.² x 5 cm), fácil de aplicar, pero es muy poco resistente al calor, lo que lo hace inútil para temperaturas por encima de los 90°C.

Lana de fibra de vidrio (lana mineral)

Liviana, excelente resistencia al calor, buena conductividad térmica(0.034 W/m-°C). Aplicación difícil y molesta. Es difícil de

sujetar por su gran fragilidad. Su costo es moderado (5.00 $CA/m2 x 5 cm). Es característico de los calentadores solares para agua.

Asbesto

Conductividad de 0.319 W/m-°C. Pesado, difícil de aplicar. Termorresistente. Adecuado en sistemas de temperatura mediana.

Otros

Cascabillos, granzas, papel periódico boratado, cartón, aserrín seco, papel mascado, cascajo, arena blanca, paja, esponja de colchones, tierra seca, etc. Son materiales poco estudiados y que pueden llegar a tener buenas aplicaciones específicas en el futuro, pero para los que actualmente no se conocen bien las propiedades térmicas.

4.5 EFICIENCIA EN COLECTORES SOLARES

En general, se puede definir cualquier tipo de eficiencia, ya sea de un aparato, de un sistema o de algún proceso energético, como "la razón entre la cantidad de energía útil realmente aprovechada, respecto a la cantidad de energía que consume o recibe el sistema para realizar su trabajo". La eficiencia se expresa como porcentaje o como fracción entre 0.0 y 1.0; la indicaremos con la letra E.

$$E_T = \frac{\text{Energía útil aprovechable}}{\text{Energía total consumida o recibida}}$$

Existen varios tipos de eficiencia en los sistemas solares, como: E óptica, E térmica, E sistema, E colector, etc., según sea el caso que interesa. En este manual se hará énfasis en la Eficiencia térmica del colector para aire calentado con energía solar.

Hay varios modelos matemáticos teóricos para predecir la eficiencia, pero para calcular se requieren muchos datos sobre las propiedades, las características y las dimensiones. En todo caso es preferible calcular la Eficiencia térmica real de los colectores y no la teórica, porque es de una aplicación práctica más directa. Hay normas para calcular la eficiencia térmica en colectores solares como la BSIDD77 y la ANSI-ASHRAE 93-77, pero básicamente la ecuación que se usa es la siguiente:

$$E_T = \frac{\text{Energía útil}}{\text{Energía recibida}} = \frac{\dot{m}.Cp.\Delta t}{I\ A\ \theta}$$

4.5.1 Flujo de masa ($\dot{m}$)

Es la cantidad de masa de fluido que pasa por el colector en la unidad de tiempo (kg/min, kg/hora, etc.) y se puede medir con un rotámetro, con tubos Pitot, con Venturi, etc., si se trata de líquidos, y con anemómetros, con Venturi, con Pitot, si se trata de aire. En el caso de un líquido, es fácil medir el flujo; para aire es más difícil, ya que se debe conocer los perfiles de velocidades en la entrada y en la salida del colector. En los colectores para líquidos y en los colectores para aire, que funcionan por convección natural, el $\dot{m}$ es prácticamente imposible de medir con adecuada precisión, dado que es muy pequeño.

Si se conoce la densidad (d) del aire en función de su temperatura se puede aplicar $\dot{m} = (\dot{q})(d)$ para tener una idea aceptable del valor de $\dot{m}$ en un ducto con ventilador.

$$\text{Kg/min} = \frac{m^3}{min}\left(\frac{kg}{m^3}\right)$$

Para esta ecuación: $\dot{q}$ = flujo volumétrico (m^3/min)

4.5.2 Calor específico (Cp)

Es la cantidad de energía (o calor) que se debe suministrar a una sustancia ya sea compuesta o simple, para hacer subir su temperatura en un grado (°F, °C, o °K) por unidad de masa (gr, lb, kg) de la sustancia. En general, el Cp es una función de la temperatura, pero para el aire se usa, independientemente de la temperatura, el valor Cp = 0.24 cal/gr-°C.

En el caso de ductos de calentamiento conviene conocer el Cp del aire que entra y el del aire que sale y calcular un Cp promedio. A menudo, el Cp se considera constante.

4.5.3 Insolación Il

Es la cantidad de energía solar que recibe un área dada, en un período de tiempo definido. Se expresa en cal/cm²-min y se obtiene mediante mediciones de Δt; el período de tiempo usual para hacer este tipo de medida es de 10 minutos por período.

La insolación debe ser medida con mucho cuidado, mediante un piranómetro apropiado y colocado con la misma inclinación que la del colector, pues de no hacerse así, podría obtenerse una medición errónea.

Normalmente, en las estaciones meteorológicas se colocan los piranómetros en posición horizontal, según convención internacional, y

se expresan los valores de la insolación para esa posición horizontal; en cualquier otro caso, el evaluador deberá conocer la inclinación del colector que prueba, y utilizar como área la proyección del colector sobre el plano horizontal (largo x ancho x cos Ø, donde Ø es el ángulo de inclinación del colector respecto a la horizontal.

4.5.4 Area (A)

Es el área real de captación, a menudo llamada "efectiva"; al calcular el valor del área hay que tomar en cuenta las "zonas muertas" que pueda tener el colector (travesaños), etc.), y, sobre todo, la inclinación, ya que debe usarse el valor de la proyección del colector sobre el suelo horizontal.

4.5.5 Período de evaluación (Q)

Es el período de tiempo que dura la medición de Il, $\dot{m}$, Δt, etc. Se recomienda hacer las pruebas en horas del mediodía, ya que a esas horas se tiene la insolación máxima, y de preferencia en días despejados y con poco viento. Se registran los valores de Il, $\dot{m}$, Δt cada minuto durante diez minutos.

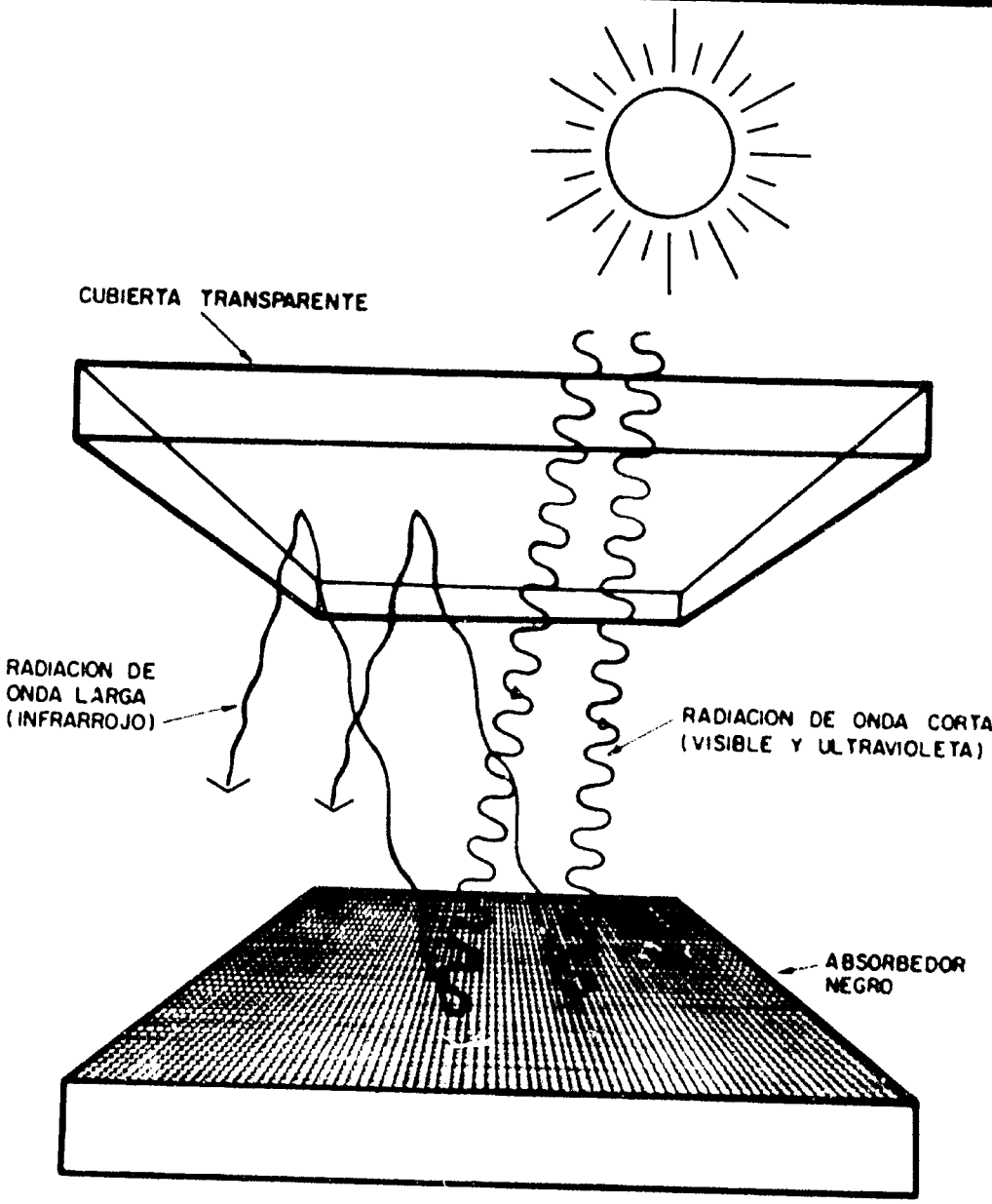
Sin embargo, sería muy adecuado conocer la E_T en función de la hora del día, mediante mediciones de 10 minutos cada hora del día, de 8:00 a.m. a 4:00 p.m.

4.5.6 Medida de temperatura e incremento de temperatura (Δt)

Es la medida del calentamiento sufrido por el aire entre la entrada y la salida del colector. En la salida hay que medir t en varios puntos del ducto de salida y calcular el promedio aritmético de ellas; finalmente Δt se calcula restando t de entrada de t de salida.

Como se ve, calcular E_T puede resultar un proceso muy detallado si se desea tener mucha precisión, pero se puede sacrificar un poco la precisión en pos de la facilidad y flexibilidad en la toma de datos, pues de todas formas lo que interesa evaluar son las E_T promedio. En calentadores sencillos de aire E_T fluctúa entre 0.1 y 0.2; y en los calentadores de aire mejorados, entre 0.2 y 0.4.

****

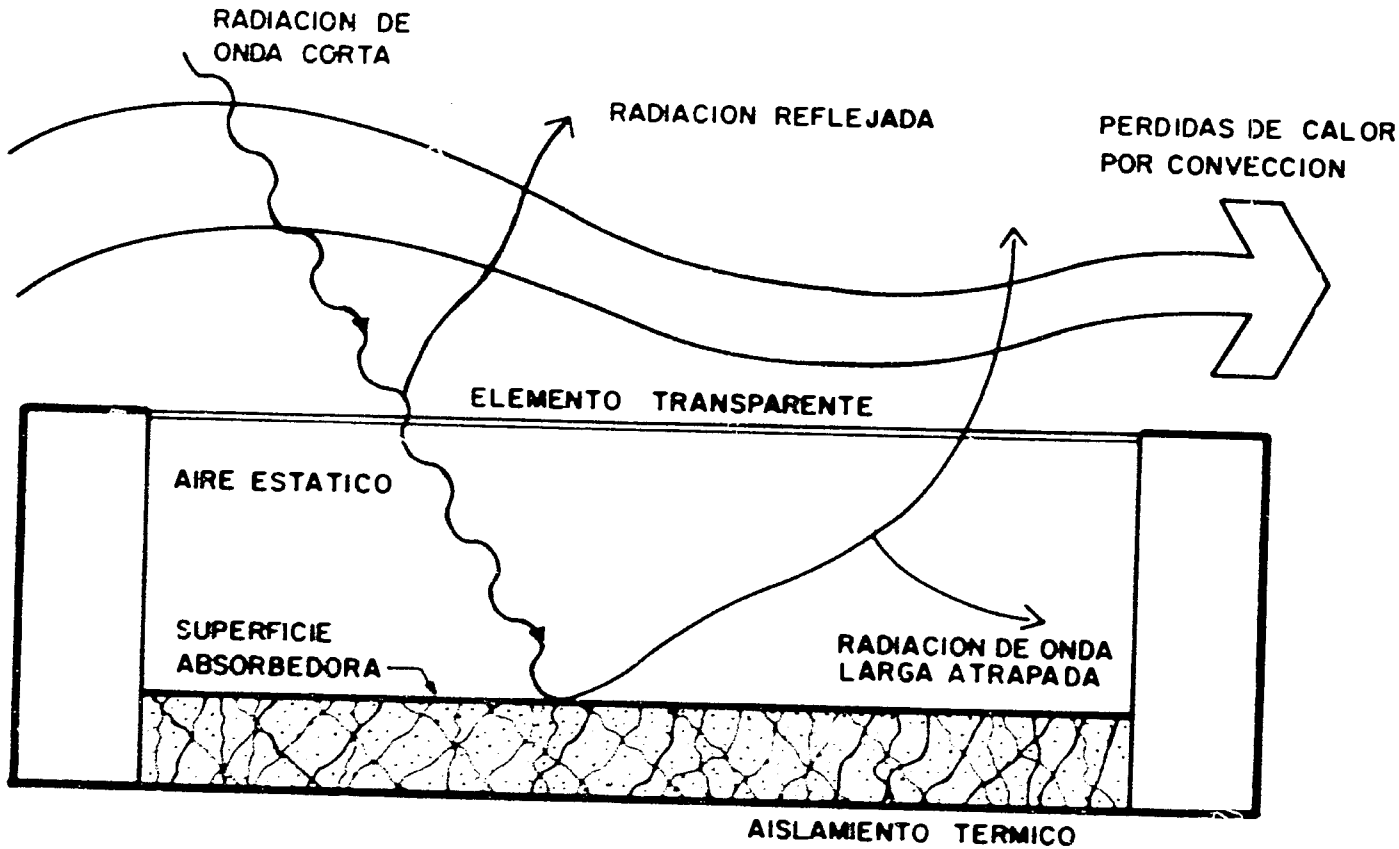


EFECTO DE INVERNADERO

LA RADIACION SOLAR DE ONDA CORTA PENETRA EL VIDRIO Y CALIENTA LA SUPERFICIE OSCURA, AHI CAMBIA LA LONGITUD DE ONDA, HACIENDOSE DE LONGITUD MAYOR, Y LA PARTE QUE REFLEJA EN EL CUERPO NEGRO DE ESTA RADIACION, NO PUEDE ATRAVESAR EL VIDRIO, QUEDANDO ATRAPADA ENTRE EL VIDRIO Y EL CUERPO NEGRO.

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI | FIGURA 4.1



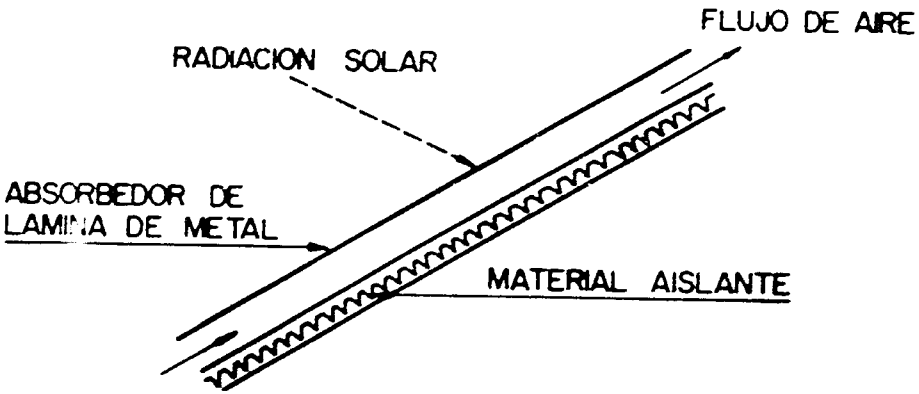
EL COLECTOR SOLAR TIENE DOS TIPOS DE AISLAMIENTO TERMICO, LA CAPA DE ABAJO EVITA LAS PERDIDAS POR CONDUCCION, LA CAPA DE ARRIBA, DE AIRE ESTATICO Y CALIENTE, EVITA PERDIDAS POR CONVECCION.

ICAITI

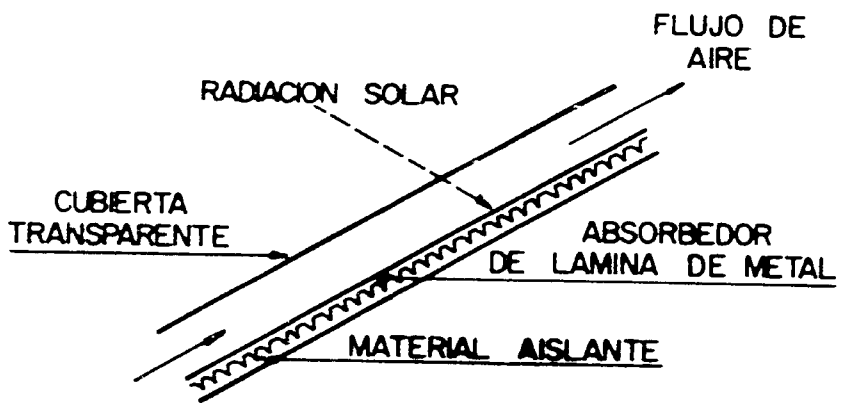
proyecto de leña y fuentes alternas de energía

FIGURA 4.2

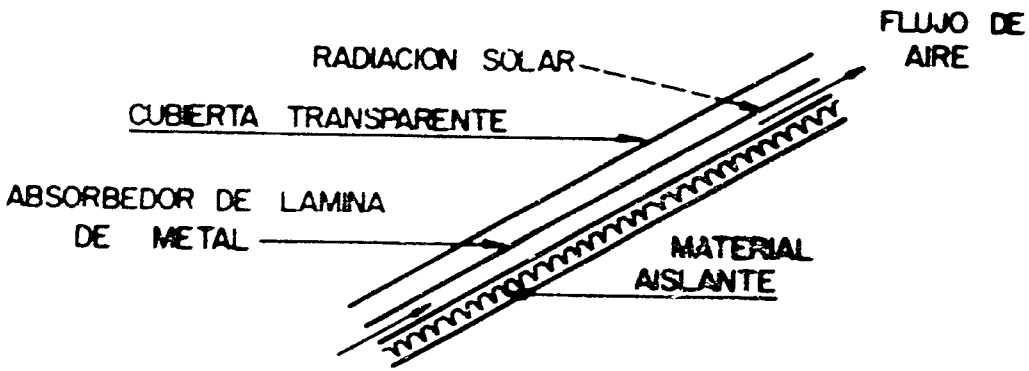
1985



PLACA DESNUDA



PLACA CUBIERTA



PLACA CUBIERTA SUSPENDIDA

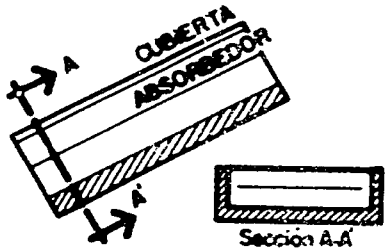
Configuraciones típicas de colectores solares para calentamiento de aire, tipo placa plana.

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

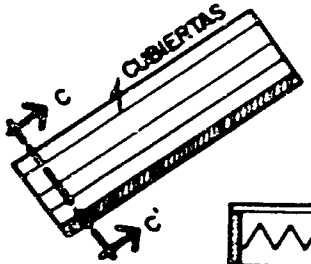
ICAITI

FIGURA 4.3

FLUJO A AMBOS LADOS DEL ABSORBEDOR

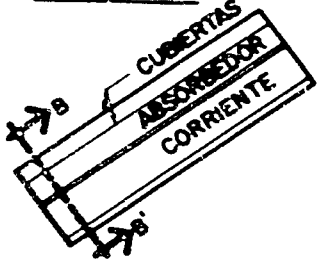


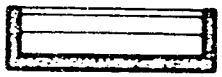
Sección A-A'



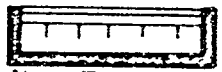
Sección C-C'

FLUJO DEBAJO SIN ALETAS

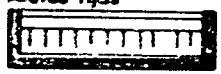




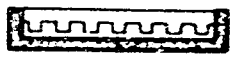
Sin aletas



Aletas fijas



Aletas escalonadas



Aletas 'U'

Sección B-B'

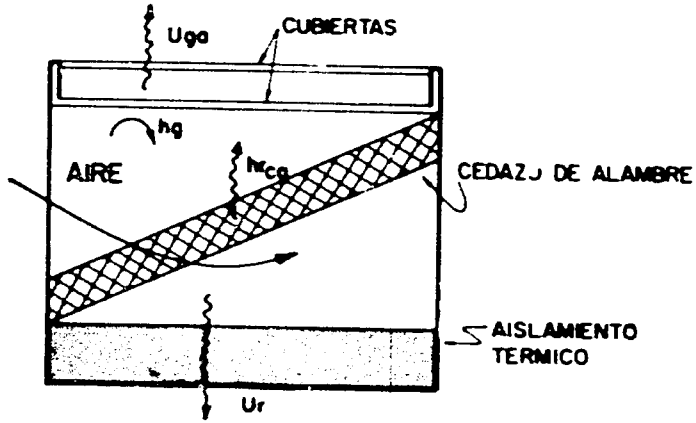


DIAGRAMA DE UN CALENTADOR DE AIRE CON CEDAZO DE ALAMBRE

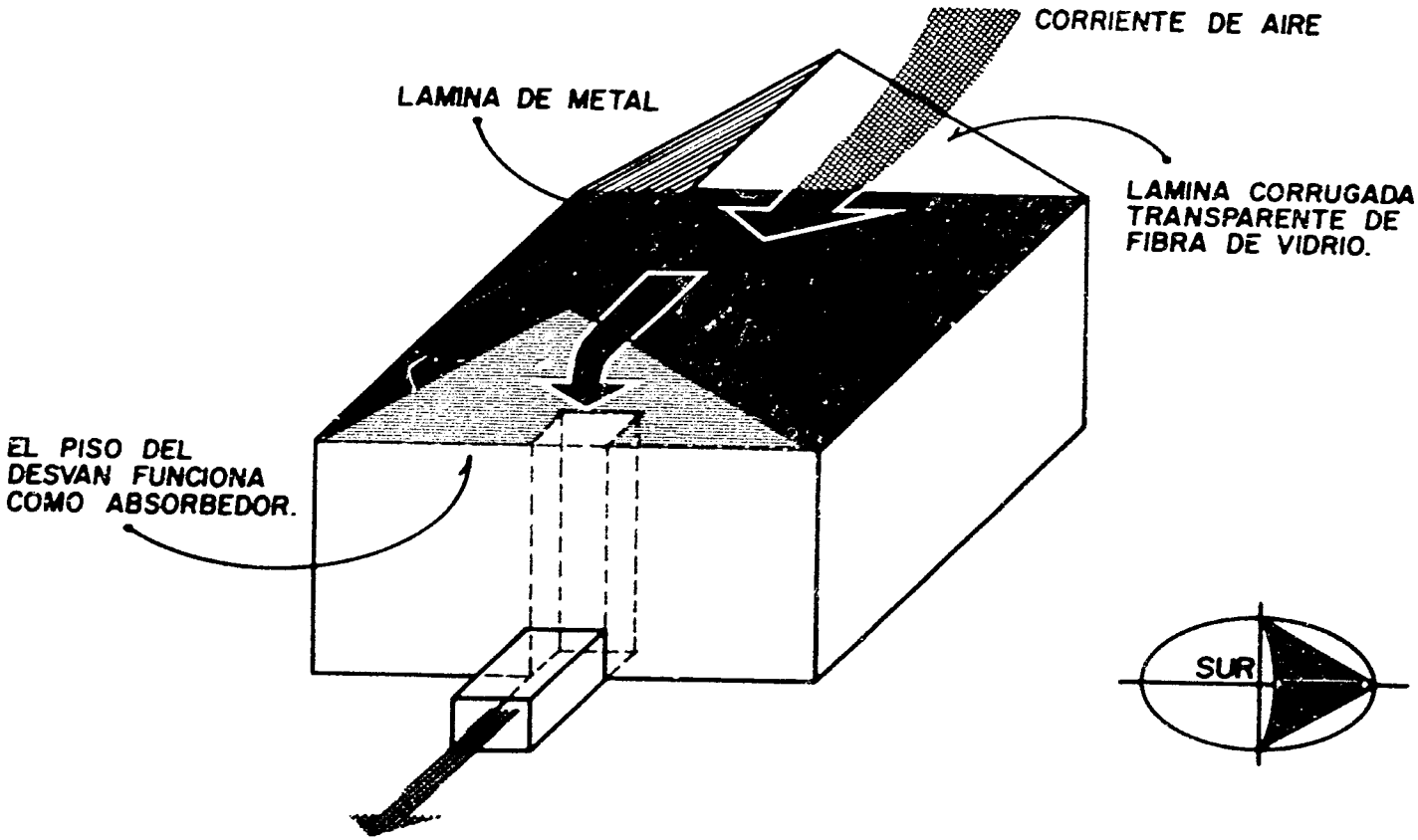
TIPOS DE ABSORBEDORES PARA CALENTAMIENTO DE AIRE

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

FIGURA 4.4

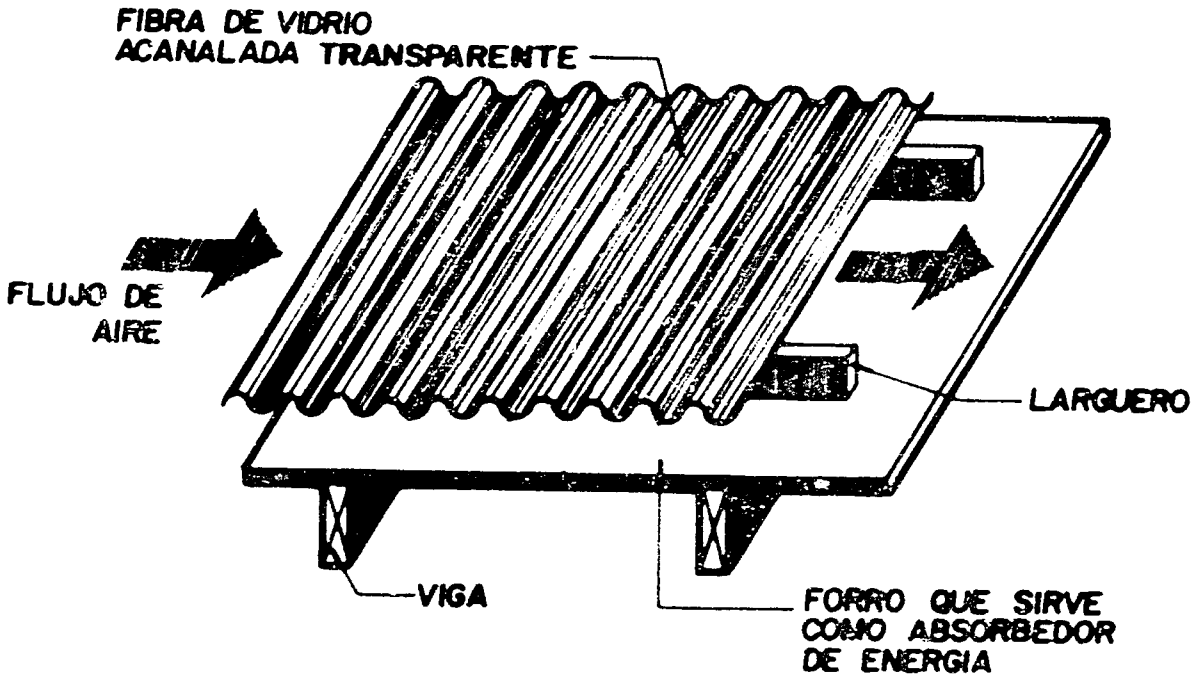
1985



APROVECHAMIENTO DE UN DESVAN COMO COLECTOR SOLAR.

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI FIGURA 4.5 1983



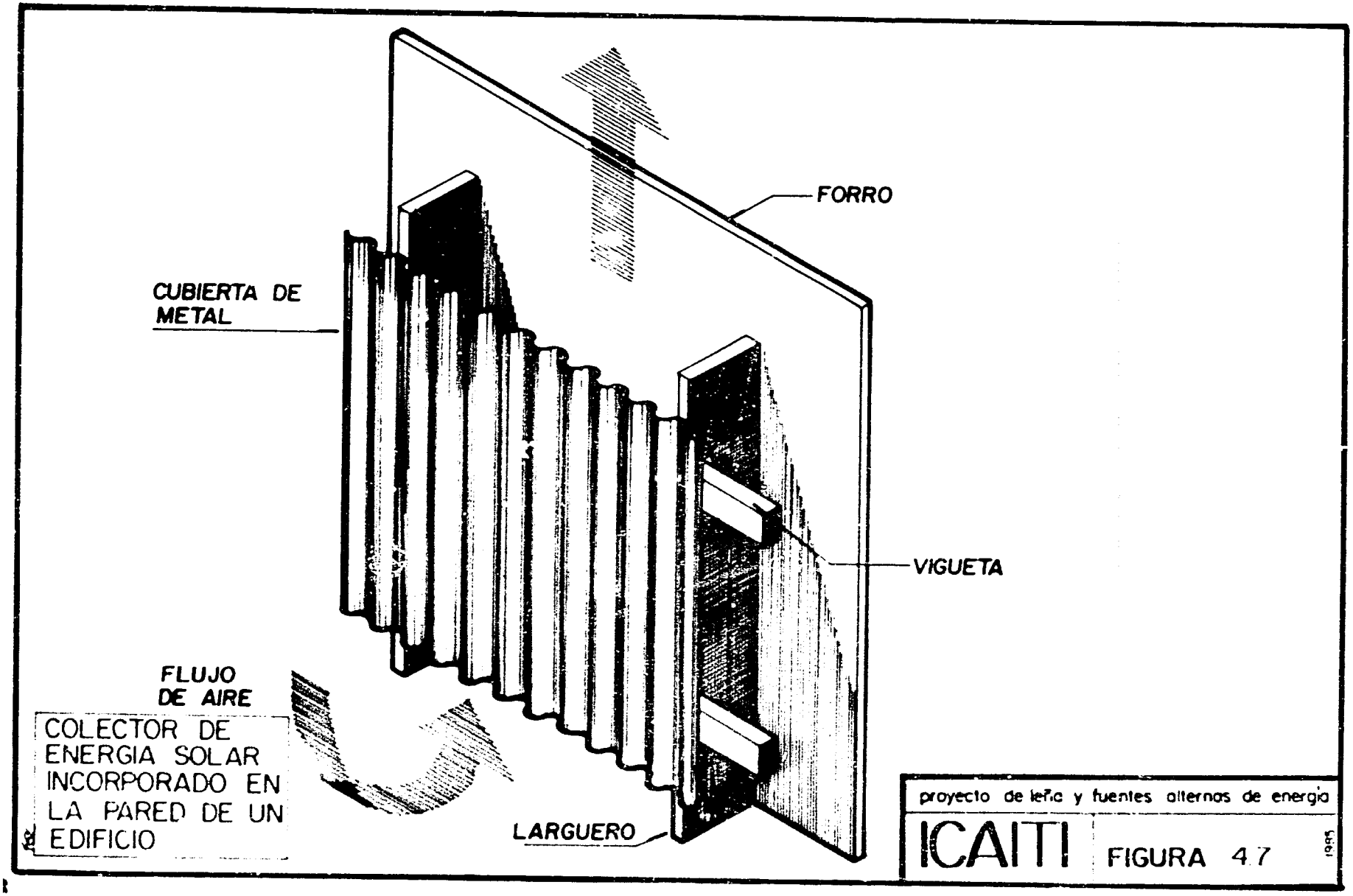
COLECTOR SOLAR DE PLACA CON CUBIERTA, INCORPORADO DENTRO DEL TECHO DE UN EDIFICIO

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

FIGURA 4.6

1980


FORRO
CUBIERTA DE METAL
VIGUETA
FLUJO DE AIRE
COLECTOR DE ENERGIA SOLAR INCORPORADO EN LA PARED DE UN EDIFICIO
LARGUERO
proyecto de leña y fuentes alternas de energía
ICAITI
FIGURA 4.7
1985

5. SECADORES SOLARES DOMESTICOS

5.1 SECADORES SOLARES DIRECTOS

5.1.1 Secador de tipo "caja caliente"

Este secador consiste en una caja o gabinete cuyo fondo es perforado y que, generalmente, tiene paredes laterales dobles rellenas con algún material aislante térmico seco, tal como aserrín o granza de arroz; la caja está asentada sobre patas que levantan el fondo algunos centímetros sobre el suelo, de manera que pueda penetrar aire fresco por él; a los lados, y en la parte superior tiene aberturas para permitir la salida del aire caliente húmedo.

Sobre el fondo de la caja se coloca una bandeja de doble malla de alambre con aberturas de 1.27 cm (1/2") y 0.16 cm (1/16"), (sobre ésta se extiende el producto que va a secarse). Las caja se tapa con un material transparente, (vidrio, tela plástica de polietileno, tela de vinilo, o fibra de vidrio laminada).

En este tipo de secador el área del colector solar es igual al área de la cámara de secado, de lo cual proviene su nombre (Fig. 5.1).

El tiempo efectivo de secado puede medirse en días/sol. (Día/sol es el período de luz solar comprendido entre las 9:00 y 15:00 horas, intervalo durante el cual los colectores solares pueden captar energía).

La eficiencia del secado puede calcularse con la fórmula:

$$E = \text{eficiencia secado} = \frac{100\ (L.M)}{I.A.\ H.\ (3\ 600)} \qquad \text{Ecuación 5.1}$$

donde:

L = calor latente de vaporización del agua contenida en el grano, kJ/kg
M = cantidad de agua removida del grano, kg
I = Flujo promedio de radiación solar, J/s - m²
A = Area de exposición del producto por secar, m²
H = Horas-sol transcurridas durante el experimento
3 600, factor de conversión, segundo/hora.

El calor latente de vaporización del agua en el grano, L, depende del contenido de humedad del mismo, y de la temperatura.

5.1.2 Secador de tipo "carpa" o "tienda de campaña"

El secador-colector es una armazón de madera forrada en todos sus lados con tela de polietileno transparente que se sujeta mediante reglillas de madera a la armazón. El fondo-absorbedor es una pieza de tela de polietileno negro. El producto que se desea secar se coloca dentro de la estructura de madera; para esto, se introduce por una portilla que el secador tiene en una de las paredes laterales. Esta portilla también sirve de salida para aire húmedo. En los laterales inferiores se dejan aberturas para el ingreso de aire fresco. (Fig. 5.2).

5.2 SECADORES SOLARES INDIRECTOS

5.2.1 Secador tipo "Tailandés"

En este tipo de secador el aire que va a usarse para el secado se calienta previamente en un colector solar; éste consiste en una caja rectangular cuyo fondo es una lámina metálica galvanizada pintada de negro y cuya cubierta es de un material transparente a los rayos solares, (vidrio, fibra de vidrio laminada, vinilo, polietileno, acrílico u otro).

Entre la lámina negra (absorbedor) y la cubierta se forma un ducto en el que circula el aire al que el absorbedor le transfiere energía calorífica que le aumenta su temperatura. Como consecuencia de este aumento de temperatura, la densidad del aire disminuye y entonces tiende a fluir hacia donde está el producto que se desea secar. Este flujo de aire se debe al fenómeno de convección, que en este caso se llama flujo por convección natural o libre. El aire así calentado circula a través de una capa de producto húmedo al cual quita humedad, mientras haya sol brillante (tiempo de horas-sol).

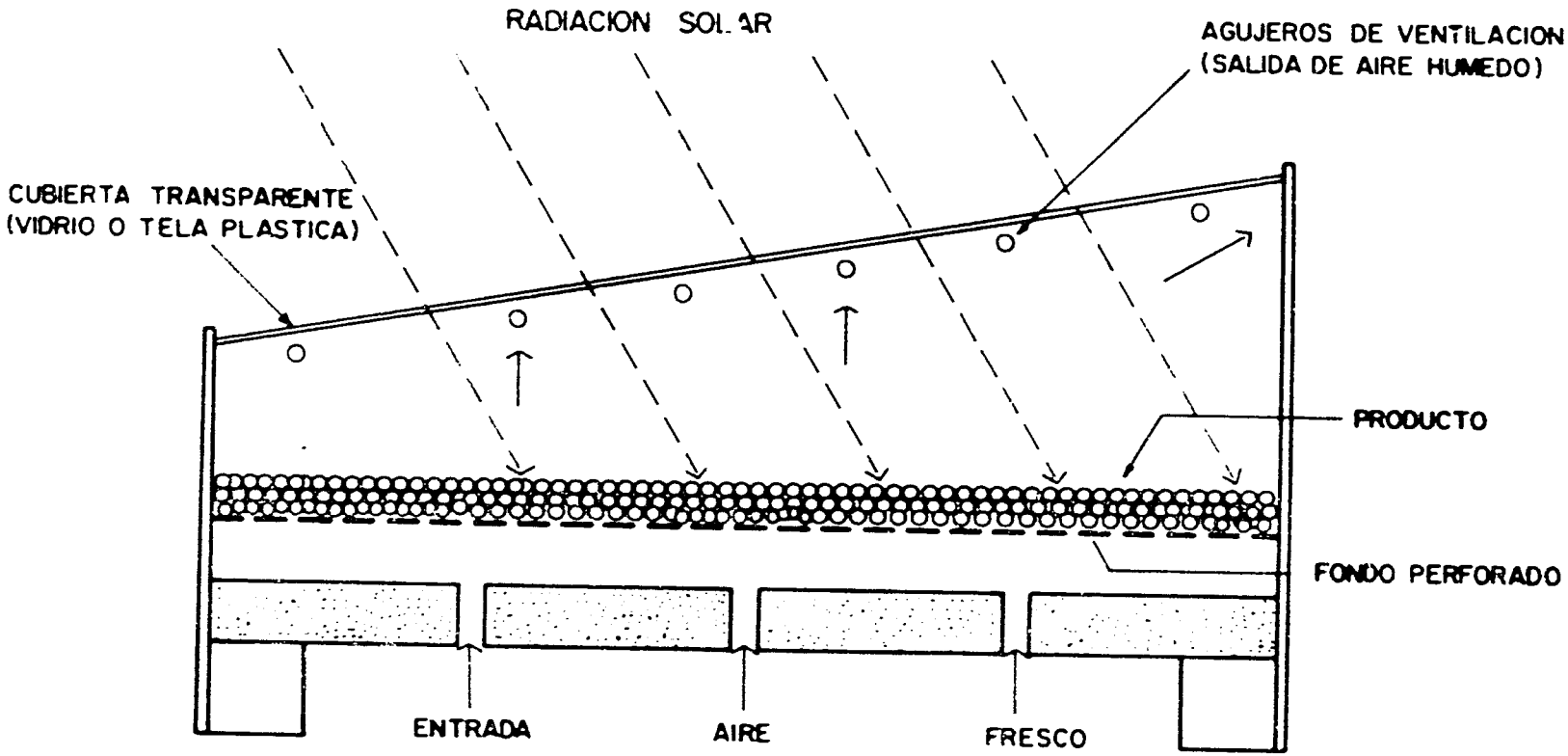
La cámara de secado, o secador, puede hacerse de madera forrada con lámina galvanizada, o de adobe. Dentro de la cámara se coloca horizontalmente una bandeja (para extender en ella el producto que se desea secar). Por un lado, el secador está acoplado al colector solar y por el otro, tiene puertas o un acceso por donde se introduce el producto y la bandeja. La bandeja puede ser hecha de forma similar a la del secador solar directo, con marco de madera o con ángulo de hierro (Fig. 5.3).

5.2.2. Secador Tipo "Wengert"

Está construido principalmente de madera y tela de polietileno. El absorbedor está formado por una pieza de polietileno negro extendida en el suelo y sujetada al cuerpo del secador por medio de reglillas de madera y clavos. La cubierta es de polietileno transparente o material similar. La cámara de secado es un compartimiento dentro del cual van colocadas bandejas hechas de madera y lámina metálica perforada. Al frente existen aberturas para permitir la entrada de aire fresco. El aire calentado dentro del colector circula a través de las bandejas y finalmente sale por la parte de atrás que es una chapa de madera con agujeros. La parte de atrás sirve también de acceso a la cámara de secado.

Este secador ha sido usado para secado de leña y granos. En el caso de secado de leña no se usan bandejas, y en el caso de granos, el uso de bandejas es opcional (Figs. 5.4, y 5.5).

***

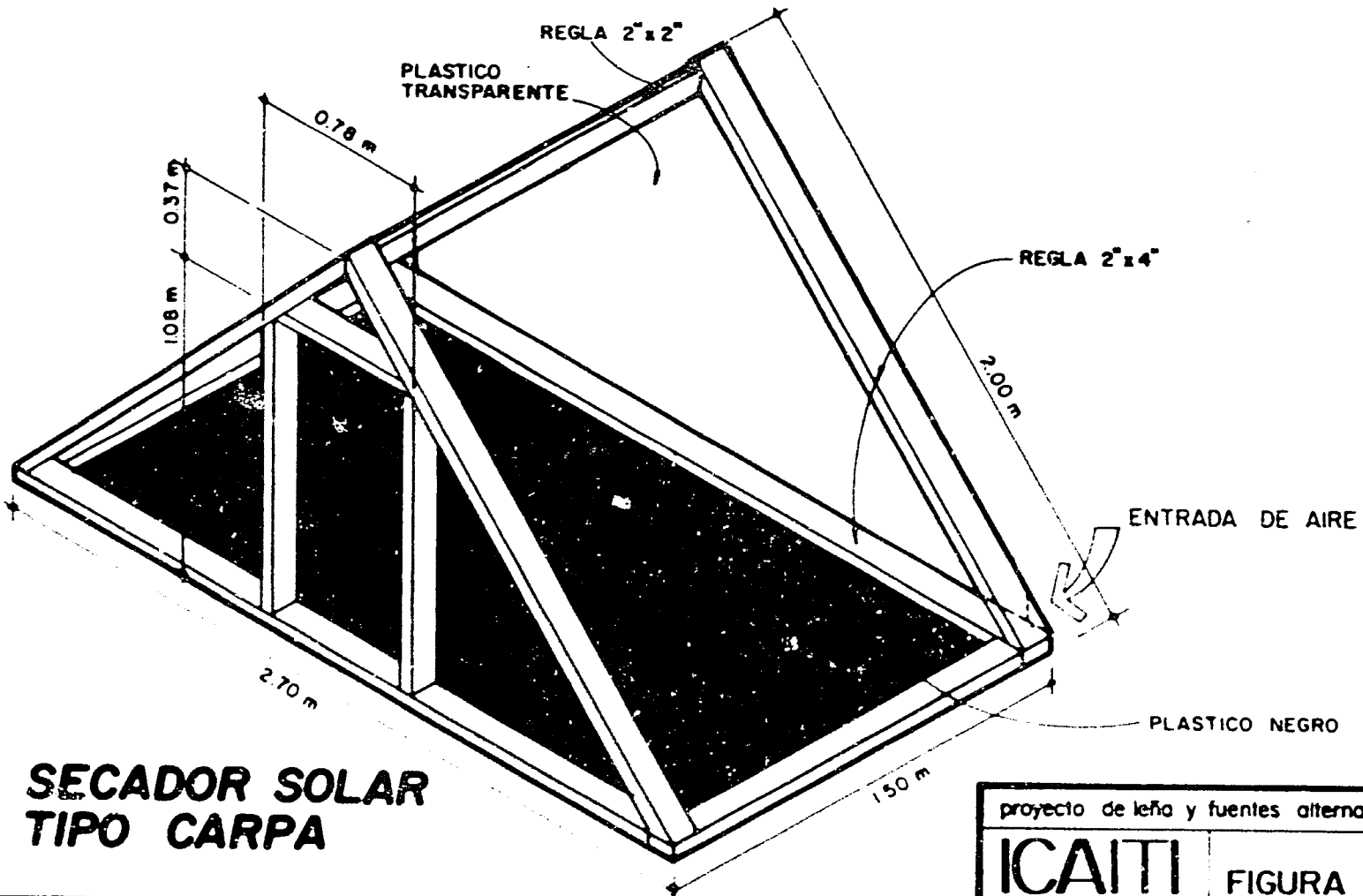


SECADOR DE CAJA CALIENTE (DIRECTO)

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

FIGURA 5.1



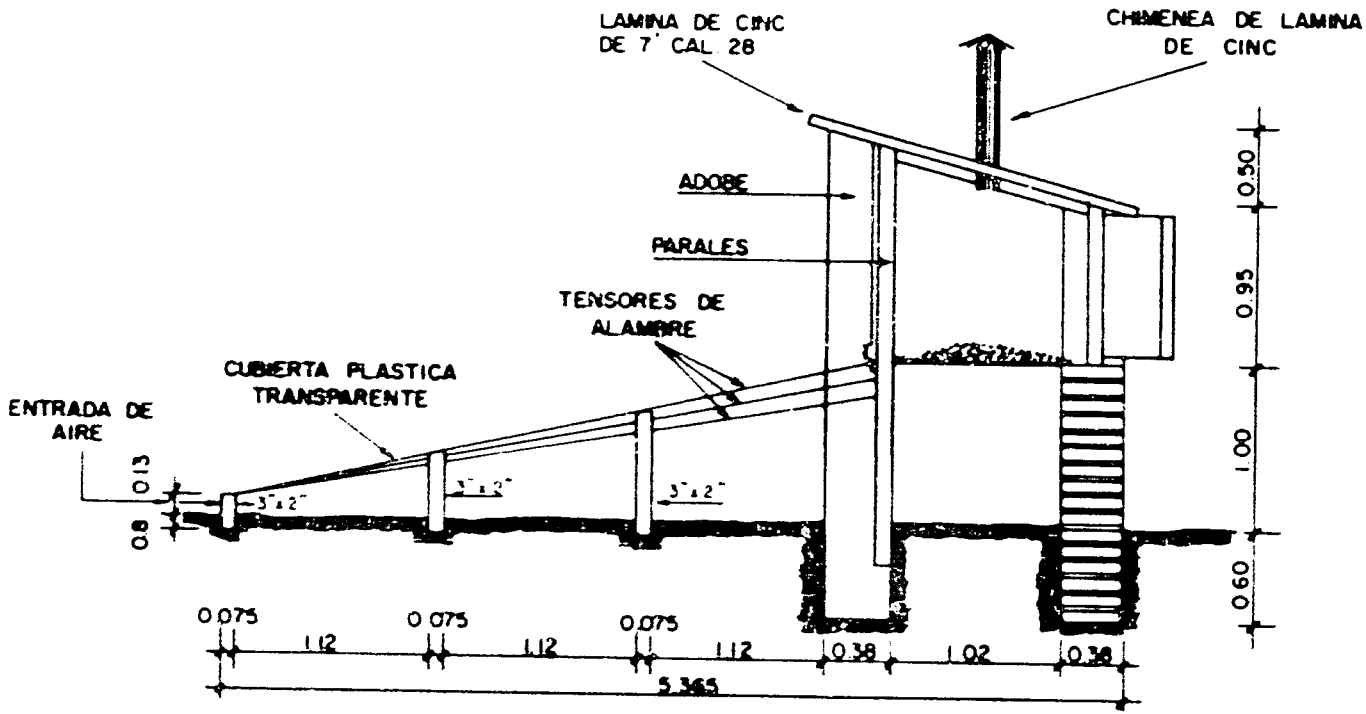
SECADOR SOLAR TIPO CARPA

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

FIGURA 5.2

1985



SECADOR SOLAR TIPO INDIRECTO

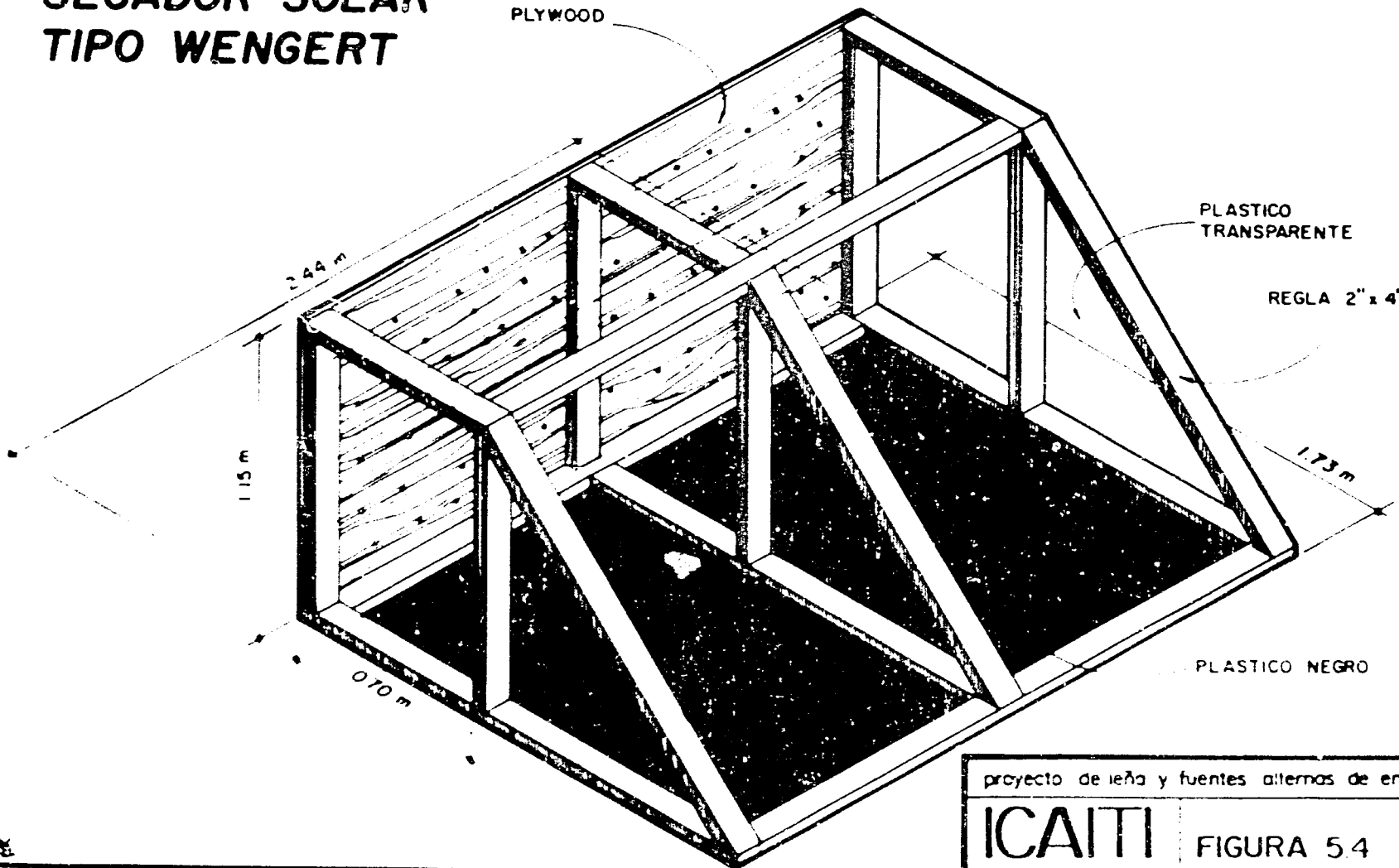
proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

FIGURA 5.3

1985

SECADOR SOLAR TIPO WENGERT

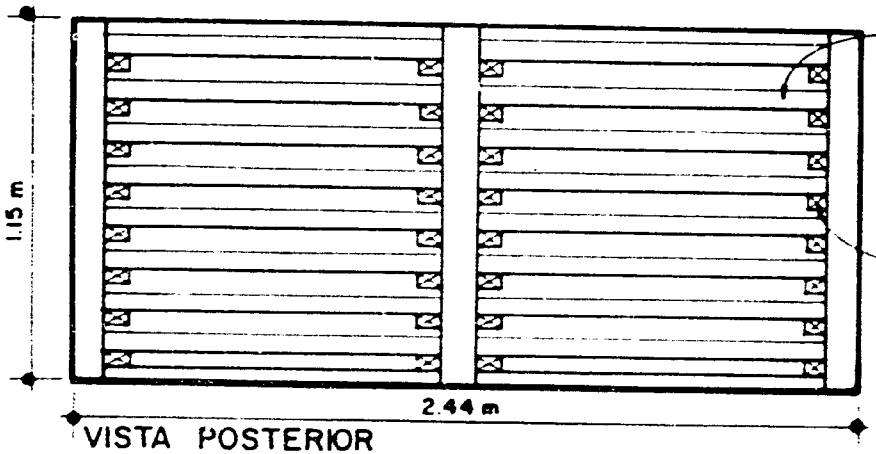


proyecto de leña y fuentes alternas de energía

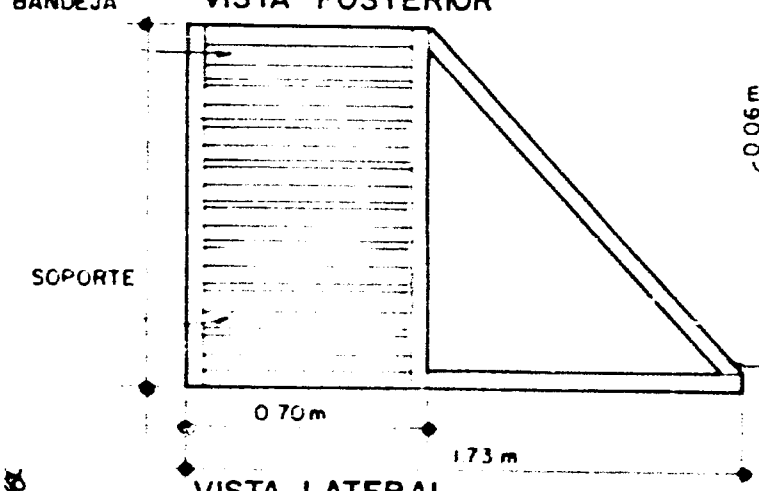
ICAITI FIGURA 5.4

1986

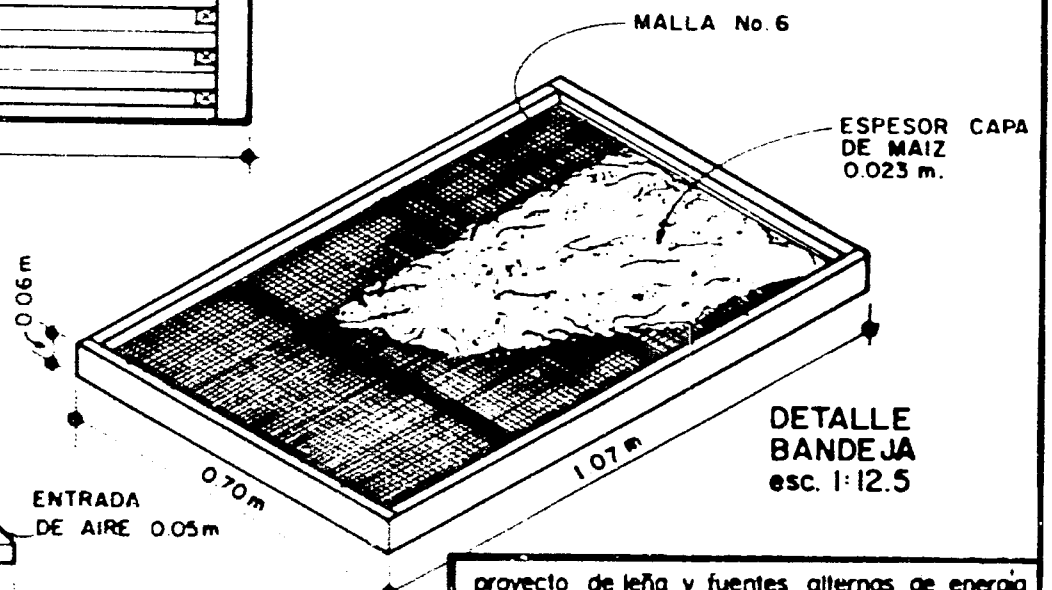
SECADOR SOLAR TIPO WENGERT CON BANDEJA



VISTA POSTERIOR



VISTA LATERAL



DETALLE BANDEJA esc. 1:12.5

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

FIGURA 5.5

1985

6. SECADORES SOLARES DE MEDIANA Y DE GRAN ESCALA

Se han diseñado y construido varios modelos o prototipos de secadores, tanto directos como indirectos, de mediana y de gran escala. Los de mediana escala, en su mayoría son similares a invernaderos, modificados de acuerdo a las necesidades. Los de gran escala normalmente son de tipo indirecto, es decir que tienen el colector (o colectores) separado del cuerpo del secador y requieren de equipos auxiliares tales como ventiladores, controles, etc.

Es importante señalar que para que un secador relativamente grande sea eficiente, es necesario que la velocidad con que el aire circule a través de la carga de material húmedo sea moderada y más o menos constante; esto solamente se logra impulsando el aire con un ventilador o soplador, lo que a la vez requiere de potencia eléctrica para el motor; por consiguiente, el diseño de un secador de este tipo debe hacerse con mayor cuidado que el de un secador de tipo doméstico.

6.1. COMPONENTES DE UN SECADOR DE MEDIANA/GRAN ESCALA

A. Colector solar

Esta es la parte principal del secador. Es el elemento que absorbe la energía solar y la convierte en energía térmica que se transfiere al aire y lo calienta, lo que disminuye la humedad relativa de éste y aumenta, como consecuencia, su capacidad para secar. Las partes del colector solar, así como los materiales de construcción ya fueron tratados anteriormente en el tema No. 4.

En los diseños de mediana escala se usa el colector como techo del secador, con lo que cumple así dos propósitos, uno puramente estructural y, el otro, como captador de la energía solar.

B. Cámara de secado

En los secadores tipo invernadero, la cámara de secado está constituida por todo el volumen libre del invernadero y es el espacio donde se coloca el material sólido por secar, ya sea

distribuido en el piso o en bandejas con fondo perforado o de malla.

En los secadores indirectos (tipo silo, por ejemplo), la cámara de secado está separada físicamente del colector y, por lo general, es un espacio cilíndrico con fondo perforado; en este caso los granos se colocan a granel y el aire fluye forzado por un ventilador, de abajo hacia arriba.

C. **Ventilador o soplador**

Este equipo se usa para mover el aire a través del producto que se desea secar. El aire fresco es succionado del ambiente exterior, y luego es forzado a través del colector para su calentamiento, pasa entonces entre el producto y sale hacia el ambiente exterior; parte del aire puede recircularse. Todo este trabajo es realizado por un ventilador o soplador. (Posteriormente se analizará el cálculo del motor necesario para cada caso particular, así como las opciones existentes).

D. **Distribuidor de aire (Plenum)**

Esta es una parte muy importante de la cámara de secado; distribuye uniformemente en la cámara el aire que llega del colector mediante un ducto circular o rectangular. El distribuidor consiste en un falso piso perforado, que puede ser de una plancha de metal con agujeros, una reja metálica o una reja de madera.

E. **Instrumentos**

Se requiere de algunos instrumentos para poder hacer la medición de las variables y las correcciones de los valores de las mismas.

Entre esas variables están:

I Temperatura de bulbo seco: Es una variable cuyo control es muy importante. Usualmente se mide con un termómetro de vidrio o de metal; su valor puede regularse variando el flujo del aire fresco o bien cambiando la relación aire recirculado/aire fresco.

II Temperatura de bulbo húmedo: Junto con la temperatura de bulbo seco permite calcular la humedad del aire. Puede medirse con un termómetro de bulbo húmedo, y regularse por la admisión de aire fresco y su mezcla con aire de recirculación, o mediante el rociado de agua (sprays) cuando la humedad interna del secador es muy baja.

III Velocidad del aire: La velocidad del aire (espacio/tiempo) y por consiguiente, el flujo volumétrico (volumen/tiempo) son variables de gran interés ya que la velocidad de secado depende de ellas.

Estos valores pueden medirse con instrumentos especiales que dan lecturas directas, tales como los anemómetros (de alambre caliente, de turbina), y velómetros. También puede usarse un tubo de Pitot (que requiere usar manómetros para medir presión y luego hacer una conversión de ese dato a velocidad lineal o flujo volumétrico).

F. **"Dampers" o compuertas**

Son válvulas reguladoras del flujo de aire que pueden colocarse en los ductos donde circula el mismo o en las paredes del secador. La regulación se consigue mediante ajustes manuales o automáticos, según sea el modelo.

6.2. CARACTERISTICAS DE SECADORES DE MEDIANA/GRAN ESCALA

6.2.1 Secadores de gran escala

Principalmente se han adaptado silos metálicos de almacenamiento de granos como secadores (Fig. 6.1); en este caso, el secador es de tipo indirecto y se requiere un sistema de colectores solares para calentar el aire antes de introducirlo al secador. También hay secadores horizontales que utilizan el mismo principio (Fig. 6.2); como la energía solar es variable en el curso de los días, de los meses y del año, estos secadores están provistos de algún sistema convencional para calentar el aire (quemadores de gas, diesel, intercambiador de calor con vapor) para cubrir los requerimientos energéticos del proceso, cuando la energía solar no sea suficiente.

Hay varias formas de colectar la energía solar, pero la más usual es el colector tipo "salchicha" de plástico inflado, que produce un calentamiento directo del aire (Fig. 6.5). También hay sistemas que utilizan el almacenamiento de calor en rocas; se usan instalaciones tipo invernadero para calentar las rocas y éstas liberan energía tanto de día como de noche ya que pueden almacenarla en cantidades útiles (Fig. 6.3).

En el cuadro siguiente se dan los datos de capacidad de algunos silos comerciales.

CUADRO No. 6.1

Capacidad de almacenamiento de silos

Diámetro de silos	Volumen útil	maíz	frijol	arroz
		qq	qq	qq
4.83 m (15 pies)	11.2 m^3 (394 pie^3)	176	189	142
7.32 m (24 pies)	25.68 m^3 (903 pie^3)	404	433	325
12.37 m (41 pies)	73.3 m^3 (2 580 pie^3)	1 156	1 238	930

6.2.2 Secadores de mediana escala

Se han construido secadores de mediana escala, principalmente tipo indirecto, es decir que tienen separado el colector del secador. Estos secadores normalmente son de estructura de madera forrados con plástico, madera o lámina metálica. El colector puede hacerse usando vidrio o plástico sobre una estructura de madera.

Los granos se colocan por lo general sobre bandejas con fondo de malla de alambre. Las bandejas van sostenidas en una estructura de madera. En la Figura 6.4 se ilustra el detalle del secador y del colector.

La capacidad de un secador similar al mostrado en la figura No. 6.4 es de 1 000 kg (20 qq) de arroz. Según un autor, para secar esa cantidad de arroz, colocado en capa de 105 mm - 150 mm , con una humedad inicial de 22% a 14% (base húmeda), se requieren 4 días con 7.5 horas de secado/día.

Este secador tiene una estructura de bambú y alambre y está forrado con plástico PVC transparente. Un secador similar se construye con estructura de madera aserrada y con la cámara de secado también de madera y colectores de plástico transparente. También se puede construir la cámara con adobe de barro y usar un colector de plástico.

A causa del flujo de aire tan reducido que circula por un secador de convección natural, la capa de granos no puede ser demasiado gruesa, y por consiguiente, no se puede diseñar un secador de capacidad muy grande.

6.3. ASPECTOS TECNICOS DE DISENO DE SECADORES SOLARES

Son varios los aspectos que considerar en el diseño de un secador solar, tales como: área del colector, área del secador, capacidad del secador, volumen de operación, volumen total, área de bandejas, número de bandejas, flujo de aire, temperatura de bulbo seco y húmedo, humedad del aire, caída de presión a través de la capa, altura de la capa, potencia del ventilador, etc.

A. Secadores de pequeña escala

A.1 Area del colector

Para secadores tipo "carpa" o "wengert" sin bandeja, lo más importante es el área de colección de energía o la de piso del secador, que va pintada o forrada con un material negro mate.

Para los modelos mostrados en Figuras 5.2 y 5.3, las áreas respectivas son 2.50 x 1.30 = 3.25 m^2 (Wengert) y se obtienen directamente de multiplicar las dos dimensiones de largo y ancho. Para otros requerimientos, es necesario tomar en cuenta las dimensiones comerciales de los materiales plásticos para evitar en lo posible tener que hacer uniones de dos tiras, lo cual requeriría de algún pegamento especial y de mano de obra adicional.

A.2 Capacidad

La capacidad está dada por el volumen neto de la cama o capa de granos (largo x ancho x grosor). Para una capa de 2.5 cm (1") el volumen neto sería de 0.081 m^3 para la carpa, y 0.056 m^3 para el secador "wengert" (2.58 pie^3 y 1.97 pie^3 respectivamente) lo cual corresponde a capacidades de 58 y 40 kilogramos (127 y 88 libras).

A.3 Volumen

Si se conservan fijas las dimensiones de la base, el volumen total lo determinan la altura y la forma geométrica del secador. En el caso del secador tipo "wengert" puede diferenciarse el volumen destinado al colector y el de la cámara de secado. En el caso de la carpa, la cámara de secado y el colector forman una sola unidad así que el volumen total es el producto de las dimensiones largo x ancho x alto, o sea 2.50 x 1.30 x 1.45 = 4.7 m^3.

En este tipo de secadores, las dimensiones se escogen de modo que haya facilidad de que la persona que opera el secador pueda entrar a cargarlo y descargarlo sin mayor problema.

A.4 Bandejas

En un secador tipo "wengert" hay posibilidad de emplear bandejas, si se modifica un poco la estructura de la cámara de secado. En la Figura 5.5 se ilustra el arreglo de las bandejas y las dimensiones más importantes.

Con un secador de este tipo es posible procesar, no solamente granos, sino también algunos vegetales. El material que se desea secar se coloca sobre las bandejas en una capa delgada (2 cm para maíz y fríjol) que permita el paso del aire, el cual se mueve únicamente por convección natural.

El marco de la bandeja puede ser de madera o de metal y el fondo puede ser de malla de alambre o de plástico; los agujeros deben ser de un tamaño menor que el del grano, para que éste quede retenido.

B. Secadores de mediana escala

Hay varias formas de calcular el área de un colector, de las cuales a continuación se describen dos.

Forma de cálculo No. 1

$$t - to = \frac{\tau \cdot \alpha \cdot It}{U} (1 - e^{-N}) \qquad \text{Ecuación 6.1}$$

N	=	UA/MC
U	=	Coeficiente global transferencia calor ($J/m^2 °CS$)
A	=	Area del colector (m^2)
M	=	Flujo de masa de aire (kg/s)
C	=	Calor específico del aire (J/kg°C)
τ	=	Transmitancia de la superficie transparente
α	=	Absorbancia de superficie negra
It	=	Energía solar incidente ($J/m^2 - S$)
t	=	Temperatura deseada en el aire(°C)
to	=	Temperatura promedio del ambiente(°C)

En la ecuación anterior, el área se obtiene conociendo el valor de N, el que a la vez implica el conocimiento de U, y M. El coeficiente de transferencia de calor U puede estimarse; el flujo de masa, M, en el caso de un secador de convección natural es muy difícil de calcular y solamente puede estimarse. El cálculo del área de colector resulta muy impreciso en esta forma.

Forma de cálculo No. 2

Si se conoce el valor de la radiación solar o la insolación en el sitio (kcal/m^2 - min o langleys/min) y si se sabe o estima la eficiencia del secador, se puede obtener un dato para el área, así:

$$E = \text{eficiencia} = \frac{\text{energía útil}}{\text{energía incidente}} = \frac{\dot{m} \cdot Cp \cdot \Delta t}{I_i A}$$

$$A = \frac{\dot{m} \cdot Cp \cdot \Delta t}{I_i \cdot E}$$ Ecuación 6.2

$\dot{m}$ = flujo de masa (kg/min)
Δt = ts-te del colector (°C)

La energía útil puede calcularse en función del calor de vaporización del agua en el grano así:

$$E \text{ útil} = m\,(hfg)$$ Ecuación 6.3

m = masa de agua que hay que evaporar por unidad de tiempo = peso inicial - peso final del producto (kg/min)

hfg = calor latente de vaporización (kcal/kg)

La masa de agua que hay que evaporar puede obtenerse del contenido de humedad inicial y final del material, y de la masa total del mismo. Esta segunda forma de calcular la energía útil y, por consiguiente, el área del colector, es mejor y más directa que la primera.

Capacidad

Al igual que los secadores de pequeña escala, la capacidad de un secador de mediana escala puede obtenerse de sus dimensiones y del grosor de la cama de producto que se seque. Para un secador del tipo de la Figura 6.5 el grosor de la cama determina la caída de presión en la misma y, por consiguiente,

el flujo de aire; en este caso puede analizarse la Figura 6.6 en la que se plantean las ecuaciones que siguen:

$$P_2 = P_1 - h_1 d^* g$$

$$P_3 = P_4 + h_2 d^* g \qquad \text{Ecuaciones 6.4}$$

$$P_4 = P_1 - (h_1 + h_2) d^* g$$

La diferencia de presión en la capa está dada por:

$$P_2 - P_3 = (h_1 + h_2)(d - d^*)g \qquad \text{Ecuación 6.5}$$

d_* = densidad del aire ambiente (kg/m^3)
d^* = densidad del aire dentro del secador (kg/m^3)

El gradiente de presión en la capa es:

$$\frac{dp}{dx} = \frac{(P_2 - P_3)}{x} \qquad \text{Ecuación 6.6}$$

Para gradientes pequeños, el flujo es laminar y directamente proporcional a dp/dx; por consiguiente el flujo de aire es:

$$F = \frac{k\, dp}{dx} \qquad \text{Ecuación 6.7}$$

F = Flujo volumétrico de aire $m^3/min\text{-}m^2$
k = Coeficiente de proporcionalidad; para arroz, k = $0.03 m^3/Pa\text{-}min$
P = Presión (Pa)
x = Profundidad de capa (m)

Si se denota por N al número de cambios del volumen de aire/tiempo, se tiene:

$$N = \frac{F}{x} \quad (m^3/min\text{-}m^2\text{-}m) \qquad \text{Ecuación 6.8}$$

Esto puede calcularse en función del requerimiento de aire para remover determinada cantidad de agua. De aquí puede calcularse x, o sea el grosor de la capa.

Ejemplo: Se desea secar 1 000 kg de arroz de un contenido de humedad de 20% (base húmeda), hasta alcanzar la humedad de 14%, con un secador de tipo indicado en las figuras 6.4 y 6.6, en un lugar donde la temperatura del ambiente es de 30°C, y la humedad relativa 80 por ciento y se tiene 1 atm presión. El aire a la salida del secador se requiere con una humedad relativa de 95 por ciento. El colector proporciona aire a 45°C, con una humedad relativa de 35 por ciento.

Para calcular la cantidad de aire se tiene lo siguiente:

Base: 1 kg arroz

De la tabla psicrométrica (Figura 2.1) se obtiene un valor de humedad del aire igual a 0.022 kg agua/kg aire seco inicial.

El calentamiento en el colector proporciona aire de igual humedad absoluta, y a 45°C, con una humedad relativa de 35 por ciento. El aire se humedece al seguir un proceso de enfriamiento adiabático (al secar el grano) hasta llegar al 95 por ciento de humedad relativa y un contenido de humedad absoluto de 0.029 kg agua/kg aire seco. Sin embargo, el aire en equilibrio con arroz, a 14 por ciento de humedad, tiene una humedad absoluta de 0.0266 y una relativa de 75 por ciento.

La diferencia de humedad es 0.0266 - 0.022 = 0.0046 kg agua/kg aire seco.

La cantidad de agua que ha de extraerse del arroz es:

$$mw = \frac{wi\ (mi-mf)}{100 - mf} = \frac{1\ kg\ (22-14)}{100 - 14} = 0.093\ kg$$

mw = Masa de agua evaporada
wi = Masa inicial del producto húmedo
mi = Humedad inicial (base húmeda) del producto
mf = Humedad final

Esta humedad aumentará la humedad absoluta del aire, así que la masa de aire seco (ma) resulta ser:

$$ma = \frac{0.093 \text{ kg agua}}{0.0046 \text{ kg agua/kg aire}} = 20.2 \text{ kg aire seco}$$

O sea:

$$V = \frac{maR_0t}{p}$$

$$V = 20.2 \text{ kg aire seco} \times \left(0.291 \frac{\text{k pa.m}^3}{\text{kg°K}}\right)\frac{308 \text{ °K}}{101.3\text{kpa}}$$

$$V = 17.9 \text{ m cúb/kg arroz}$$

Para secar 1 000 kg de arroz es necesario un volumen así:

$$v = 17.9 \text{ m}^3\text{aire/kg arroz } (1\ 000 \text{ kg arroz})$$

$$= 17\ 900 \text{ m}^3 \text{ aire}$$

Si se supone que la operación durará 30 horas, puede hacerse en cuatro días (7.5 horas/día). Entonces el flujo de aire será:

17 900 m cúb/1 800 min = 9.94 m cúb/min

Si la densidad del arroz es de 600 kg/m^3 entonces resulta:

$$\frac{1\ 000 \text{ kg arroz}}{600 \text{ kg/m cúb}} = 1.67 \text{ m cúb arroz}$$

O sea un flujo de aire (m cúb. aire/m cúb. arroz-min) de:

(9.94 m cúb/min)/(1.67 m cúb arroz) = 5.95

De la definición de N, se desprende que su valor será igual a 5.95. Entonces el grosor de la capa será:

$$x = F/N = \frac{k(dp/dx)}{N}$$

$$x = \frac{0.03\ (\ (h1 + h2)(d-d^{*})g)}{5.95\ (x)}$$

$$x = (0.03(4x0.05419x9.8)/5.95)^{0.5} = 0.103\ m$$
$$= 103\ mm(4")$$

Cálculo del área de la capa

Ab = 1.67 m cúb/0.103 m = 16.2 m cuad.

Cálculo del colector, sobre la base de una eficiencia estimada E = 0.25 y un valor de
Il = 15 mJ/m cuad-día:

Q útil = IlE(tiempo) = (15 mJ/m2-día)0.25(4 días)

Q útil = 15.00 mJ/m cuad.

Q necesario = 93 kg agua x 2.8 mJ/kg = 260.4 mJ

Area = Q necesario/Q útil = 260.4 /15.00 = 17.36 m2

Una regla simple es usar un área de colector igual al triple del área del grano o sea:

$3 \times 16.2\ m^2 = 48.6\ m^2$.

Lo anterior equivale a 2.8 veces el área calculada. Este último valor es más seguro.

C. Secadores de Gran escala

Son varios los aspectos importantes que hay que considerar en este tipo de secadores, entre ellos, los siguientes: la relación altura/diámetro, la altura de la capa, el flujo de aire, la potencia del ventilador, etc.

C.1 Relación altura/diámetro, Capacidad

Esta relación es variable pero puede emplearse un valor de 5/3. La capacidad máxima de un silo secador será de 300

toneladas, y el factor limitante, la potencia del ventilador.

C.2 Cálculo de la caída de presión en la capa de grano:

Los granos ofrecen resistencia al paso de aire según el tipo de grano, la velocidad del aire, el contenido de impurezas.

Para granos "limpios" puede calcularse la caída de presión por la ecuación siguiente:

$$\frac{\Delta p}{x} = \frac{a(F/A)^2}{\ln(1 + b(F/A))} \qquad \text{Ecuación 6.9}$$

Δp = Caída de presión ($^{mm}H_2O$)
x = Altura de la capa de grano (m)
F = Flujo volumétrico de aire (m^3/min)
A = Area del silo (m^2)
a, b = Constantes específicas del grano (Cuadro No. 6.2)

CUADRO No. 6.2

Constantes a y b de diferentes granos, para uso en la ecuación 6.9.

Grano	a	b
Maíz	0.5829	0.5117
Soya	0.3228	0.3018
Trigo	0.8246	0.1640
Cebada	0.6186	0.2296
Arroz	0.7012	0.2300
Avena	0.7170	0.2427

C.3 Caída de presión en fondos perforados

Cuando los agujeros del fondo perforado del silo tienen un área mayor que 10 por ciento del área total, la resistencia de ese fondo es despreciable. Comercialmente los agujeros de

fondos perforados tienen más del 30 por ciento del área.

Para calcular la caída de presión puede utilizarse la siguiente ecuación:

$$\Delta p = 30.4 \times 10^{-6} \frac{(F/A)^2}{e.f} \qquad \text{Ecuación 6.10}$$

Δp = Caída de presión (mm de agua)
F = Flujo volumétrico (m^3/min)
A = Area del silo (m^2)
f = Fracción del área total que está perforada
e = Porosidad del grano

C.4 Para el cálculo de la potencia del ventilador adecuado, puede usarse la siguiente ecuación:

$$Pot = \frac{F.\ \Delta p}{4\ 570\ Ev} \qquad \text{Ecuación 6.11}$$

Pot = Potencia requerida del motor (Hp)
F = Flujo (m^3/min)
Δp = Pérdida de presión (mmH20)
Ev = Eficiencia del ventilador

C.5 Flujos de aire o relaciones de aireación para granos de uso industrial o de consumo directo.

Es necesario establecer relaciones de aireación mínima para impedir que haya deterioro en el grano, principalmente por la acción de hongos y en especial en las etapas iniciales cuando el grano tiene un alto contenido de humedad.

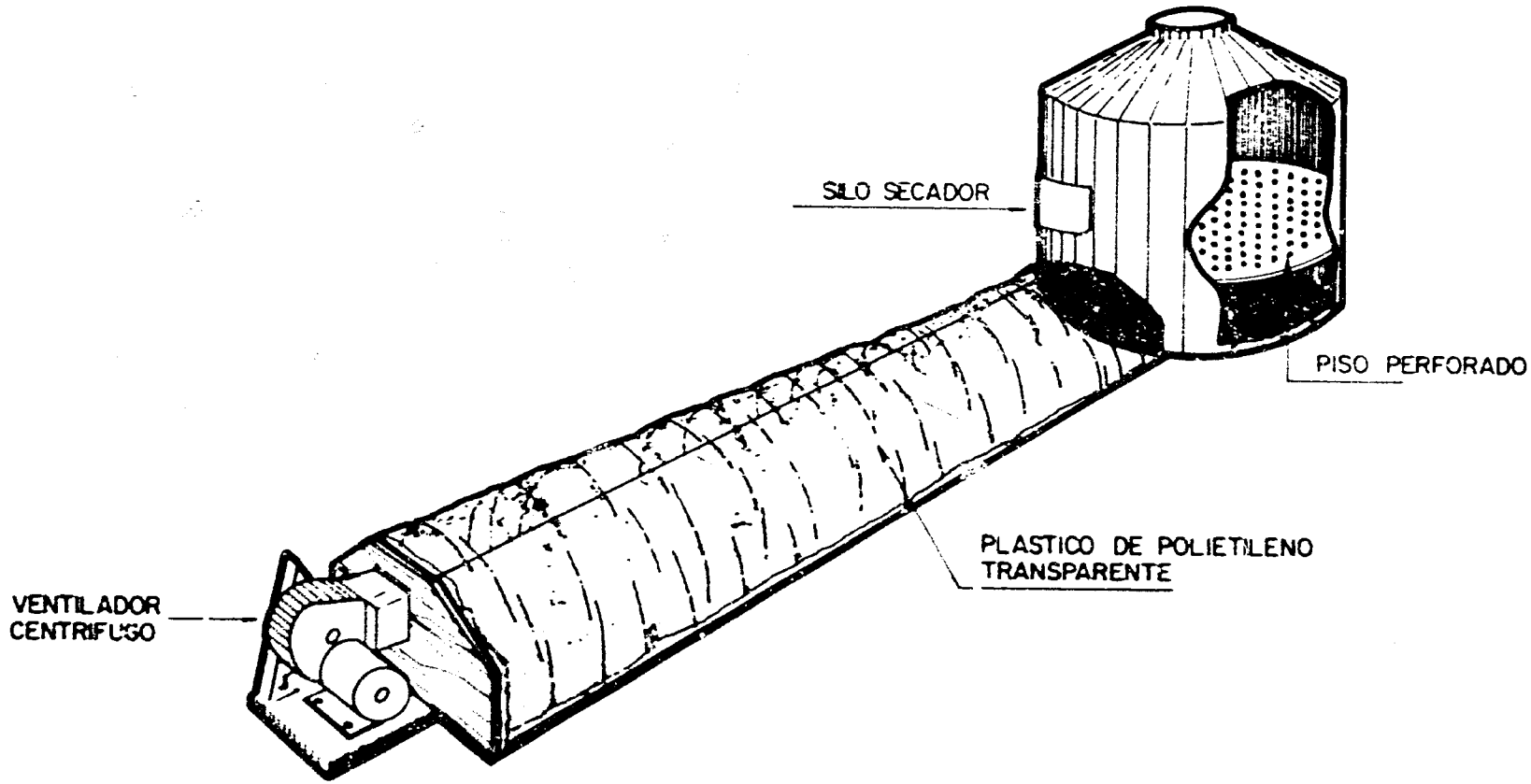
Se han establecido dichas relaciones experimentalmente (Ron) para algunos granos, y resultan ser función de la temperatura y de la humedad relativa del aire, así como de la humedad inicial del grano. En el Cuadro No. 6.3 se dan algunos valores aplicables a maíz, soya y trigo.

CUADRO No. 6.3

Humedad inicial (base húmeda)	Aireación mínima (*) (m^3 min-ton)
16	2 - 3
20	2 - 4
30	4 - 25

(*) Intervalo de valores para temperatura del aire 10-30°C y humedad relativa 40-80 por ciento

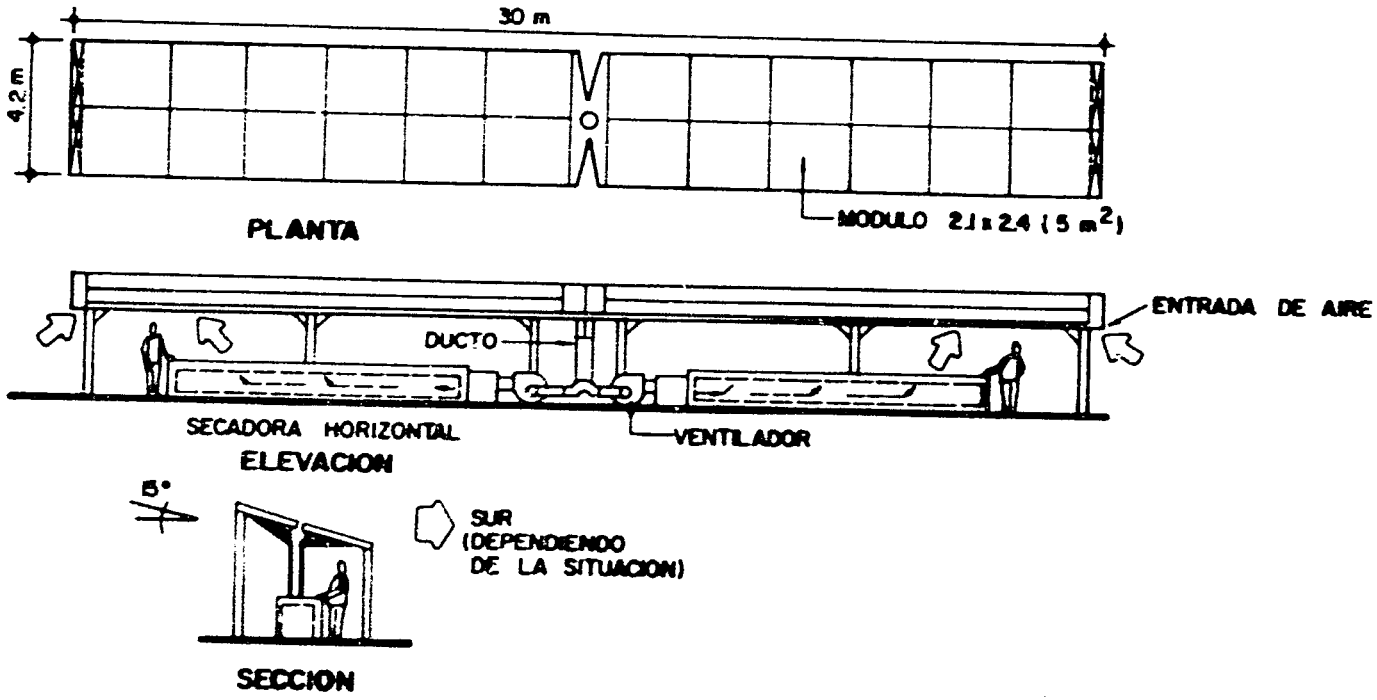
***



SILO SECADOR CON COLECTOR SOLAR INFLABLE

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI | FIGURA 61

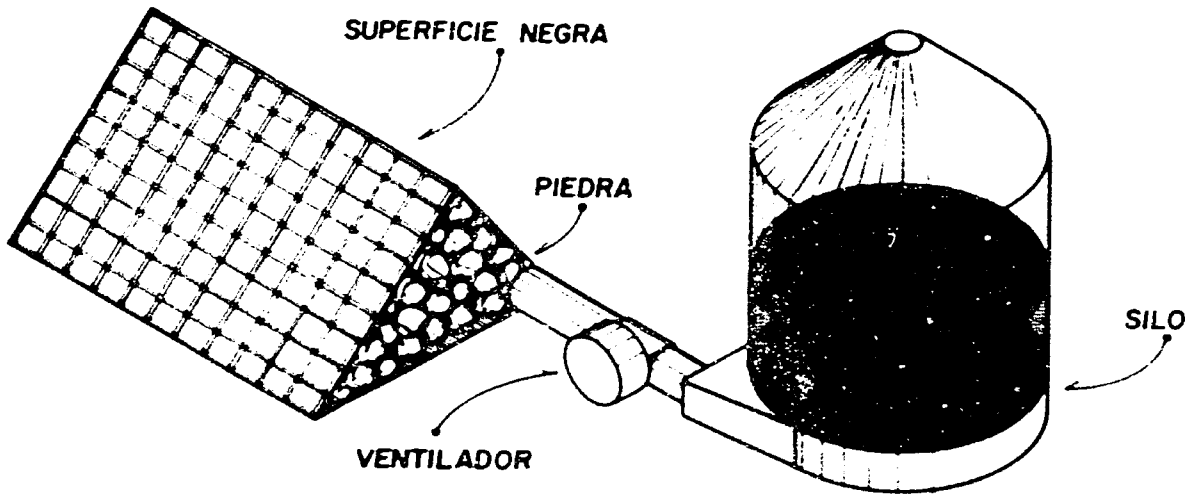


SECADOR SOLAR INDIRECTO CON CAMARA DE SECADO TIPO TUNEL

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

FIGURA 6.2



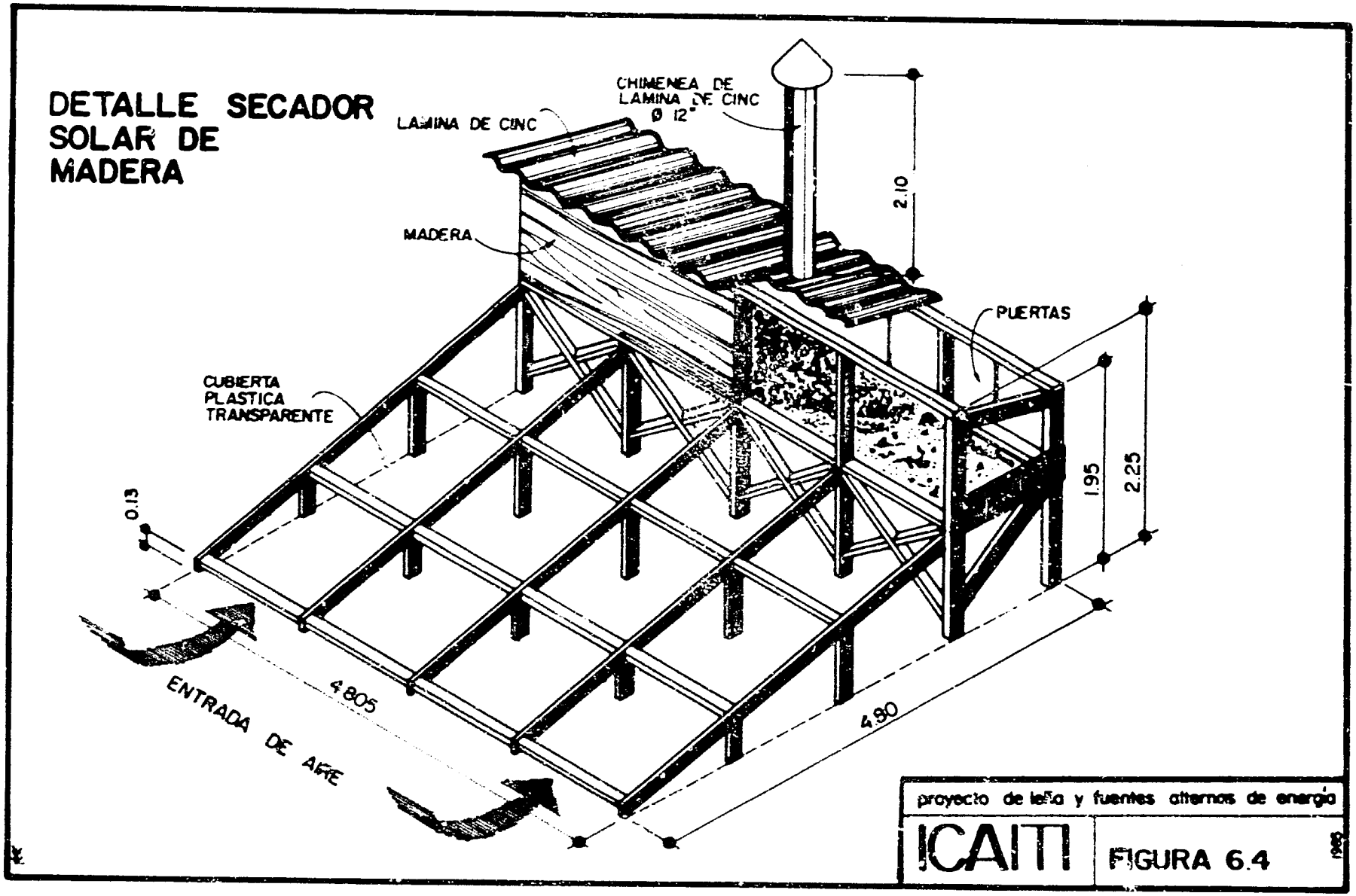
COLECTOR DE CALOR SOLAR CON ABSORBEDOR DE PIEDRA

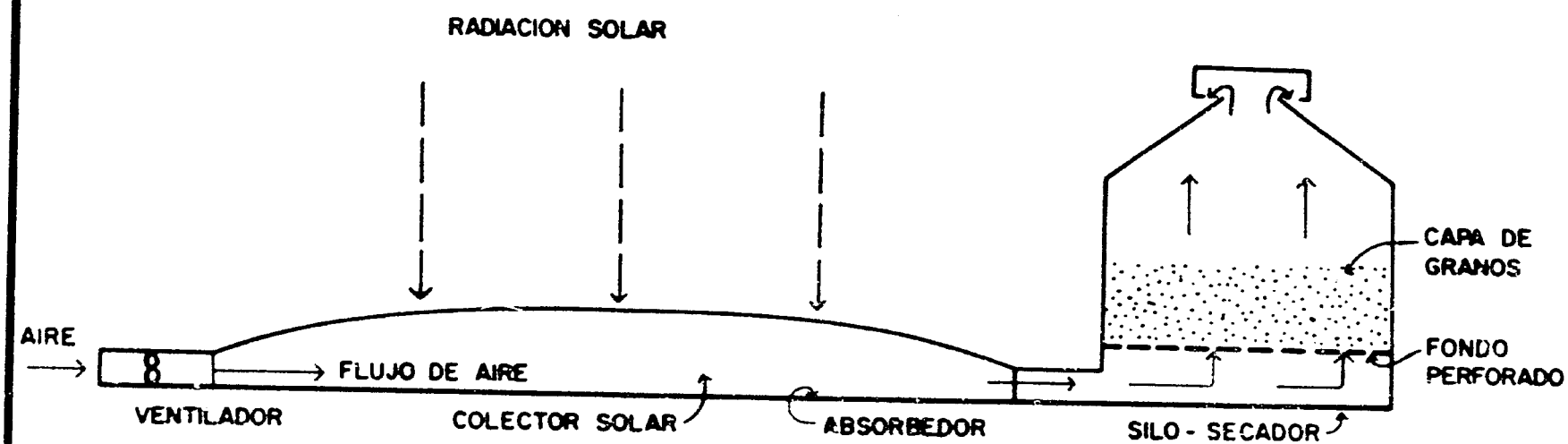
proyecto de leña y fuentes alternas de energia

ICAITI

FIGURA 6 3

1985


DETALLE SECADOR SOLAR DE MADERA
LAMINA DE CINC
CHIMENEA DE LAMINA DE CINC Ø 12"
2.10
MADERA
PUERTAS
CUBIERTA PLASTICA TRANSPARENTE
0.13
1.95
2.25
4.805
4.90
ENTRADA DE AIRE
proyecto de leña y fuentes alternas de energía
ICAITI
FIGURA 6.4
1985



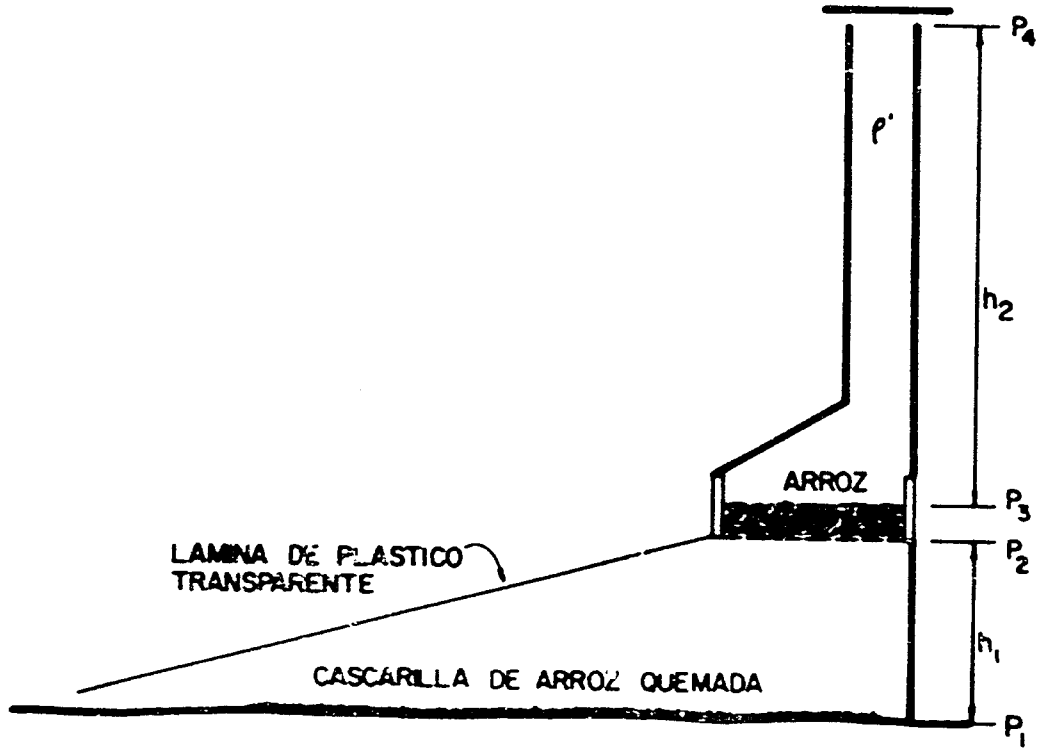
SILO - SECADOR CON COLECTOR SOLAR INFLABLE

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

FIGURA 6.5

1980



CORTE DE UN SECADOR SOLAR PARA ARROZ, TIPO INDIRECTO

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

FIGURA 6.6

1980

7. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DE OPERACION

Se ha efectuado bastante trabajo experimental sobre secado de granos y alimentos mediante energía solar, pero no se conoce mucho el detalle de las diferentes condiciones dentro de las que se ha realizado dicho secado. En esta sección se trata de hacer un resumen muy general de diversos trabajos hechos, para obtener algunas indicaciones de tipo general que puedan aplicarse en operaciones comerciales de secado.

7.1 CURVAS DE SECADO

La principal curva es la de humedad (M) en función del tiempo (t). En las Gráficas 7.1, 7.2, y 7.3 se presentan algunos resultados experimentales; para su mejor interpretación se dividirán en secadores de pequeña escala y de mediana/grande escala.

7.1.1 Pequeña escala

Se dispone de datos para secado de frijol, maíz y arroz en secadores de pequeña escala, tanto de tipo directo, como indirecto.

La característica común que muestran dichas curvas, es que la humedad del grano experimenta un cambio fuerte al inicio y luego ocurren rehidrataciones nocturnas (cuando no hay energía solar), las cuales producen oscilaciones entre valores altos y bajos de humedad. Sin embargo, la humedad promedio tiende a bajar y llegar a valores de equilibrio mucho más bajos que los alcanzados por las muestras de control expuestas al aire.

Lo anterior indica que el tiempo de secado será menor dentro del secador que al aire libre (aproximadamente un 20-35%), que se pueden alcanzar humedades más bajas, y que, por consiguiente, se puede tener un factor de seguridad mayor para el almacenamiento de granos.

7.1.2 **Mediana/gran escala**

En mediana y gran escala se dispone de menor número de curvas experimentales, aunque pueden mencionarse algunas como las que se ilustran en la Figura 7.4.

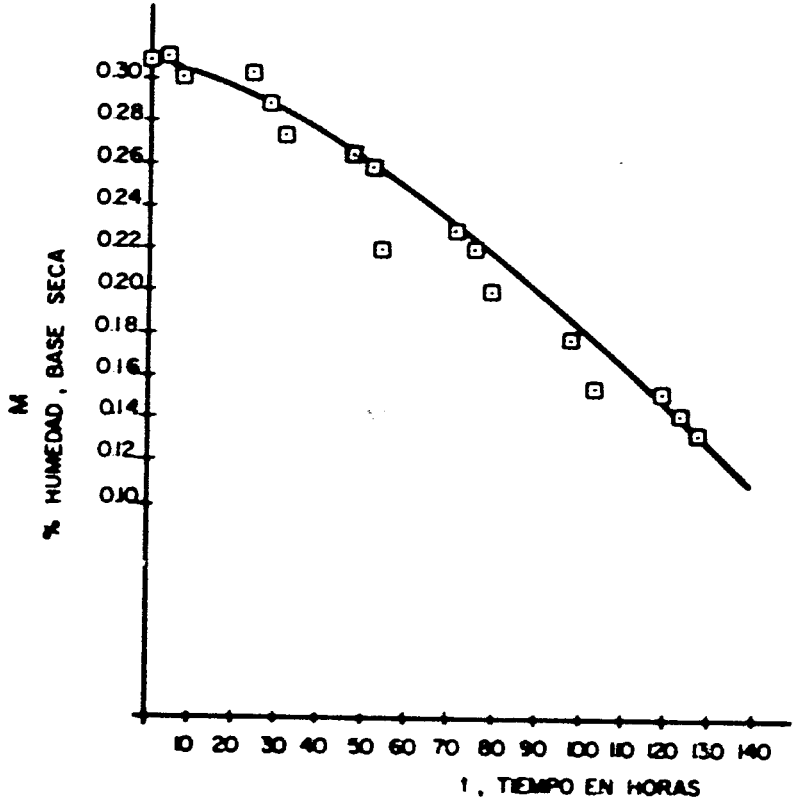
En los silos para secado, la capa de grano muestra varias zonas de diferentes condiciones de humedad; como el aire seco (relativamente) entra por un fondo perforado, la parte más baja es la más seca; luego existe una zona de secado en la cual el contenido de humedad del grano es menor que el inicial, pero en la que aún no se ha alcanzado el equilibrio con el aire. Luego sigue una zona húmeda (Figura 7.5) donde se dan las condiciones de humedad similares a las iniciales. En esta última zona hay mayor probabilidad del desarrollo de hongos, si no se seca lo suficientemente rápido.

En este caso, nuevamente se observa la misma tendencia indicada en la discusión de los secadores de pequeña escala; es decir, un descenso inicial de la humedad y luego re-hidrataciones periódicas durante las noches, con una tendencia general a disminuir el contenido de humedad con el tiempo.

7.2. CONDICIONES DE OPERACION

Estas se han resumido en los Cuadros 7.1 al 7.5 donde se indican las principales variables de operación. Aquí se consignan algunos de los trabajos realizados, con el objeto de establecer ciertas directrices de tipo general, y no se pretende en ningún caso, realizar una investigación bibliográfica exhaustiva, que está fuera del alcance de este curso.

***



CIELO: NUBLADO

I_i = 365 Cal/cm^2 dia

● Tamb.,°C · DIA: 26.5 · NOCHE: 22

● HUMEDAD REL. % · DIA: 61 · NOCHE: 80

⊡ DATOS EXPERIMENTALES

CURVA DE SECADO PARA ARROZ MEDIANTE SECADOR SOLAR INDIRECTO

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

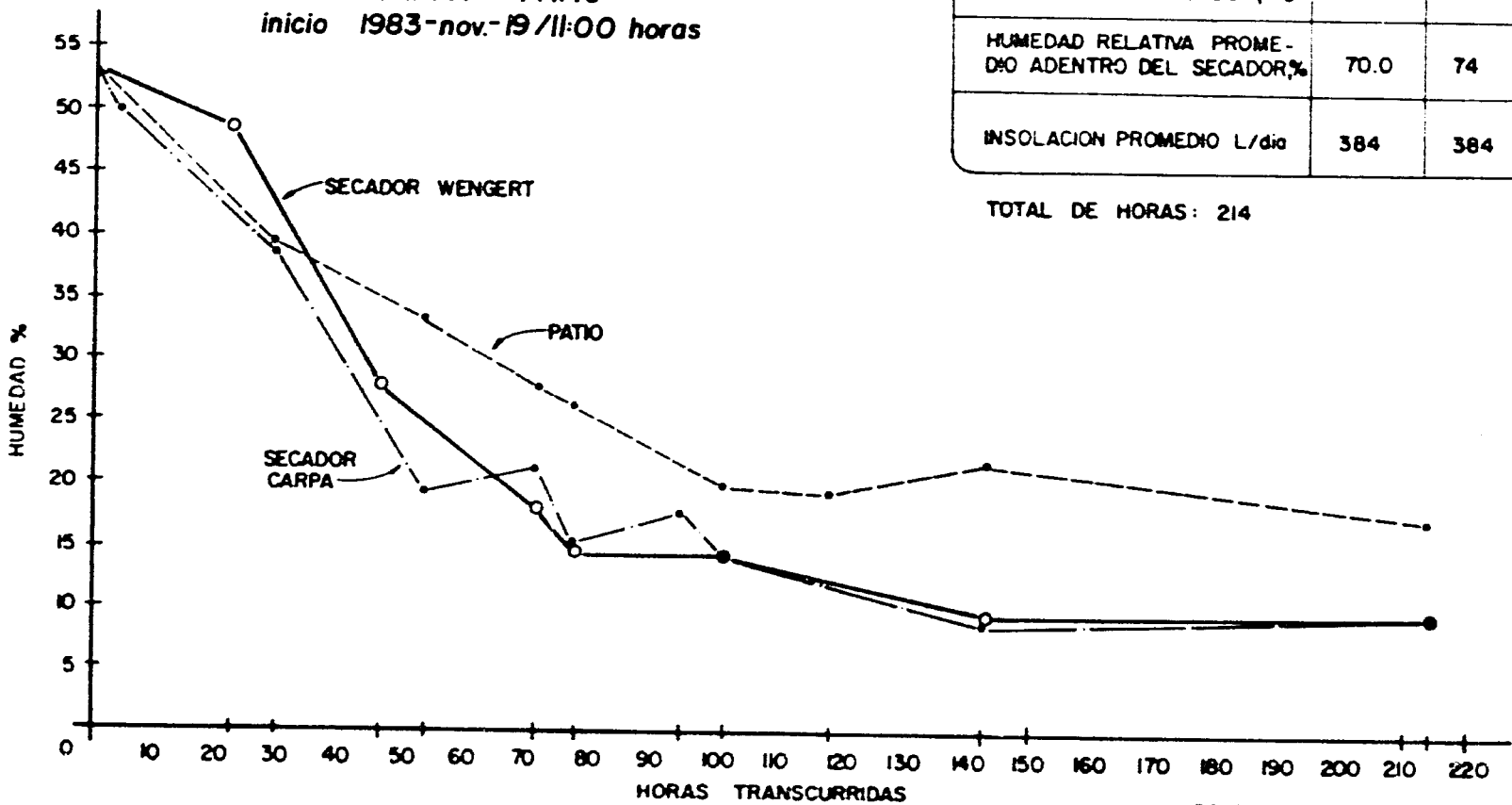
FIGURA 7.1

1980

CURVA DE SECADO
SECADO DE FRIJOL EN VAINA
SECADOR SOLAR WENGERT, SECADOR SOLAR CARPA Y PATIO
inicio 1983-nov.-19/11:00 horas

	WENGERT	CARPA	MUESTRA
TEMPERATURA PROMEDIO ADENTRO DEL SECADOR, °C	23.9	23.5	18.5
HUMEDAD RELATIVA PROMEDIO ADENTRO DEL SECADOR,%	70.0	74	80.4
INSOLACION PROMEDIO L/dia	384	384	384

TOTAL DE HORAS: 214



proyecto de leña y fuentes alternas de energía

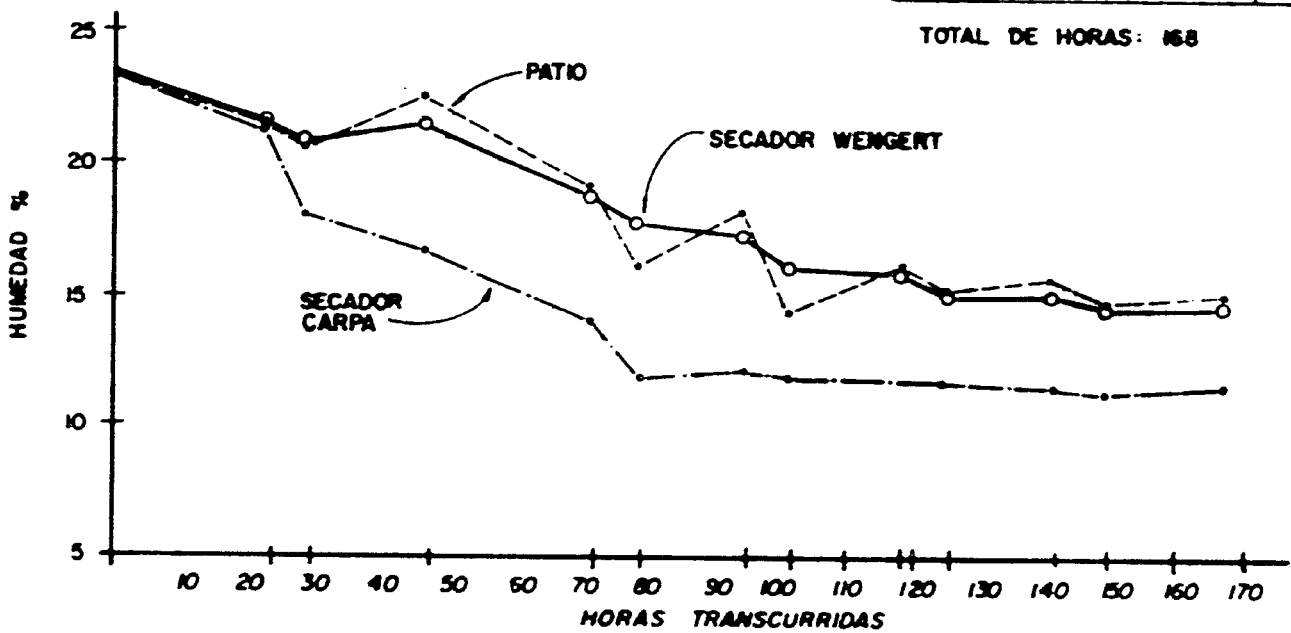
ICAITI

FIGURA 7 2

CURVA DE SECADO
SECADO DE MAIZ EN GRANO
PORCENTAJE (%) DE HUMEDAD EN EL GRANO
SECADO EN BANDEJAS EN EL SECADOR
TIPO WENGERT, CARPA Y PATIO.

	WENGERT	CARPA	MUESTRA
TEMPERATURA PROMEDIO ADENTRO DEL SECADOR, °C	23.4	26.4	18
HUMEDAD RELATIVA PROMEDIO ADENTRO DEL SECADOR, %	75.6	65.0	86.4
INSOLACION PROMEDIO L/dia	460	460	460

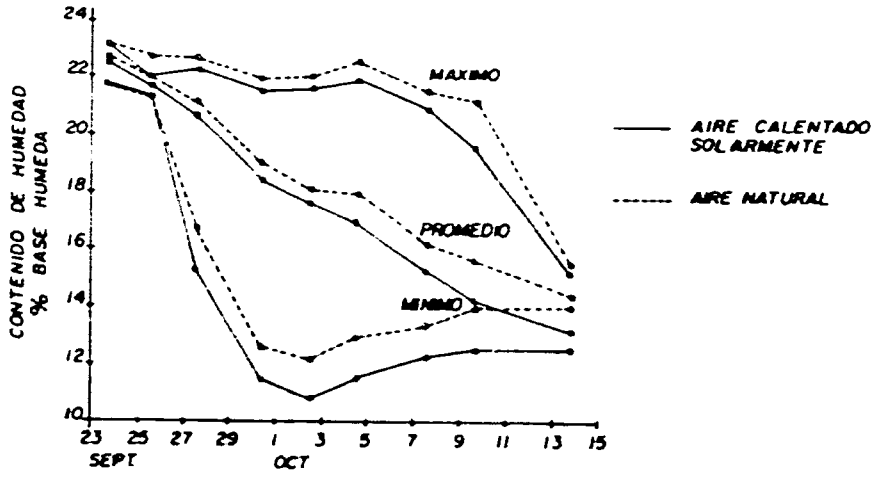
TOTAL DE HORAS: 168



proyecto de leña y fuentes alternas de energía

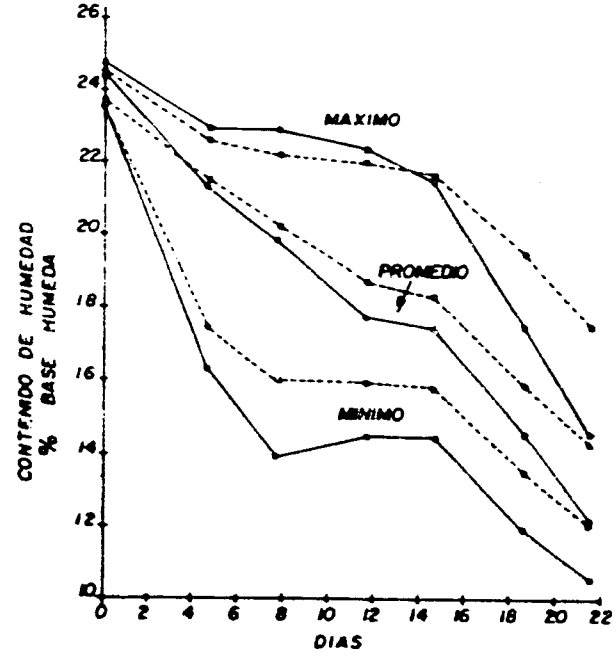
ICAITI

FIGURA 7.3



CAMBIOS EN EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL MAIZ SECADO CON AIRE NATURAL Y CON AIRE CALENTADO SOLARMENTE

PRUEBA No. 1



CAMBIOS EN EL CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SORGO

PRUEBA No. 4

Nota: Las pruebas fueron realizadas con el equipo y bajo las condiciones siguientes:

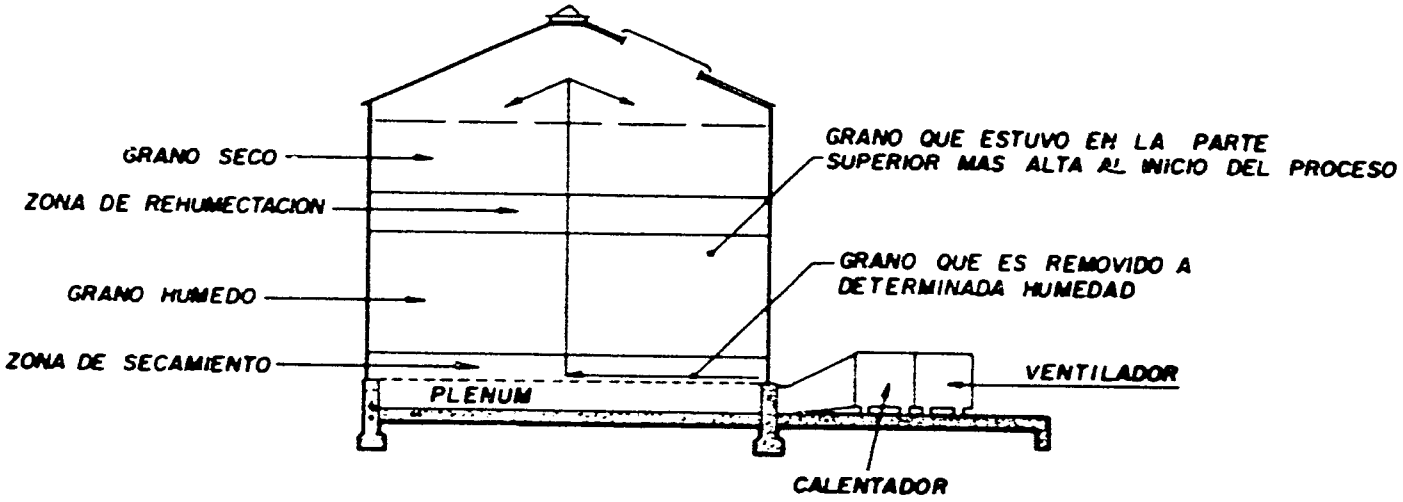
- SILO DE ACERO
  Diámetro de 4.57m
- VENTILADOR AXIAL
  Potencia = 560 W (3/4 Hp)
  Diámetro = 0.31 m
  Flujo de aire = 1.18 m^3/s
- COLECTOR SOLAR
  material: Polietileno
  tipo: Arreglo tubular con absorbedor inflable color negro, de 0.86 m de diámetro. Cubierta inflable de polietileno transparente, de 0.99m diám. Longitud colector: 30.5m.

Fuente: CONVERSE H. Low Temperature grain drying with solar heat. Transactions of the ASAE, 1978.

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

FIGURA 7.4



DIFERENTES ZONAS EN UN SILO SECADOR DURANTE EL PROCESO DE SECADO

proyecto de leña y fuentes alternas de energía

ICAITI

FIGURA 7.5

CUADRO 7.1

Descripción de las Pruebas de secado de granos:

	PRUEBA No. 1	PRUEBA No. 2
Condiciones*	A.S. maíz	A.S. sorgo
Diámetro silo, m	4.57	4.57
Altura de llenado, m	1.40	1.68
Contenido promedio de humedad, %		
inicial	22.60	24.30
final	13.20	12.10
Tiempo de operación del ventilador, días continuos	26	22
Razón de flujo de aire por minuto. Volumen-aire / Volumen-grano **	2.04	1.65

* A. S. = aire calentado con colector solar

** Volumen de grano secado a un contenido de humedad de 15.5%

CUADRO 7.2

Condiciones ambientales e incidencia de radiación solar durante el período de secado

	PRUEBA No. 1	PRUEBA No. 2
Temperatura del aire ambiente, promedio - °C	15.3	14.2
Humedad relativa promedio %	55	62
Radiación solar diaria KJ/m^2 *	14 661	16 762
Duración	20	22

* Incidente sobre superficie horizontal

CUADRO 7.3

Características y funcionamiento del sistema de colector solar de calor

	PRUEBA No. 1	PRUEBA No. 2
Area colectora m^2	26.29	13.19
Energía colectada por día kJ/m^2	5 561	12 949
Eficiencia de colector %	30.4	61.8

CUADRO 7.4

Utilización de calor sensible en las Pruebas de secado solar y secado natural

	PRUEBA No. 1	PRUEBA No. 2
Fuente de calor sensible: %		
ambiente	77.5	66
ventilador	6.4	9.2
sol	16.1	24.8
Utilización del calor sensible total: %	25.2	46.6

CUADRO 7.5

Energía eléctrica suministrada para el secado.
Comparación entre el secado solar y el secado con aire natural

		PRUEBA No. 1	PRUEBA No. 2
	Tiempo de operación, días	20	21.5
	Profundidad del lecho de granos, x	1.40	1.68
	Humedad total removida, kg agua	1 797	2 703
Energía eléctrica suministrada al motor del ventilador	Potencia, pot*	791	780
	Energía, MJ	1 367	1 455
	Wh/kg	211	150
	Agua removida KJ/kg	761	538

El consumo de electricidad durante las pruebas con aire calentado solarmente fue de 3 hasta 21 % menor que en las pruebas en que se usó aire natural.

Cuadro No 7.6

Resumen de Datos Experimentales de Secado de Granos

[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	Alvarez L
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	Alvarez L
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	Alvarez D
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	Alvarez D
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	Alvarez D
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	Alvarez D
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	ICAITI
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	ICAITI
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	ICAITI
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	ICAITI
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	Paredes
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	CONVERSA
[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	[illegible]	CONVERSA

8. METODOLOGIA

8.1. METODOS DE DETERMINACION DE HUMEDAD (CAMPO Y LABORATORIO)

Se puede considerar que el agua está presente en los granos, en cuatro formas principales:

a. Agua superficial. Depositada por lluvias recientes, o por condensación de la humedad del aire a causa de cambios de temperatura. Se mantiene adherida al grano sólo por fuerzas capilares y de tensión superficial.

b. Agua absorbida. Ocupa espacios intergranulares y poros; proviene de agua superficial que ha penetrado en el grano o de agua formativa que aún queda durante el proceso de maduración. Se mantiene dentro de los granos principalmente por la acción de fuerzas capilares.

c. Agua adsorbida. Unida más íntimamente, y en forma coloidal, a la sustancia del grano; la retienen en su sitio fuerzas de atracción molecular de magnitud importante.

d. Agua de constitución. Está químicamente unida a la materia seca; forma parte de la propia sustancia del grano y no es posible removerla sin desnaturalizarlo.

No existen límites bien definidos entre los tipos de humedad anteriores. Si se considera un grano muy seco, que se va humedeciendo lentamente, las fuerzas de adsorción que retienen al agua van disminuyendo en cada capa adicional, hasta llegar a igualarse con las fuerzas capilares de absorción. El comportamiento del agua se modifica en consecuencia, según las fuerzas de atracción que la mantienen adherida al grano.

La presión de vapor del agua interna, y la influencia que sobre la misma ejerce el aire exterior, disminuyen con el aumento de las fuerzas de atracción; esto explica la menor humedad relativa de equilibrio de los granos más secos.

8.1.1 Medición de humedad por horno de convección

Las consideraciones del párrafo anterior, explican la razón por la cual es difícil determinar el contenido de humedad real del grano; la distinción no muy clara entre el agua adsorbida y la de constitución, hace necesario el uso de métodos empíricos que establezcan un límite artificial entre ellas. El Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (US DA) exige, para la calibración de los medidores de humedad de lectura indirecta, el uso de métodos normalizados. Por ejemplo: para maíz, una muestra representativa de 15 gramos se somete a una temperatura de 103°C ± 1°C durante 72 horas, en un horno de convección; si se determina la pérdida de peso, se puede calcular la humedad así:

$$\% \text{ humedad (base húmeda)} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{peso final}}{\text{Peso inicial}} \times 100$$

$$\% \text{ humedad (base seca)} = \frac{\text{Peso inicial} - \text{peso final}}{\text{Peso final}} \times 100$$

La cantidad "Peso inicial - peso final" representa el agua evaporada, originalmente contenida en el material como "humedad".

Para cada tipo de grano se tienen normas oficiales semejantes. Existe una relación para calcular la pérdida de peso que ocurre en los granos sometidos a la operación de secado:

$$\text{Peso final del grano} = (\text{peso inicial}) \frac{100 - \% \text{ humedad inicial}}{100 - \% \text{ humedad final}}$$

En operaciones comerciales no resulta conveniente el uso de hornos para determinar la humedad y se usan métodos rápidos que en poco tiempo proporcionan resultados útiles si se saben interpretar. Estos métodos se describen a continuación.

8.1.2 Métodos de destilación

Los resultados se obtienen en un tiempo relativamente corto, 10 ó 20 minutos; son lo suficientemente precisos para calibrar aparatos medidores de lectura indirecta. Para realizar una medición se sumerge el grano en aceite caliente, a una temperatura superior a 100°C, (cuyo valor se elige según el tipo de grano) de tal manera que se produzca una evaporación completa de la humedad.

Un sistema de destilación permite condensar y recolectar el agua en una probeta graduada y calcular fácilmente el contenido de humedad.

Como el punto de ebullición del aceite varía con la altitud sobre el nivel del mar, es necesario efectuar algunas correcciones, según sea ésta.

8.1.3 Hornos al vacío

Utilizan un vacío parcial para obtener evaporaciones rápidas, mediante bajas temperaturas. Son especialmente útiles para productos sensibles al calor o que contengan una cantidad significativa de aceites volátiles.

8.1.4 Medidores eléctricos

Utilizan la variación de las características eléctricas de los granos según su contenido de humedad. Los resultados obtenidos son bastante confiables cuando la distribución de humedad dentro del grano es uniforme. Con granos recién cosechados en días soleados o provenientes de un sistema de secado artificial, que tienen una distribución de humedad interna no pareja, los resultados pueden ser erróneos a causa de la tendencia de estos aparatos a medir la humedad en la parte externa de los granos. El uso de estos medidores da lecturas diferentes para una misma muestra de grano si la temperatura de los granos de la muestra no es uniforme.

8.1.4.1. Medidores de resistencia

Proporcionan resultados confiables para valores de humedad entre el 8 y el 2[illegible] por ciento aproximadamente; un dispositivo mide la resistencia eléctrica de una muestra con peso fijo o volumen fijo; es necesario comprimir la muestra hasta un espesor determinado para obtener resultados consistentes (la resistencia eléctrica disminuye al aumentar la presión).

El medidor portatil "Gann" y el "Universal", son bastante conocidos. Hay que tomar en cuenta que al usar estos aparatos, los valores medidos en granos recién secados pueden diferir bastante de la humedad real.

8.1.4.2. Medidores de capacitancia

Miden la constante dieléctrica de los granos, que varía con la humedad. Sus límites de medición son más amplios que los de tipo resistivo, y dan resultados con aproximación entre el 6 y el 26 por ciento. Los más conocidos son el "Motomco", "Steinlite", "Burrows", "Dole", etc.

No debe olvidarse que todo medidor, para dar sus resultados, correlaciona estadísticamente la lectura de las propiedades dieléctricas del grano y su humedad, y que su precisión se ve afectada por cualquier variable que se desvíe de los valores estadísticos promedio utilizados. Los medidores de tipo dieléctrico se utilizan en mayor número que los resistivos.

8.1.5 Balanza de determinación de humedad

Consiste en una balanza con doble escala de lectura; una de éstas indica el peso inicial de la muestra que se quiere desecar y las disminuciones de peso que sufre a lo largo del tiempo; la otra indica los porcentajes de disminución de peso respecto al peso original de la muestra.

Tiene, además, una lámpara de luz infrarroja, que funciona como fuente de calor, y que puede graduarse manualmente para obtener la intensidad adecuada para cada tipo de grano.

El tiempo necesario de exposición de la muestra, el cual depende del tipo de producto que se esté secando, es regulado por un medidor de tiempo ("timer"). Este instrumento es útil para hacer curvas de secado (disminución de humedad en función tiempo).

8.2. INSTRUMENTOS PARA LA MEDICION DE RADIACION SOLAR

8.2.1 Piranómetro

Está diseñado para medir la radiación global (directa y difusa) y la radiación reflejada sobre la superficie de la tierra (albedo), en el intervalo de 0.3 a 3 micras (1 micra es igual a 10^{-6} metro). Básicamente consta de una placa metálica dividida en segmentos alternativamente pintados de negro y blanco, protegida por una cúpula de vidrio. Al incidir la luz solar sobre la placa, la diferencia de temperatura entre los segmentos negros de alta absortividad y los segmentos blancos de alta reflectividad crean una pequeña diferencia de potencial, expresada en MV/cal.cm².min. (Fig. No. 8.1)

Generalmente el instrumento está conectado a un registrador mediante un cable que conduce una pequeñísima corriente eléctrica. El registrador está continuamente recibiendo la señal del piranómetro (desde un cierto límite mínimo, que su sensibilidad fija) y cada cierto tiempo la imprime en una tira de papel, en unidades de energía por unidad de área, (por ejemplo: calorías/centímetro²).

Para conocer la cantidad de energía en un tiempo determinado, por ejemplo, en un día, es necesario hacer una integración gráfica (con planímetro u otra técnica) de los valores registrados por el graficador (o "recorder"). Existen aparatos llamados integradores que

realizan electrónicamente la función de "integrar" valores aislados obtenidos durante un período de tiempo dado.

Existen piranómetros eléctricos y mecánicos (piranógrafos). Los más conocidos son los "Eppley", "Wheather Measure".

El piranómetro es un instrumento muy útil, especialmente cuando se hacen evaluaciones del comportamiento de equipos o artefactos que aprovechan la energía solar, como en el cálculo de eficiencias de colectores solares para calentamiento de aire, por ejemplo.

Es necesario tener un piranómetro en las estaciones de meteorología para conseguir datos sobre la insolación en la localidad en que está la estación. Esta, junto con la demás información climatológica puede ser muy útil en aplicaciones solares, sobre todo en el dimensionamiento de colectores.

8.2.2 Pirheliómetro

Su funcionamiento es similar al del piranómetro. Mide únicamente la insolación directa.

8.2.3 Pirgeómetro

Mide la radiación infrarroja.

8.2.4 Heliógrafo o medidor de brillo solar

Mide la cantidad de horas-sol, o cantidad de insolación directa. El más conocido es el "Campbell-stokes".

8.3. EQUIPO PARA MEDICION DE LA HUMEDAD Y LA VELOCIDAD DEL AIRE.

8.3.1 Higrotermógrafo

Este instrumento simultáneamente mide la humedad relativa del aire y su temperatura, y hace un gráfico combinado de ambos valores en una tira de papel.

El sensor de humedad es un haz de cabellos humanos atados; el sensor de temperatura es una tira bimetálica. Ambos sensores, al variar la temperatura y la humedad accionan sistemas de palancas que, a su vez, producen un registro gráfico de la temperatura y de la humedad relativa sobre una tira de papel enrollada en un tambor que gira accionado por un mecanismo de relojería. Se puede

obtener información de las 24 horas de todos los días, durante una semana.

8.3.2 Psicrómetro

Está constituido por dos termómetros semejantes; uno de ellos tiene el bulbo recubierto con una gasa que es humedecida con agua destilada. La evaporación del agua que hay sobre el bulbo causa un descenso en la temperatura, cuya magnitud depende del estado higrométrico del aire.

El termómetro de bulbo seco indica la temperatura del aire. La diferencia de temperatura entre los termómetros de bulbo seco y de bulbo húmedo, sirven para hallar la humedad del aire, que puede ser buscada en una gráfica psicrométrica, con base en esa diferencia.

8.3.3 Anemómetro

Sirve para medir la velocidad de una corriente de aire. Entre los modelos portátiles están el anemómetro de "alambre caliente" y el de aspas. Ambos tienen un sensor que está comunicado con el aparato por medio de un cable. El aparato al recibir la señal del sensor da una lectura de la velocidad del aire.

8.3.4 Higrómetro

Mide la humedad relativa en ambientes interiores o exteriores. Este instrumento registra el porcentaje de vapor de agua que está realmente presente, comparado con la máxima cantidad de vapor de agua que podría estar presente. Estos medidores de humedad tienen tiempo de respuesta muy lento y cuando las condiciones cambian abruptamente, ocupan una hora o más para dar una lectura aproximada.

8.4 OTROS

8.4.1 Muestreadores para granos

Son una especie de pértiga que se usa para tomar muestras de un lote de granos almacenados en un silo. Se introduce el muestreador dentro de la masa de granos; luego, a determinada profundidad, se abre una cápsula que coge la muestra; luego se cierra la compuerta de la cápsula y se saca el muestreador.

***

9. EL SOL, FUENTE DE ENERGIA

El sol es una estrella, la más cercana a nuestro planeta, del cual dista, en promedio, unos 150 millones de kilómetros. Dentro del sol se producen continuamente reacciones de fusión nuclear, a una escala gigantesca, a causa de las cuales se liberan inmensas cantidades de energía.

El centro del sol está a una temperatura de millones de grados centígrados, en tanto que la temperatura de la capa superficial fluctúa entre 5 800 y 6 300°C. Estas grandes temperaturas permiten que el sol emita hacia el espacio, en forma de ondas electromagnéticas, la energía liberada por los procesos nucleares. Esta energía, al abandonar el sol y viajar por el espacio sufre una dispersión progresiva, que es cada vez mayor cuanto más lejos del sol se considere.

De las enormes cantidades de energía liberadas por el sol, sólo llegan a la tierra aproximadamente unas 2 billonésimas partes, pero a esta pequeña cantidad de energía se puede atribuir casi la totalidad de los procesos meteorológicos y biológicos que se desarrollan en este planeta. El sol pues, es la fuente primordial de la energía que la tierra ha recibido en el pasado, recibe en el presente y recibirá en el futuro.

9.1. LAS ONDAS ELECTROMAGNETICAS Y LA ENERGIA SOLAR

Como queda dicho, la energía que emana del sol atraviesa el espacio sideral en forma de ondas electromagnéticas. Aunque todas las ondas electromagnéticas tienen la misma naturaleza esencial, según sus características particulares, se pueden clasificar en varios tipos. Por ejemplo, las que pueden ser percibidas por los ojos, se llaman "ondas visibles"; las que producen calor en los cuerpos, se llaman "ondas infrarrojas".

Las diferentes ondas electromagnéticas tienen distintas características de las que dependen sus propiedades; una de esas características es la **longitud de onda** (Fig. 9.1).

La longitud de onda es la característica que más interesa pues de ella dependen la cantidad de energía portada por la onda y su poder de penetración. Entre más corta sea la longitud de onda, la energía portada y el poder de penetración son mayores.

La energía solar que recibe la tierra, antes de atravesar la atmósfera, se compone de varios tipos de radiaciones; el cuadro 9.1 siguiente muestra los tipos de radiaciones, el intervalo característico de longitud de onda, y el porcentaje de energía que transportan.

CUADRO No. 9.1

Distribución de la energía portada por las ondas electromagnéticas en el exterior de la atmósfera terrestre

Radiación electromagnética	Intervalo de longitud de onda	% de energía
Rayos Cósmicos, Gama, X y Ultravioleta	0.00 a 0.38 μ	7
Luz visible	0.38 a 0.78 μ	47
Infrarrojo cercano	0.78 a 2.00 μ	39
Infrarrojo lejano y ondas mayores	2.00 a infinito μ	7

Del cuadro se puede concluir que, para propósitos prácticos, las ondas de 0.38 a 2.00 μ son las que conviene captar para aprovechar la energía solar, en vista de que ellas portan un 86% de la energía que llega a la atmósfera.

9.2. EL FLUJO DE LAS ONDAS ELECTROMAGNETICAS HACIA Y A TRAVES DE LA ATMOSFERA TERRESTRE

Las ondas electromagnéticas provenientes del sol cruzan varias barreras antes de llegar a la superficie de nuestro planeta. La primera es el poderoso campo electromagnético de la tierra (conocido como Cinturón Van Allen), el cual retiene una gran porción de las ondas de corta longitud (rayos Gamma, rayos X) que son perjudiciales para la vida terrestre, y permite el paso de sólo una parte de ellas (Figura 9.2).

La segunda gran barrera es la capa de ozono que envuelve a la tierra; esta capa impide el paso de una gran porción de los rayos ultravioleta, pero permite el paso de las radiaciones de mayor longitud de onda.

Las radiaciones que alcanzan la baja atmósfera, principalmente luz visible y rayos del infrarrojo cercano, están sujetas a reflexiones, refracciones, absorciones y a irradiación hacia el espacio exterior; los agentes causales son las nubes, los gases (tanto naturales como producidos por el hombre) y polvos (cenizas, humos y

otras partículas finamente divididas). Estas condiciones son las causantes de que las radiaciones visibles y las infrarrojas lleguen hasta la superficie de la tierra atenuadas en diversos grados (Figura 9.2).

9.3. LA CONSTANTE SOLAR

Como las ondas electromagnéticas provenientes del sol sufren una serie de perturbaciones al atravesar la atmósfera, la cantidad de energía incidente en puntos diferentes de la superficie terrestre (y aún en un mismo punto, en diferentes momentos) es variable. Esto impide establecer un valor fijo para esa cantidad de energía.

Para efectuar todos los cálculos relacionados con la energía solar se necesitaba, sin embargo, un valor patrón fijo; se resolvió que tal valor se estableciera en el espacio exterior, en donde no hubiera perturbación atmosférica. Se hicieron numerosas evaluaciones en satélites, aviones, globos y estaciones terrestres, y se llegó a establecer la llamada **constante solar**.

"La constante solar representa la máxima cantidad de calor aprovechable por unidad de área y por unidad de tiempo dado, medida fuera de la atmósfera terrestre".

Constante solar = 1.94 cal/cm^2-min = 1 353 vatios/m^2
= 429 BTU/pie^2-hora

9.4. INSOLACION, TIPOS Y CARACTERISTICAS GENERALES

Se denomina "insolación" a la cantidad de energía solar recibida por la unidad de área en la unidad de tiempo. Existen varios tipos de insolación; la clasificación más general incluye tres diferentes tipos, los cuales se describen a continuación.

9.4.1 **Tipos de insolación** (Fig. 9.3)

a. Directa (o rayo de luz)

Es toda aquella radiación que llega en línea recta desde la fuente (sol). Se caracteriza porque se forman sombras fuertes y bien delimitadas. Un día claro (con sombra fuerte) tiene Insolación Directa de valor entre 80 y 85 por ciento; un día de sombras

difusas tiene Insolación Directa de 60 por ciento o menos; y en días de sombra inapreciable, la Insolación Directa se puede considerar nula.

b. Difusa

Es toda aquella radiación que no procede directamente de la fuente, porque ha sufrido refracciones (en nubes, polvo, etc.) o reflexiones en objetos distantes. No produce sombra y parece provenir de todo el cielo. Se puede considerar que en días claros un 20 por ciento de la insolación total es difusa, y que en días sin sombras, la insolación es totalmente difusa (100 por ciento).

c. Reflejada

Es toda aquella radiación que llega reflejada por superficies de cuerpos sólidos cercanos (edificios, rótulos, etc.) o por la superficie terrestre (nieve, asfalto, lagos, etc.).

9.4.2 Características generales de la insolación.

a. Es una forma de energía de baja intensidad, por lo que, para captarla, se requiere superficies relativamente extensas.

b. Su intensidad es variable. Aunque predecibles dentro de ciertos límites, las variaciones de la insolación no son controlables.

c. Es intermitente. Sólo está disponible en horas del día, y debe contarse con algún sistema de almacenamiento, si se desea aprovecharla en horas de la noche o en días muy nublados.

9.4.3 Factores que afectan el grado de insolación

En general, hay dos factores que afectan el grado de insolación y que se consideran fundamentales:

1. **Número de horas sol.** Tiempo que dura la iluminación solar, expresada en horas.

2. **Angulo de incidencia.** La insolación óptima es aquella que es perpendicular a la superficie considerada.

Asociado con este ángulo de incidencia está el grado de ATENUACION que depende de la longitud de la trayectoria recorrida por la radiación dentro de la atmósfera; cuanto más oblicua es la trayectoria, mayor es la distancia recorrida y más grande la atenuación. Cada uno de los factores depende directa o indirectamente de condiciones tales como: latitud, configuración orográfica, época del año, nubosidad, altitud, contaminación atmosférica y otros.

9.5 BALANCE ENERGETICO AL NIVEL DEL SUELO (Fig. 9.4)

Este balance representa la cantidad de energía solar aprovechable al nivel del suelo, que podríamos designar como insolación útil; esta insolación varía, tanto de un punto a otro, como de un momento a otro.

De esta insolación útil sólo se aprovecha continuamente menos de un uno por ciento en el proceso de fotosíntesis de las plantas; el resto, aunque disponible, no es aprovechado por el hombre, salvo en cantidades limitadísimas.

Aparatos de medición

Para medir las horas-sol:	actinógrafo
Para medir la insolación total:	piranómetro
Para medir la insolación directa:	pirheliómetro
Para medir el ángulo del sol sobre el horizonte:	sextante

9.5.1 Unidades usuales y conversiones para insolación

En meteorología se emplea mucho la unidad LANGLEY (L). Un Langley equivale a una caloría por centímetro cuadrado. En las mediciones meteorológicas corrientes se emplea frecuentemente registros Langley/día.

Una unidad de insolación se expresa como unidades de energía por unidad de área y por unidad de tiempo.

Equivalencias útiles para las unidades de insolación son:

$$1 \text{ Langley} = 1L = 1 \text{ cal/cm}^2 = 41\,840 \text{ J/m}^2$$

$$1 \text{ L/minuto} = 1 \text{ cal/cm}^2\text{-min} = 3.68 \text{ BTU/pie}^2\text{-hora}$$
$$= 698 \text{ vatios/m}^2$$

CUADRO No. 9.2

Medidas de la insolación en la Ciudad de Guatemala

Registros de 1981-1982, en Langley/día

enero	417	mayo	467	septiembre	367
febrero	435	junio	407	octubre	365
marzo	535	julio	410	noviembre	424
abril	532	agosto	456	diciembre	407

Promedio anual en 2 años: 448L/día

9.6. VENTAJAS DE LA ENERGIA SOLAR

1. Es la más "limpia" de todas las formas aprovechables de energía: no produce ningún tipo de contaminación.

2. Es abundante y está disponible en casi todo el mundo. Además, no puede ser sometida a restricciones de origen humano.

3. Es gratuita.

***

B I B L I O G R A F I A

1) Roa, G. & Rossi, J., Secagmen e Armazenamento de Produtos Agropecuarios com uso de Energía Solar e ar Natural, 1a. Ed., Academia de Ciencias, Secretaría da Industria, Comercio, Ciencia e Tecnología, Publicación ACIESP No. 22 del Estado de Sao Paulo, Brasil, 1980.

2) ICAITI Utilización de secadores solares para la preservación de granos, Informe Final, Convenio ATN/SF-IGOS-RE. Guatemala, 1981.

3) Hernández, C. Deshidratación o Secado, 1a. Edición, Curso para el fomento Agro-Industrial, San José, Costa Rica, 1983.

4) Díaz Coppel, M. de L. Obtención experimental de constantes de secado para variedades de maíz guatemalteco. Tesis Ing. Química, Universidad de San Carlos de Guatemala, 1980.

5) Meyer, G. E. Evaluation of Solar Air Heating Collection Systems for Use in Grain Drying Using Computer Simulation. Proc. 1976 Bicentennial Winter Simulation Conference Dec. 6-8 (1976) National Bureau of Standards, Gaithersburg, Md.

6) Sabbah, M. A. Simulation of Solar Grain Drying Using the Logarithmic Model. Paper No. 77-3012 ASAE.

7) Treybal, R. E. Mass Transfer Operations. 3rd. Edition. McGraw-Hill Book Co.

8) Solares, T., Determinación de curvas de humedad de equilibrio de café lavado. Tésis Ing. Química Universidad de San Carlos de Guatemala, 1981.

9) Brooker, D. B. Drying Cereal Grains. The AVI Publishing Co., Inc. 1978.

10) Castillo N. Alvaro Almacenamiento y secamiento de granos en Colombia y América Tropical. Ed. Agrosíntesis, Bogotá, Colombia, 1978.

11) Anderson, J. A. & Alcock, A. W. Storage of Cereal Grains and Their Products. Ed. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesotta, U. S. A., 1954.

12) Hall, D. W. Manipulación y Almacenamiento de Granos Alimenticios en las zonas tropicales y sub-tropicales. Publicación de FAO. 1971.

13) Gomes de Lima y otros Control de plagas. CENTREINAR, Minas Gerais, Brasil, 1979.

14) ICAITI Aplicaciones de Energía Solar. 1983

15) Sayigh, A. A. M. Solar Energy Engineering. Academic Press. 1977.

16) BSI Norma BSI BSDD77

17) ANSI-ASHARAE Norma ANSI-ASHARAE 93-77

18) Rodríguez M. Reynaldo Estudio del secado de leña con el empleo de la Energía solar. Tésis Universidad Nacional de Honduras, Julio, 1982.

19) Szulmayer, W. Drying Principles and Thermodynamics of Sun Drying. Report No. T - 124 August 1976: Brace Research Institute, Quebec, Canadá.

20) Exell, R. H. B. Basic Design Theory for a Simple Solar Rice Dryer. Renewable Energy Review Journal: Vol. 1 No. 2 January 1980.

21) Roa G.; Villa L. G. — Secagem e Armazenamento de Graos e Sementes em Silos, Mediante a Utilizacao de Arambiente e com o Auxilio de Colectores Solares. Centro Nacional de Treinamento em Armezenagem (Centreinar). Universidade Federal de Vi cosa Brasil, 1980.

22) De León, J. F. — Secado solar de granos con Aire forzado a escala grande. Tesis Ing. Química. Universidad de San Carlos de Guatemala (USAC), 1981.

23) Paredes, M. A. — Efecto del secado solar natural y del secado indirecto mediante el uso de un colector solar de placa plana sobre el endurecimiento del frijol (Phaseolus vulgaris). Tésis Centro de Estudios Superiores en Nutrición y Ciencias de Alimentos (CESNA). Guatemala, 1983.

24) Alvarez, O. F. — Evaluación de secadores solares de pequeña escala para granos básicos. Tésis Ing. Química, Universidad de San Carlos de Guatemala. En impresión.

25) MWPS-22 — Low temperature & Solar Grain Drying Handbook.

26) Howell — Engineer Guide to Solar Energy. Ivan & Justine Bereny Ed.

27) SEIS — Solar Energy Information Services, U. S. A., 1979.

28) Montgomery, Richard & Budnick, Jim — Solar Decision Book. Publicación de Dow Corning Corporation, Midland, Michigan, U. S. A., 1979.

29) Salazar, Humberto — Estudio sobre algunas características de radiación solar en Guatemala. Vol. 2 de la Asociación Guatemalteca de Energía Solar. 1975.

■■■■