



# **DISEÑO DE UN SECADOR SOLAR DE GRANOS**

**TRABAJO DE GRADUACION  
PREPARADO PARA LA FACULTAD  
DE INGENIERIA**

**PARA OPTAR AL GRADO DE:**

**INGENIERO MECANICO**

**POR**



**JORGE ERNESTO CENTENO MORAN  
MAURICIO ERNESTO MACHADO PORTILLO**

**ENERO-1998**

**SOYAPANGO - EL SALVADOR - CENTROAMERICA**

**UNIVERSIDAD DON BOSCO**

**RECTOR**

**ING. FEDERICO MIGUEL HUGUET RIVERA**

**SECRETARIO GENERAL**

**PBRO. PEDRO JOSE GARCIA CASTRO S.D.B.**

**DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERIA**

**ING. CARLOS ALBERTO GUTIERREZ PEÑA**

**ASESOR DEL TRABAJO DE GRADUACION**

**ING. EDWIN ZEPEDA MONCADA**

**JURADO EXAMINADOR**

**ING. RICARDO SILIEZAR**

**ING. MARIO MOLINA**

**UNIVERSIDAD DON BOSCO**

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA**

**JURADO EVALUADOR DEL TRABAJO DE GRADUACION**

**“DISEÑO DE UN SECADOR SOLAR DE GRANOS”.**

---

**ING. RICARDO SILIEZAR**

**JURADO**

---

**ING. MARIO MOLINA**

**JURADO**



---

**ING. EDWIN ZEPEDA**

**ASESOR**

## INTRODUCCION

El establecer un balance entre nuestro medio ambiente, la eficaz administración de los recursos por medio del estado y el beneficio y mejora de la calidad de vida de la población es una meta por la cual todos debemos trabajar con paciencia y esperanza para poder optar por un futuro mejor para las generaciones venideras.

El asombro del hombre por la energía del sol como elemento generador de la vida en sentidos general, ha llevado a estudiar y comprender los elementos que rigen este tipo de energía.

Las aplicaciones que el hombre ha encontrado en el poder calorífico del sol son diversos y van de los modelos simples hasta los mejorados que requieren el uso de tecnologías avanzadas con un costo económico elevado. Para nuestros países en vías de desarrollo la alternativa de aprovechar condiciones geográficas cercanas al trópico que nos colocan como los países con la mayor disponibilidad de la energía solar; tienen que ir de la mano con el uso de tecnologías apropiadas a nuestros niveles técnico-económicos.

Una aplicación que no requiere el importar tecnologías caras y tiene una gran utilidad en nuestro medio; es la desecación solar de granos básico con un sistema de precalentamiento del medio desecante, en nuestro caso el aire, con la energía colectada proveniente del sol.

El presente trabajo versa sobre el diseño de un secador solar de granos con una cámara de precalentamiento del aire y flujo forzado. En el primer capítulo trata sobre el fenómeno de transmisión de energía por radiación en forma general, para luego explicar el comportamiento cualitativo y cuantitativo de la energía solar en la tierra, tanto en el exterior de la atmósfera como en la superficie de la tierra, así como la forma de aprovecharla.

El capítulo dos presenta los resultados de la investigación de campo realizada para descubrir el proceso de secado y sus problemas en ciertas regiones de El Salvador.

El Capítulo tres hace una introducción general sobre la desecación de granos y las condiciones requeridas para su almacenamiento y manejo en forma segura.

El capítulo cuatro considera todos los elementos necesarios para calcular y diseñar los elementos que componen el sistema que comprende: el ventilador para forzar aire, el colector solar para calentar el aire y el silo almacenador secador.

## **OBJETIVOS**

### **A. OBJETIVO GENERAL:**

Diseñar un secador solar de granos.

### **B. OBJETIVOS ESPECIFICOS:**

- Demostrar que la energía solar puede ser aprovechada como una fuente no convencional de energía.
- Fortalecer el desarrollo, de la investigación y aplicación de la energía solar en la Universidad Don Bosco como una alternativa de solución a la crisis energética existente a nivel mundial.

## INDICE

INTRODUCCION	i.
OBJETIVOS	ii.
INDICE	iii.
AGRADECIMIENTOS	iv.
GLOSARIO	v.
<b><u>CAPITULO 1.</u></b>	
- Introducción	17.
1) Energía Solar	19.
1.1) Fenómeno Físico de la Radiación Térmica	19.
1.1.1) Absorción, Reflexión y Transmisión	23.
1.1.2) Radiación Solar	27.
1.1.2.a) Angulos básicos y derivados	30.
1.1.2.b) Estimación de la radiación	32.
1.1.2.c) Radiación en una superficie plana inclinada	37.
1.1.3) Radiación Solar en El Salvador	40.
1.2) Captación de la energía Solar	46.
1.2.1) Conversión Energía Solar a Energía Térmica	46.
1.2.2) Componentes de un Colector Solar Plano	54.
1.2.3) Colector para Calentar Aire	55.
- Referencia	59.

## **CAPITULO 2.**

- Introducción.	60.
2) Investigación de campo para determinar el Tipo de Grano a Secar.	61.
2.1) Investigación de campo sobre el cultivo de granos y sus problemas de secado	61.
2.1.1) Conclusiones de la Investigación de campo sobre los granos, comúnmente cultivados y los problemas en el secado.	62.
2.2) Ubicación de los cultivos en El Salvador.	66.
2.2.1) Clasificación de los granos.	66.
2.2.2) Epocas de cultivo y recolección de los granos básicos.	77.
2.2.3) Análisis de producción y rendimiento de los granos: maíz, frijol, sorgo.	82.
2.2.4) Acondicionamiento, almacenamiento y conservación.	85.
2.3) Condiciones climatológicas de El Salvador.	92.
- Referencias.	96.

### **CAPITULO 3.**

- Introducción	98.
3) Aprovechamiento de la Energía Solar para el secado de granos	100.
3.1) Teoría del Secado de Granos	100.
3.1.1) Necesidad del Secado	100.
3.1.2) Técnicas del Secado de Granos	101.
3.1.3) Eficiencia Térmica del Secado	103.
3.2) Secado de Granos a Bajas Temperaturas	104.
3.2.1) Principio de Secado a Bajas Temperaturas	107.
3.3) Aspectos Técnicos sobre Secamiento	113.
3.3.1) Velocidad de Secado.	118.
- Referencias.	124.

### **CAPITULO 4.**

- Introducción.	125.
4) Diseño del Secador Solar de Granos.	126.
4.1) Determinación del Calentamiento del Aire.	126.
4.1.1) Empleo del Abaco Psicrométrico en la Deseccación de Granos	126.
4.1.2) Aumento de la Temperatura del aire.	128.
4.2) Dimensionamiento del Silo Secador.	130.
4.3) Determinación del Flujo de Aire.	131.

4.3.1)	Flujo de aire mínimos para secado de granos a bajas temperaturas.	135.
4.3.2)	Resistencia del flujo de aire.	142.
4.3.3)	Ventiladores	148.
4.3.3.i)	Rendimientos y Potencia	151.
4.3.3.ii)	Características de los Ventiladores.	152.
4.3.3.iii)	Leyes de los ventiladores.	157.
4.3.3.iv)	Selección de los Ventiladores	158.
4.3.4)	Procedimientos para diseño de ductos.	167.
4.3.4.i)	Pérdidas en ductos.	168.
4.4)	Diseño del colector solar.	173.
4.4.1)	Eficiencia de colectores planos de Energía solar para el calentamiento de aire.	173.
4.4.2)	Potencia de calentamiento.	174.
4.4.3)	Superficie del colector solar.	175.
4.4.3.i)	Orientación y ángulo de Inclinación del colector solar plano.	177.
4.4.4)	Análisis del Modelo Matemático para El Colector Solar.	180.
4.5)	Diseño de Silo.	190.
4.5.1)	Cargas impuestas por el grano almacenado.	190.
4.6)	Ecuaciones aproximadas para el cálculo del tiempo de secado.	198.
4.6.1)	Cálculo del tiempo de secado en condiciones constantes.	198.
4.6.2)	Cálculo del tiempo en el período de velocidad constante.	200.
4.6.3)	Cálculo del tiempo de secado en el período de velocidad decreciente.	203.
4.6.4)	Curvas de Velocidad de secado.	206.
4.6.5)	Determinación de los coeficientes de Transferencia.	208.

4.7) Memoria de Cálculo.	211.
- Referencias.	223.
BIBLIOGRAFIA	226.
RECOMENDACIONES	228.
ANEXOS	229.

Anexo 1: Encuesta para la investigación de campo.

Anexo 2: Especificaciones Técnicas.

Anexo 3: Presupuesto.

## AGRADECIMIENTOS

*A DIOS TODO PODEROSO:* Por dar iluminación y aliento en los momentos mas apremiantes, en los cuales caímos, pero nos ayudó a levantarnos y seguir.

*A MIS PADRES:* Por dar ese apoyo incondicional y su sacrificio con el único objetivo de ver a su hijo coronando una carrera.

*A MI ESPOSA E HIJO:* Por su amor, comprensión y sacrificio por el tiempo que cedieron para la elaboración de este proyecto.

Jorge Ernesto Centeno Morán.

## **AGRADECIMIENTOS**

*A DIOS* por darme fuerzas en mis momentos más difíciles.

*A MI FAMILIA* por su apoyo incondicional y su comprensión.

*Y TODAS LAS PERSONAS* que desinteresadamente me ayudaron y brindaron mucho de su tiempo para poder culminar este proyecto.

Mauricio Ernesto Machado Portillo.

## GLOSARIO

- 1) **RADIACION SOLAR:** Es una forma de radiación térmica que tiene una distribución de longitud de onda específica. Su intensidad depende en gran parte de las condiciones atmosféricas, la estación del año y el ángulo de incidencia de los rayos solares sobre la superficie de la tierra.
- 2) **RADIACION ESPECULAR:** Cuando el ángulo de incidencia es igual al de reflexión.
- 3) **RADIACION DIFUSA:** Cuando un rayo incidente se distribuye en forma uniforme en todas direcciones después de la reflexión.
- 4) **VENTILADOR:** Es la turbo máquina que absorbe energía Mecánica y restituye energía a un gas, comunicándole un incremento de presión tal que el flujo de la compresibilidad puede despreciarse.
- 5) **SECADO DE GRANOS:**
  - a) Una operación unitaria responsable de la reducción del contenido de humedad de cierto producto, hasta un nivel que se considere seguro para el almacenamiento de este.
- 6) **NIVEL DE HUMEDAD SEGURO:** Es el nivel por debajo del cual se reduce la actividad respiratoria de los granos, y se dificulta el ataque de insectos y hongos.
- 7) **SECADO A BAJA TEMPERATURA:** Son aquellos que usan aire a temperatura ambiente ó calentado en 3 a 5°C, como medio de transporte de humedad.
- 8) **SECADO A ALTA TEMPERATURA:** Son aquellos que usan aire calentado; por lo menos a 10°C, sobre la temperatura ambiente.

- 9) EFICIENCIA TERMICA DEL SECADO:** En la relación entre la cantidad de Energía destinada al secado y la cantidad de agua evaporada durante el proceso.
- 10) HUMEDAD DE EQUILIBRIO:** Es cuando al término del proceso casi la totalidad de la masa de granos va a estar en equilibrio térmico e higroscópico con las condiciones psicométricas medias del aire de la región.
- 11) HUMEDAD RELATIVA:** La relación entre la masa de vapor presentes en un volumen dado de aire y la masa de vapor que existiría en el mismo volumen de aire, y en iguales condiciones de temperatura y presión, cuando esta completamente saturado de agua.
- 12) HUMEDAD ABSOLUTA:** Indica directamente la masa de vapor de agua que contiene cada unidad de aire seco.
- 13) CALOR ESPECIFICO:** Es la cantidad de calor que debe suministrar se a su unidad de masa, para aumentar su temperatura en 1°C.
- 14) INSOLACION:** En la cantidad de Energía Solar que recibe un área dada, en un período de tiempo definido.
- 15) COLECTOR SOLAR PARA AIRE:** Es el que transforma la radiación solar en energía para calentar el aire.
- 16) HIGROSCOPICIDAD:** Es cuando los granos absorben o entregan humedad a la atmósfera que los circundan hasta que encuentran el equilibrio con ella.
- 17) DIFUSION:** Es el movimiento de humedad de un punto a otro causados por agentes internos o externos en la humedad interna de una masa de granos.
- 18) HUMEDAD DE BASE HUMEDA:** Es el sistema utilizado comercialmente para indicar el contenido de humedad de un grano; indica el porcentaje que representa el peso del agua en relación con un valor total que incluye el peso de

la materia seca más la humedad.

- 19) **HUMEDAD DE BASE SECA:** Es el contenido de agua en relación con el peso de la materia seca, de tal manera que su valor indica directamente el contenido de humedad.
- 20) **PODER EMISIVO DE UN CUERPO:** Es la energía emitida por el cuerpo por el área y tiempo unitarios.
- 21) **COLECTORES CONCENTRADORES:** Son aquellos dispositivos que captan el calor del sol en una superficie grande y lo concentran en una zona reducida.
- 22) **SECADO:** Es la remoción por medios térmicos de agua contenida dentro de sólidos.
- 23) **EFICIENCIA:** 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.
- 24) **FLUJO DE MASA:** Es la cantidad de masa de fluido que pasa por el colector en la unidad de tiempo.
- 25) **PSICROMETRIA:** Al estudio de los temperaturas de bulbo seco y bulbo húmedo, que permiten determinar las variaciones de humedad de aire.
- 26) **CONVECCION:** Es la propagación del calor de un lugar a otro por un movimiento real de la sustancia caliente.
- 27) **RADIACION:** Es la emisión continua de energía desde la superficie de todos los cuerpos.
- 28) **CUERPO NEGRO:** Es la superficie que absorbe toda la Energía que recibe, y es la mejor superficie emisora posible. Tal superficie no reflejara energía radiante

y, por consiguiente, perecerá negra.

**29) EFECTO DE INVERNADERO:** Es cuando una superficie transparente permite la entrada de mucha más cantidad de radiación de la que permite escapar produciendo así un efecto de calentamiento.

**30) SILO:** Estructura de Ladrillo, Madera ó Metálica en la cual se almacena el grano, para evitar deterioro, por el ambiente, Roedores, Pájaros e Insectos.

**CAPITULO 1.**

# INTRODUCCION

## CAPITULO 1.

La transmisión de energía como resultado de los procesos que se llevan a cabo en el sol, es una forma de radiación térmica conocida como radiación solar; parte de ésta radiación es interceptada por la tierra y su intensidad depende en gran medida de las condiciones atmosféricas, la estación del año y el ángulo con que los rayos inciden sobre la superficie de la tierra.

A la cantidad de irradiación solar total sobre la capa externa de la atmósfera, se le llama, constante solar; ésta constante tiene un valor de  $1400 \text{ W/m}^2$  cuando la tierra se encuentra a su distancia media del sol.

A consecuencia de una serie de factores, no toda la energía incidente en la atmósfera alcanza la superficie de la tierra; entre estos podemos mencionar: la capacidad de absorción del bióxido de carbono y del vapor de agua presentes en la atmósfera, también otros elementos como las partículas de polvo y otros contaminantes, contribuyen a la reducción de la radiación sobre la superficie terrestre. Sin embargo la cantidad de radiación que llega es capaz de generar la vida que conocemos.

La ubicación geográfica de un lugar determinado influye en la cantidad de radiación que éste recibe, esto es porque en la medida que los rayos inciden en forma directa sobre la superficie terrestre, ésta alcanza su máxima cantidad de energía solar por dos razones, la primera es que se presenta un área vista más ampliamente para el flujo solar que entra, y la otra es que los rayos solares viajan una distancia menor a través de la atmósfera y de esta manera se produce una menor absorción en ella, que cuando el ángulo incidente es más oblicuo que el normal. Esto ubica a las regiones

tropicales o con latitudes cercanas al Ecuador como las más beneficiadas con la radiación solar. El Salvador cuenta con promedios de radiación solar que lo ubican como una de las regiones con los mayores porcentajes de disponibilidad en el aprovechamiento de la energía solar en el mundo.

En el desarrollo del capítulo tratamos el fenómeno físico de la transmisión de energía por radiación así como sus propiedades, ya que serán de utilidad al cuantificar la radiación en cualquier punto del globo terrestre; sin embargo, nos interesa lo que ocurre en El Salvador con las cantidades de radiación que se reciben en diferentes regiones del país. El hecho de conocer y establecer las cantidades de radiación no es la única meta; sino también el poder tener a nuestra disposición sus bondades es la otra que complementa el panorama de la energía solar y su aprovechamiento.

# 1. ENERGIA SOLAR

## 1.1 FENOMENO FISICO DE LA RADIACION TERMICA

Existen muchos tipos de radiación electromagnética; la radiación térmica es tan sólo una de ellas. Sea cual fuere el tipo de radiación, decimos que ésta se propaga a la velocidad de la luz,  $3 \times 10^{10}$  cm/s. Esta velocidad es igual al producto de la longitud de onda y frecuencia de la radiación.

$$c = \lambda \nu \quad \text{Ec. 1.1}$$

donde  $c$  = velocidad de la luz

$\lambda$  = longitud de onda

$\nu$  = frecuencia

La unidad para  $\lambda$  pueden ser centímetros, armstrong ( $1\text{A} = 10^{-8}$  cm) o micrómetros ( $1\mu\text{m} = 10^{-6}\text{m}$ ). en la Fig 1.1 se muestra una porción del espectro electromagnético. La radiación térmica fluctúa entre 0.1 a 100  $\mu\text{m}$ , mientras que la porción de la luz visible del espectro es muy pequeña, varía entre 0.35 a 0.75  $\mu\text{m}$ .

La propagación de la radiación térmica ocurre en forma de Cuantos discretos, en la que cada "Cuantos" tiene una energía de  $E = h\nu$  1.1  
en donde  $h$  es la constante de Planck y su valor es

$$h = 6.625 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

Se puede obtener un cuadro físico muy simple de la propagación de la radiación considerando cada Cuantos como una partícula que tienen energía,

masa y momento. Por tanto, en cierto sentido podemos pensar en la radiación como en un "gas de fotones" que puede fluir de un lugar a otro. Utilizando la relación relativista entre masa y energía, se pueden derivar expresiones para la masa y el momento de las "partículas"; es decir,

$$E = mc^2 = hv$$

$$m = \frac{hv}{c^2}$$

$$\text{Momento} = c \frac{hv}{c^2} = \frac{hv}{c}$$

Considerando la radiación como un gas tal, los principios de la termodinámica estadística cuántica pueden aplicarse para derivar una expresión para la densidad de energía de la radiación por volumen y longitud de onda unitarios como:

$$u_\lambda = \frac{8\pi hc \lambda^{-5}}{e^{mc\lambda/kT} - 1} \quad 1.2$$

en donde k es la constante de Boltzmann.  $1.38066 \times 10^{-23}$  J/molécula K. Cuando la densidad de energía se integra sobre todas las longitudes de onda, la energía total es proporcional a la temperatura absoluta a la cuarta potencia:

$$E_b = \sigma T^4 \quad 1.3$$

A la Ec. 1-3 se le denomina la ley de Stefan-Boltzmann,  $E_b$  es la energía radiada por tiempo y área unitarios por el radiador ideal, y  $\sigma$  es la constante

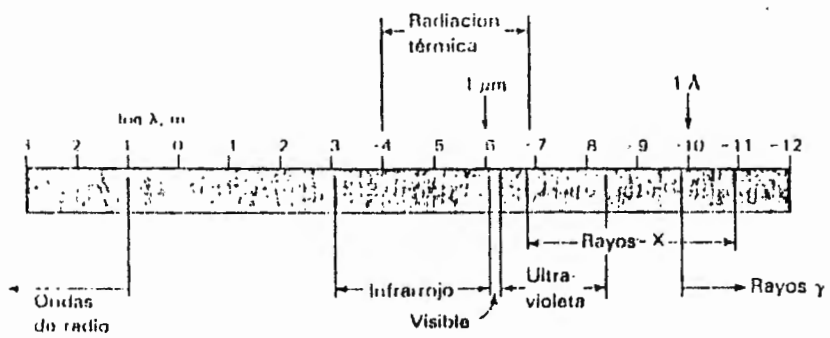


Fig 1.1 Espectro electromagnético.

de Stefan-Boltzmann, cuyo valor es:

$$\sigma = 5.669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4 [0.1714 \times 10^{-8} \text{ Btu/h pie}^2 \text{ }^\circ\text{R}^4]$$

cuando  $E_b$  está en watts por metro cuadrado y  $T$  en grados K. En el análisis termodinámico la densidad de energía está relacionada a la energía radiada desde una superficie por tiempo y área unitarios. Así, la superficie interior caliente de un recinto cerrado produce cierta densidad de energía la radiación térmica dentro del recinto. Estamos interesados en el intercambio radiante entre superficies aquí la razón por la cual se da la expresión de radiación a partir de una superficie, en términos de su temperatura. El subíndice  $b$  en la Ec. 3 denota que ésta es la radiación de un cuerpo negro. A ésta le llamamos **radiación de cuerpo negro** porque los materiales que obedecen esta ley parecen negros a la vista; parecen negros porque no reflejan radiación alguna. Así, a un cuerpo negro también se le considera como un cuerpo que absorbe todas las radiaciones que inciden sobre él. A  $E_b$  se denomina el **poder emisivo** de un cuerpo negro.

Es importante hacer notar en este momento que la "negrura" de una superficie de radiación térmica puede ser bastante engañosa en lo que concierne a las observaciones visuales. Una superficie recubierta con tizne aparece como negra a la vista y efectivamente es negra para el espectro de radiación térmica. Por otra parte, la nieve y el hielo parecen muy brillantes al ojo, pero son por naturaleza "negras" para la radiación térmica de longitud de onda grande. En lo que se refiere a la radiación por longitud de onda grande, muchas pinturas blancas son esencialmente negras. [1]

### 1.1.1 ABSORCION, REFLEXION Y TRANSMISION

Cuando la energía radiante incide contra una superficie material, parte de la radiación se refleja, parte se absorbe y parte se transmite, tal como lo muestra la Fig. 1.2. Definimos la reflectividad  $r$  como la fracción reflejada, la absorbencia  $a$  como la fracción absorbida y la transmisividad  $t$  como la fracción transmitida.

$$\text{Así: } a + r + t = 1 \quad (\text{Ec 1.4})$$

La mayor parte de los cuerpos sólidos no transmiten radiación térmica; de modo que para muchos de los problemas aplicados la transmisividad se puede tomar como cero. Entonces

$$a + r = 1$$

Cuando la radiación choca con una superficie se pueden observar dos tipos de fenómenos. Si el ángulo de incidencia es igual al de reflexión, a éste se le llama **especular**. Por otra parte, cuando un rayo incidente se distribuye en forma uniforme en todas direcciones después de la reflexión, a éste se le llama **difusa**. En la Fig. 1.3 se representan ambos tipos de reflexión. Obsérvese que la reflexión especular presenta al observador una imagen reflejada exacta a la de la fuente. Ninguna superficie real es especular o difusa. Un espejo corriente es especular completamente para la luz visible, pero no de un modo necesario especular a través de la gama entera de longitud de onda de radiación térmica. Por lo general, una superficie rugosa presenta con mayor facilidad un comportamiento difuso que una superficie perfectamente lisa. De manera similar, una superficie lisa es más especular que una rugosa. La influencia de la rugosidad de una superficie sobre las propiedades de radiación

térmica de los materiales es un tema de gran interés y que continúa siendo objeto de investigación continua. El poder emisivo  $E$  de un cuerpo se define como la energía emitida por el cuerpo por área y tiempo unitarios. Podríamos realizar mentalmente un experimento a fin de establecer una relación entre el poder emisivo de un cuerpo y las propiedades del material que definimos anteriormente. Supóngase que se tiene un recinto de manera perfecta negro, es decir, uno que absorbe todas las radiaciones incidentes que chocan contra él, como se muestra en forma esquemática en la Fig. 1.4. Este recinto también emitirá radiación de acuerdo con la ley  $T^4$ . Sea  $q_1$   $W/m^2$  el flujo radiante que llega a cualquier punto del área del recinto. Supóngase ahora que se coloca dentro del recinto un cuerpo y se le permite alcanzar la temperatura de equilibrio junto con el recinto. En equilibrio, la energía absorbida por el cuerpo deberá ser igual a la energía emitida de otra manera habría un flujo de energía hacia el interior o exterior del cuerpo que incrementaría o disminuiría su temperatura. En equilibrio escribiríamos.

$$EA = q_1 A \alpha \quad (\text{Ec.1.5})$$

Si ahora reemplazamos el cuerpo dentro del recinto por el cuerpo negro del mismo tamaño y forma, y le permitimos alcanzar el equilibrio junto con el recinto a la misma temperatura.

$$E_\lambda A = q_1 A (1) \quad (\text{Ec 1.6})$$

ya que la absorbencia de un cuerpo es igual a la unidad. Si se divide la Ec. 1.5 entre la Ec. 1.6.

$$E/E_b = a$$

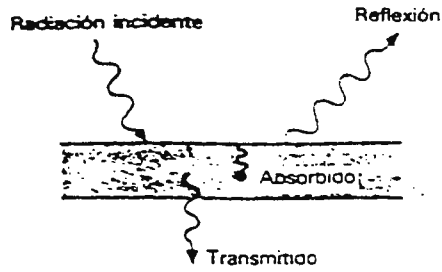


Fig.1.2 Descomposición de la radiación

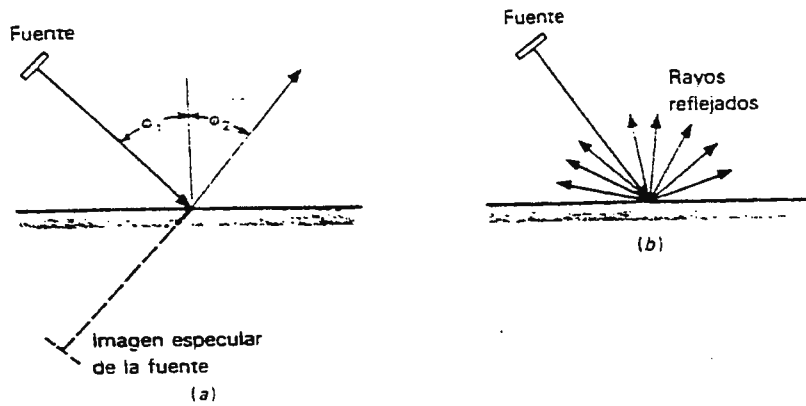


Fig.1.3 Tipos de reflexión.

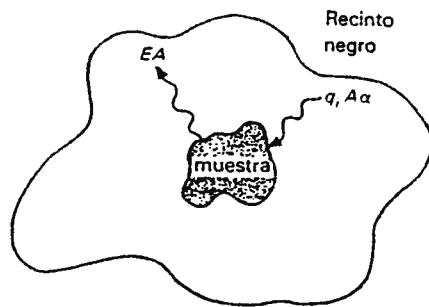


Fig.1.4 Comportamiento cuerpo negro, identidad de Kirchhoff.

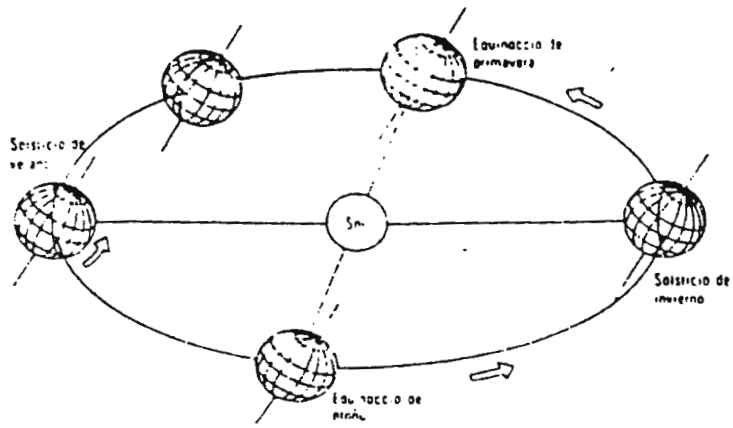


Fig.1.5 Revolucion de la Tierra alrededor del Sol.

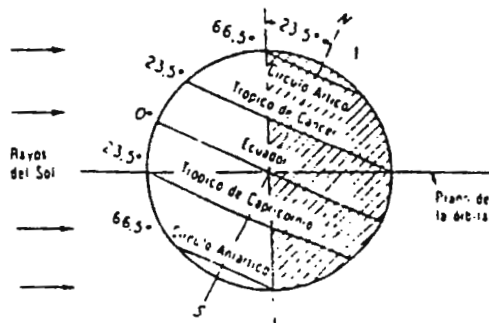


Fig.1.6 Inclination de la Tierra respecto al plano orbital.

Y encontramos que la proporción del poder emisivo de un cuerpo al poder emisivo un cuerpo negro, a la misma temperatura es igual a la absorbencia del cuerpo. Esta proporción se define como la emisividad  $e$  del cuerpo.

$$e = E/E_b \quad (\text{Ec 1.7})$$

$$\text{De modo que} \quad e = a \quad (\text{Ec 1.8})$$

A la Ec. 1.8 se le denomina la identidad de Kirchhoff. Aquí observamos que emisividades y absorbencias que se han tratado son la propiedades totales de material en particular; es decir, ellas representan el comportamiento integrado del material sobre las longitudes de onda. Las sustancias reales emiten menos radiación que las superficies negras ideales cuando se mide la emisividad del material. En realidad, la emisividad de un material varía con la temperatura y la longitud de onda de la radiación.

### 1.1.2 RADIACION SOLAR

La cantidad de energía media que irradia el sol es llamada "constante solar", siendo aproximadamente de  $1353 \text{ W/m}^2$  en el exterior, fuera de la atmósfera y alrededor de la tierra, variando únicamente en un 3.3% a medida que la órbita elíptica de la tierra hace que ésta se aproxime o se aleje del sol. Una gran parte de esta radiación se refleja al espacio exterior por la atmósfera y la superficie exterior de las nubes, otra parte es absorbida o dispersada por moléculas, pero la mayor parte se dispersa entre las pequeñas gotas de agua de la nubes y las partículas de polvo. A consecuencia de éstos fenómenos, las  $1353 \text{ W/m}^2$  incidentes en la atmósfera exterior se reducen de tal manera que cuando alcanzan la superficie de la tierra su valor está entre 1050 y cero  $\text{W/m}^2$ .

Parte de esta radiación viene directamente del sol, pero a veces una cantidad que puede llegar al 10% del total nos llega como radiación difusa, incluso cuando el sol está oculto tras las nubes.

Como ya sabemos, la tierra gira alrededor del sol en una trayectoria aproximadamente circular (figura 1.5.), con el sol localizado ligeramente fuera del círculo.

La distancia media de la tierra al sol es de 150,000,000 kms., siendo el 1 de enero aproximadamente cuando la tierra está en su posición más cercana al sol, mientras que el 1 de julio estás en la más remota, la cual es cerca de un 3.3% mayor a la distancia media.

Observando, que si la intensidad de la radiación solar incidente sobre la atmósfera varía inversamente con el cuadrado de la distancia de la Tierra al sol, la tierra recibe un 7% más radiación en enero que en julio.

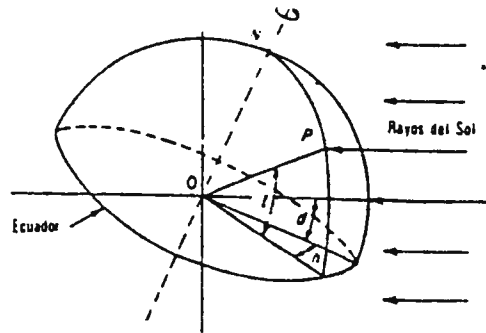


Fig.1.7 Relación ángulos básicos Tierra-Sol.

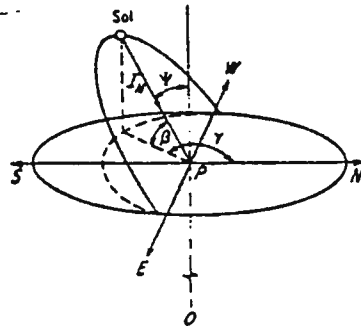


Fig.1.8 Definición de los ángulos derivados Tierra-Sol.

También, la inclinación de la tierra tiene un efecto determinante, pues junto con la rotación diaria y la revolución anual, gobierna la distribución de la radiación solar sobre su superficie, la duración variable del día y la noche y el cambio de estaciones; teniendo una inclinación de  $23.5^\circ$  con respecto a su órbita alrededor del sol. (fig. 1.6.)

### **1.1.2.a ANGULOS BASICOS Y DERIVADOS TIERRA SOL.**

Angulos Básicos: para conocer los ángulos con que inciden los rayos solares de un punto P sobre la superficie de la tierra en cualquier instante, basta conocer su latitud  $l$ , el ángulo horario  $h$  del punto P y la declinación del SOL  $d$  (ver figura 1.7).

Donde la latitud  $l$  es la distancia angular del punto P al Ecuador, el ángulo horario  $h$  es el ángulo medido sobre el plano ecuatorial de la tierra entre la proyección de la línea que une el centro del sol con el centro de la tierra y la proyección del punto P sobre el mismo plano ecuatorial.

En el medio día solar, el ángulo horario es cero. El ángulo horario expresa el tiempo del día con respecto al medio día solar, donde una hora de tiempo está representada por:

$$360^\circ / 24\text{hrs} = 15 \text{ grados de ángulo horario.}$$

El ángulo  $d$  está formado por el plano del Ecuador y el rayo que pasa a través del centro de la tierra.

Ángulos Derivados: Además de los tres ángulos básicos ya citados, tienen utilidad otros ángulos en el cálculo de la radiación solar (fig. 1.8). Tales ángulos incluyen el ángulo del cenit ( $\Psi$ ), el ángulo de altitud  $\beta$  y el ángulo de azimut. Todos estos ángulos adicionales están derivados de los tres ángulos básicos y pueden estar expresados en función de éstos.

De tal manera que para un observador sobre la tierra, el sol parece moverse a través del cielo, siguiendo la trayectoria de un arco circular de horizonte a horizonte. Donde el punto P representa la posición del observador, el punto O el centro de la tierra e  $I_N$  es un vector que representa los rayos solares. El ángulo del Cenit (ojo) es el ángulo entre los rayos solares y una línea perpendicular al plano horizontal P (extensión OP). El ángulo de altitud  $\beta$  es el ángulo en un plano vertical entre los rayos solares y la proyección de los rayos solares sobre el plano horizontal. Por tanto, se deduce que:

$$\beta + \Psi = \pi/2 \quad (\text{Ec1.9})$$

El ángulo de azimut es el ángulo en el plano horizontal medido entre el norte de la proyección horizontal de los rayos del sol.

Por lo tanto, conociendo el ángulo horario h, la declinación del sol d y la latitud l, podremos obtener los valores de los ángulo Cenit, Altitud y Azimut, que están definidos por las siguientes ecuaciones:

Cenit:

$$\cos \Psi = \cos l \cos h \cos d + \sin l \sin d \quad \text{Ec (1.10)}$$

Altitud:

$$\sin \beta = \cos l \cos h \cos d + \sin l \sin d \quad \text{Ec (1.11)}$$

Azimut:

$$\text{sen } \Psi = \text{sec } \beta \cos d \text{ sen } h \quad \text{Ec (1.12)}$$

donde de se obtiene con la siguiente ecuación empírica:

$$d = 23.45 \text{ sen } (360^\circ(n-80)/370) \quad \text{Ec (1.13)}$$

siendo n el número del día del año (positivo en el hemisferio norte y negativo en el hemisferio sur), y:

h= cero para el medio día solar y por cada hora equivale a 15° de longitud siendo positivo en las mañanas y negativo en las tardes.

#### 1.1.2.b ESTIMACION DE LA RADIACION SOLAR.

Constante Solar: La intensidad de la radiación solar sobre una superficie normal a los rayos del sol en el límite exterior de la atmósfera y cuando la tierra está en su distancia media al sol, se conoce como constante solar  $I_{sc}$  (1353 W/m<sup>2</sup>), esta constante varía aumentado aproximadamente un 3% en enero y disminuyendo en junio.

Por medio de una ecuación empírica, se puede obtener un cálculo más aproximado de la radiación incidente en la atmósfera terrestre en cualquier día del año, expresado con:

$$I_o = I_{sc} [1 + 0.033 \cos (360 n/370)] \quad (\text{Ec 1.14})$$

donde n es el número del día del año (ver **tabla 1.1**).

Sin embargo, en experimentos realizados se han observado ligeras

variaciones al cálculo anterior, dados en el parámetro A de la Tabla 1.1

Una vez que los rayos inciden sobre la atmósfera terrestre, estos pasan a través de ella, donde una parte puede ser interceptada por constituyentes como moléculas de aire, moléculas de agua, y partículas de polvo condensado, causando una dispersión de la radiación en prácticamente todas las direcciones.

También, parte de la radiación puede ser absorbida por el ozono presente en la parte superior de la atmósfera o por el vapor de agua más cercano a la superficie de la tierra, causando disminución en la intensidad de la radiación incidente.

De esta forma, solo parte restante de la radiación solar que no fue dispersada ni absorbida llega a incidir en forma directa sobre la superficie de la tierra y un 10% aproximadamente llega en forma difusa, que proviene de la bóveda celeste y de la dispersada por las moléculas de aire y agua en la atmósfera terrestre.

Como observamos, los rayos solares conforme van atravesando la atmósfera van interactuando con esta, por lo que es importante considerar que en cálculos de radiación solar, el espesor unitario de la atmósfera se toma con el espesor que atraviesan los rayos solares cuando el sol está en el Cenit, donde la masa de aire "m" es la razón de la longitud de la trayectoria de los rayos del sol a través de la atmósfera a la longitud cuando el sol está en el Cenit (ver figura 1.9).

Tabla 1.1

**FACTORES Y VALORES PARA DETERMINAR LA IRRADIACION SOLAR**

Fecha Nominal	Número de día	Grados de declinación	Parámetro			
			A	B	C	
			BTU/hr ft <sup>2</sup>	W/m <sup>2</sup>	Masa de Aire <sup>-1</sup>	Adimensional
Enero 21	19.85	-20	340	1230	0.142	0.058
Febrero 21	54.06	-10	385	1215	0.144	0.060
Marzo 21	80.00	-0.0	376	1186	0.150	0.071
Abril 21	110.47	+11	360	1136	0.180	0.097
Mayo 21	140.15	+20	350	1164	0.196	0.021
Junio 21	172.50	+23.45	345	1088	0.205	0.134
Julio 21	201.80	+20.60	344	1085	0.207	0.136
Agosto 21	232.00	+12.30	351	1107	0.201	0.122
Septiembre 21	263.00	0.0	365	1151	0.177	0.042
Octubre 21	292.30	-10.50	378	1192	0.166	0.078
Noviembre 21	324.20	-19.80	387	1221	0.149	0.063
Diciembre 21	357.50	-23.45	391	1233	0.142	0.063

Excepto para ángulos de altitud solar muy pequeños, la masa de aire es igual a la cosecante del ángulo de altitud.

Radiación Directa Normal: por lo tanto, para cálculos se dispone de un procedimiento sencillo para estimar la intensidad de la radiación directa normal  $I_{DN}$  a la superficie de la tierra durante días claros a cualquier hora, utilizando la fórmula siguiente:

$$IDN = A \exp [-(P/Po) \times (B/\cos \Psi )] \quad (\text{Ec. 1.15})$$

donde:

$\Psi$  : Es el ángulo Cenit.

A : Es la constante solar, según el día calculado (tabla 1.1)

B : Es el coeficiente de atenuación en proporcional espesor unitario dado en la tabla 1.1.

$P/P_0$ : Es la presión atmosférica relativa del lugar, dada en la siguiente ecuación.

$$P/P_0 = \exp (-1.184 \times 10^{-4} \times \text{altitud S.N.M. en mts.}) \quad (\text{Ec. 1.16})$$

Radiación sobre un Plano Horizontal: Una vez conocida la radiación normal directa  $I_{DN}$ , podemos calcular la radiación incidente en la superficie horizontal de la tierra  $H_D$ . En la fig 1.10 se muestra como la radiación incidente en la horizontal es el seno del ángulo de altitud  $\beta$  por  $I_{DN}$ .

Por lo tanto:

$$H_D = I_{DN} \text{ sen } \beta \quad (\text{Ec. 1.17})$$

Y, para calcular la radiación difusa sólo se multiplican  $I_{DN}$  por el factor  $c$  (ver tabla 1.1), que es un parámetro de difusión. Por lo tanto la radiación global sobre una superficie horizontal, es:

$$H_{\text{global}} = I_{DN} \text{ sen } \beta + C I_{DN} \quad (\text{Ec. 1.18})$$

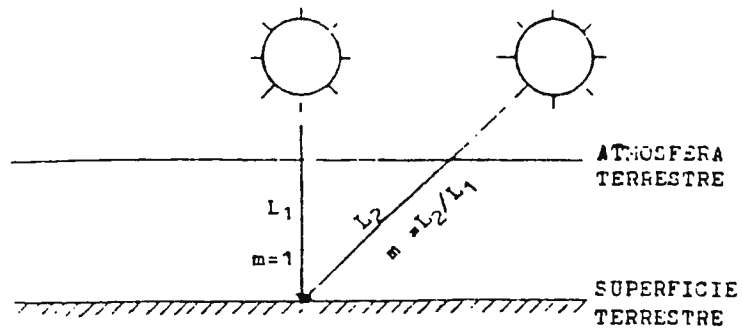


Fig.1.9 Masa de aire recorrida por los rayos solares.

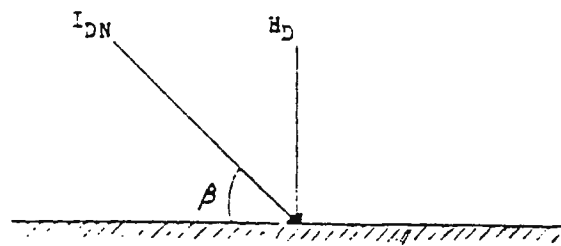


Fig.1.10 Radiación normal incidente en la superficie horizontal y su relación con el ángulo de la altitud.

### 1.1.2.c RADIACION EN UNA SUPERFICIE PLANA INCLINADA.

La relación entre los ángulos básicos y derivados con una superficie plana inclinada, se muestra en la **fig. 1.11** El ángulo de incidencia  $\theta$  es el ángulo entre la radiación directa del sol y una línea normal a una superficie plana inclinada hacia arriba un ángulo  $\delta$  de la horizontal, pudiendo ser determinado el ángulo  $\theta$  para un colector, en función de los ángulos básicos con el frente hacia el sur (en el hemisferio norte) utilizando la siguiente ecuación:

$$\cos \theta = \cos (1- \delta ) \cos d \cos h + \sin (1- \delta ) \sin(d) \quad (\text{Ec. 1.19})$$

Aunque también puede estar expresada en función de los ángulos derivados, de tal forma que:

$$\cos \theta = \cos \beta \cos (\gamma - \phi ) \sin \delta + \sin \beta \cos \delta \quad (\text{Ec. 1.20})$$

donde:

$\phi$  : Es el ángulo que existe entre la proyección sobre la horizontal de la normal del plano y el sur.

Entonces, si se conoce la radiación normal directa  $I_{DN}$ , el flujo de radiación en la superficie inclinada  $I$  directa, está dada en términos del ángulo incidente y de la altitud del sol, determinada por la expresión siguiente:

$$I \text{ directa} = I_{DN} \cos \theta = H_D \cos \theta / \sin \beta \quad (\text{Ec. 1.21})$$

siendo:

$$H_D = I_{DN} \text{ sen } \beta$$

Donde  $(\cos \theta) / (\text{sen } \beta)$  es algunas veces llamada factor de amplificación M. Desde que I directa no puede ser negativa,  $\cos \theta$  es cero, si la ec. 1.20 permite un valor para  $\theta$  mayor que  $90^\circ$  indica que el sol está detrás del colector.

Para calcular la radiación difusa en una superficie inclinada, se puede lograr por la siguiente ecuación:

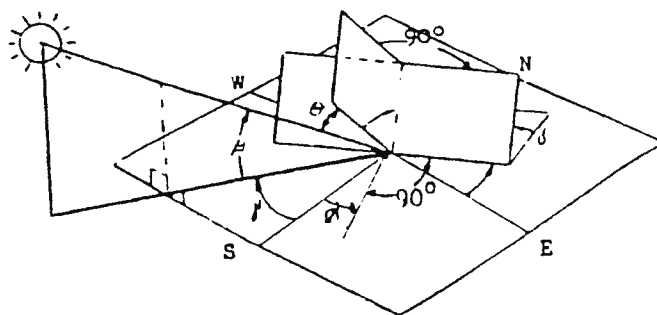
$$I_{\text{dif}} = H_{\text{dif}} [(1 + \cos \delta) / 2] \quad (\text{Ec. 1.22})$$

En esta ecuación no se asume que los alrededores no reflejantes y la luz difusa está distribuida uniformemente sobre el cielo.

Si los alrededores tienen una reflectancia  $e$  entonces:

$$I_{\text{dif}} = M_{\text{dif}} [(1 + \cos \delta) / 2] + e (H_D + H_{\text{dif}}) [1 - \cos \delta] / 2 \quad (\text{Ec. 1.23})$$

Donde  $e$  es aproximadamente 0.2 para tierra ordinaria, 0.8 para nieve y 0.15 para techo de pavimento. Por lo tanto, de esta manera podemos conocer la cantidad de radiación solar y los ángulos de incidencia sobre un plano inclinado, que en nuestro caso es un colector solar, a cualquier hora y rotación del año en un punto determinado.



*Fig.1.11 Radiacion en la superficie plana inclinada.*

### **1.1.3 RADIACION SOLAR EN EL SALVADOR**

#### **1.1.3.a ENERGIA SOLAR DISPONIBLE EN EL SALVADOR**

Para nuestros fines, nos servimos de los resultados de la evaluación del potencial de la energía solar, la tabla 1.3 muestra en resumen los promedios mensuales de la radiación solar global diaria en MJ/m<sup>2</sup>, para todas las estaciones consideradas. También se ha calculado el promedio anual de la radiación solar global diaria. Para las estaciones para las cuales existe información de radiación global diaria se da también el número mínimo de años con el cual se calculó el promedio así como su desviación standard. Para las estaciones que solamente tienen brillo solar se da el valor de los coeficientes empleados en el cálculo de la radiación.

#### **1.1.3.b CONCLUSIONES**

El promedio anual de la radiación solar diaria varía entre 13.88 (Estación las Pilas a 1960 m sobre el nivel del mar) y 19.15 MJ/m<sub>2</sub> (estación matriz), totalidad valores anuales de energía solar entre 5066 MJ/m<sup>2</sup> (=1407 KWh/m<sub>2</sub>) y 6960 MJ/m<sup>2</sup> (=1942 KWh/m<sup>2</sup>). Comparada esta cifra con el valor radiación global anual máximo terrestre que varía entre 8000 y 8500 MJ/m<sub>2</sub>, la energía global anual en las estaciones consideradas varía entre 63% y 87% del máximo disponible en los países con mayor disponibilidad de energía solar en el mundo.

La mayoría de las estaciones (20 de 23) tienen niveles de disponibilidad de energía solar anual sobre 5800 MJ/m<sup>2</sup> (sobre 73% del máximo mundial).

La variación mensual de la radiación solar global diaria comparado con el

valor medio anual es pequeña, lo cual es fundamentalmente importante para el diseño y dimensionamiento de equipo solares ya que los dispositivos de conversión y acumulación en este caso capacidades más pequeñas que cuando se presentan fuertes variaciones mensuales.

De acuerdo a los resultados el potencial de la energía solar no es solamente elevado y distribuido bastante uniformemente durante el año sino que también las condiciones climáticas favorecen su utilización en diferentes aplicaciones térmicas y fotovoltaicas. [3]

**TAB. 1.2 ENERGIA SOLAR DISPONIBLE EN EL SALVADOR**  
**(Calculada a partir de información de radiación y brillo solar)**  
 Tomada de la fuente: Evaluación del Potencial de la Energía Solar y Eólica y Perspectivas para su Utilización y Desarrollo.

NOMBRE ESTACION	CODIGO	LATITUD grad	LONGITUD grad	ALTURA G	PROMEDIOS MENSUALES DE LA RADIACION GLOBAL DIARIA *(MJ/a <sup>2</sup> )*					
					ENE	FEB	MZO	ABR	MAY	JUN
Bicio. La Carrera	U11	13.33	88.53	75	17.67 6 0.65	19.27 6 0.66	19.94 6 0.90	18.73 6 1.07	17.36 6 1.04	17.29 6 0.78
La Unión	N15	13.33	87.88	95	17.16 13 1.24	18.65 13 1.96	19.89 13 1.89	18.95 13 2.37	17.44 12 2.31	18.06 12 2.09
Sta. Cruz Poriillo	V06	13.44	88.80	30	17.0	18.9	19.7	19.0	17.5	16.3
Bfcio. El Papalon	M06	13.44	88.12	80	17.0	18.8	19.9	19.5	17.8	17.0
Santiago de María	U06	13.12	88.47	920	18.2	20.1	21.1	20.0	17.5	16.3
Acajutla	T06	13.57	89.33	15	17.3	19.0	13.7	19.4	17.6	16.6
Santa Tecla-BM	L08	13.88	89.29	965	18.1	19.9	20.8	20.3	17.7	16.5
Matriz	S27	13.63	89.14	650	18.10 11 1.05	19.86 10 1.65	21.58 11 1.15	21.58 11 1.39	18.67 10 1.39	19.92 10 1.86
San Francisco Gotera	Z02	13.69	83.10	250	18.1	20.2	21.1	20.6	18.7	18.3
Apastepeque	V13	13.70	88.75	570	16.55 8 1.09	18.66 8 1.05	19.15 8 1.48	18.38 8 1.87	17.35 8 1.51	16.79 8 1.50
Observatorio-SS	S05	13.70	89.21	710	17.19 13 1.20	18.64 14 1.61	13.69 14 1.37	19.23 14 1.77	17.04 13 1.52	16.97 14 2.09
Sesori	M18	13.71	88.37	195	16.3	20.3	21.3	20.5	18.5	17.9
Cerro Cacahuatique	M23	13.75	88.23	1370	17.2	19.3	20.2	17.4	15.5	15.6

NOTAS:

- > Numero de años y desviación standard para estaciones con información de radiación solar
- > Valor coeficiente a y b para estaciones con información de brillo solar

**TAB. 1.2 (CONTIN.) ENERGIA SOLAR DISPONIBLE EN EL SALVADOR**  
**(Calculada a partir de información de radiación y brillo solar)**

PROMEDIOS MENSUALES DE LA RADIACION GLOBAL DIARIA *(MJ/a <sup>2</sup> )*										NOMBRE ESTACION
JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DBR	ANUAL	A	B	
17.23 6 0.78	19.35 6 0.81	19.52 6 0.97	17.36 6 1.26	17.31 5 1.02	17.16 5 0.94	16.90 5 0.51	18.20 5 1.40			Bfcio. La Carrera
18.06 12 2.09	19.03 13 2.83	18.01 13 3.12	17.45 13 2.13	17.05 13 1.74	16.32 13 1.58	16.39 13 1.53	17.87 12 2.38			La Unión
16.3	18.3	18.3	16.3	16.1	16.4	16.3	17.51	0.211	0.419	Sta Cruz Porrillo
17.0	18.8	18.7	16.8	16.7	16.3	16.3	17.80	0.211	0.419	Bfcio. El Papalon
16.3	19.2	19.0	15.3	16.0	17.4	17.4	18.15	0.214	0.433	Santiago de Maria
16.8	18.3	17.5	16.1	16.2	16.5	16.5	17.55	0.211	0.413	Acajutla
16.3	19.1	13.3	16.4	16.3	17.1	17.5	18.18	0.249	0.412	Santa Tecla-BM
18.32 10 1.56	21.22 10 1.47	20.29 10 2.50	17.54 10 1.95	17.11 10 1.85	17.93 9 0.62	17.15 10 0.95	19.15 9 2.23			Matriz
18.3	19.9	19.7	17.8	17.7	17.5	17.5	18.93	0.230	0.448	San Francisco Gotera.
16.79 8 1.50	18.43 8 2.95	18.49 9 2.41	16.45 9 2.17	16.07 8 1.53	16.40 8 0.95	15.78 8 1.12	17.38 8 2.10			Apastepeque
16.97 14 2.09	19.59 13 1.72	18.34 13 2.64	16.66 13 2.02	16.80 14 1.48	17.20 14 0.95	16.56 14 1.38	17.83 13 2.05			Observatorio-66
17.9	19.5	19.0	16.9	16.8	17.2	17.3	16.62	0.230	0.446	Sesori
15.6	18.6	17.5	15.6	14.7	15.7	15.9	16.93	0.214	0.433	Cerro Cacahuatique

**TAB. 1.2 ENERGIA SOLAR DISPONIBLE EN EL SALVADOR**  
**(Calculada a partir de información de radiación y brillo solar)**

NOMBRE ESTACION	CODIGO	LATITUD grad	LONGITUD grad	ALTURA G	PROMEDIOS MENSUALES DE LA RADIACION GLOBAL DIARIA *(MJ/a <sup>2</sup> )*					
					ENE	FEB	MZO	ABR	MAY	JUN
San Andres	L04	13.81	89.41	460	17.9	19.3	20.1	19.8	18.7	17.1
Cerro Verde	A35	13.83	89.62	2030	16.1	17.5	17.6	16.6	15.4	15.5
Finca Los Andes	A18	13.84	89.63	1770	15.3	18.2	18.7	19.6	16.2	15.0
Cerron Grande	B10	13.94	88.91	245	17.4	18.6	21.3	20.7	18.0	17.8
Ahuachapan	H08	13.94	89.86	725	18.22 13 1.39	19.74 13 1.84	20.94 13 1.14	20.57 14 1.74	18.89 13 1.52	18.13 13 1.62
Ingenio La Cabaña	S02	14.02	89.19	270	18.2	20.4	21.2	20.6	19.0	18.3
La Galera	Z04	14.04	88.09	1900	15.38 7 0.74	17.23 7 1.01	18.28 7 0.84	14.83 7 1.07	15.20 5 0.96	16.35 6 1.89
Nueva Concepción	G03	14.12	89.27	320	17.22 14 1.05	18.35 14 1.83	20.01 14 1.33	19.71 14 1.67	18.35 13 3.17	18.44 13 2.34
Las Pilas	G13	14.37	89.08	1960	13.51 6 1.05	14.61 6 1.50	16.17 6 0.91	15.31 6 1.72	13.63 5 1.65	13.46 5 1.82
Planes Montecristo	A02	14.40	89.36	1851	16.17 5 1.23	17.18 5 1.53	17.13 5 1.15	14.95 6 2.89	12.73 6 0.70	12.76 6 2.18

NOTAS:

- Numero de anos y desviación standard para estaciones con información de radiación solar
- Valor coeficiente a y b para estaciones con información de brillo solar

**TAB. 1.2 (CONTIN.) ENERGIA SOLAR DISPONIBLE EN EL SALVADOR**  
**(Calculada a partir de información de radiación y brillo solar)**

PROMEDIOS MENSUALES DE LA RADIACION GLOBAL DIARIA *(MJ/a <sup>2</sup> )*									NOMBRE ESTACION
JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DBR	ANUAL	A	B	
19.3	19.0	16.4	16.6	16.5	17.1	18.15	0.230	0.448	San Andres
19.5	18.7	14.2	14.4	15.7	15.6	16.41	0.214	0.483	Cerro Verde
17.5	16.9	14.3	13.6	13.6	13.6	16.05	0.214	0.483	Finca Los Andes
20.1	19.6	16.8	17.3	16.3	16.6	18.50	0.230	0.448	Cerron Grande
20.02	19.09	16.60	17.26	17.74	17.40	18.72			Ahuachapan
13	13	13	13	13	13	13			
1.50	1.74	1.85	1.69	1.05	1.33	2.04			
19.9	20.1	16.8	17.8	18.0	16.5	18.90	0.230	0.448	Ingenio La Cabaña
15.42	12.93	13.29	13.29	14.02	16.48	15.33			La Galera
5	6	5	6	6	6	5			
2.32	2.13	1.33	1.08	0.89	1.40	2.15			
19.25	19.51	17.90	17.87	17.14	16.48	18.41			Nueva Concepción
13	13	12	12	13	6	12			
2.25	1.41	1.77	1.74	1.53	1.40	2.20			
14.84	15.27	11.99	12.90	12.28	12.49	13.88			Las Pilas
4	4	4	5	6	6	4			
0.75	1.00	0.62	1.48	1.12	0.75	1.82			
16.92	14.33	11.74	13.79	15.06	14.96	14.77			Planes Montecristo
6	6	5	6	7	7	5			
2.17	2.18	2.46	1.45	0.59	1.45	2.45			

## **1.2 CAPTACION ENERGIA SOLAR**

### **1.2.1 CONVERSION ENERGIA SOLAR A ENERGIA TERMICA**

Para aprovechar el calor del SOL es necesario captarlo de alguna manera. Si la finalidad perseguida no requiere temperaturas elevadas, es suficiente captar los vatios por unidad de superficie que nos llegan, utilizando los llamados **colectores planos**. Pero si necesitamos energía a mayor temperatura, tenemos que recurrir a sistemas que nos la concentren en el punto o zona de nuestro interés, utilizando los colectores concentradores.

#### **1.2.1.a COLECTORES PLANOS**

Se fundamentan en el "efecto invernadero". Hay materiales transparentes a las radiaciones visibles e infrarrojas de pequeña longitud de onda, pero opacas a los rayos infrarrojos de mayor longitud de onda (radiación calorífica), como ocurre con el vidrio y el plástico. Cuando los rayos luminosos penetran en un recinto cubierto por estos materiales calientan dicho recinto, el cual a su vez emite radiaciones, pero al ser de mayor longitud de onda, se reflejan sin poder escapar al exterior, dando como resultado una progresiva elevación de temperatura, hasta llegar a un estado de equilibrio.

Si una caja de gran superficie de exposición al SOL se pinta interiormente de negro mate y se cubre con un vidrio, tenemos un captador plano de radiación solar. Se consigue evitar las pérdidas por conducción cubriendo la cara no expuesta al SOL, así como los laterales, con un material aislante, como puede ser la lana de vidrio o el poliuretano expandido. Las pérdidas por convección, aunque no son de gran importancia, se pueden eliminar

haciendo el vacío en el interior de la caja (aunque en la práctica no se hace por no ser rentable). Ello se logra haciendo circular por el fondo de la caja un fluido a través de un serpentín. El fluido utilizado ordinariamente es el agua. Las dimensiones del colector, materiales utilizados forma del serpentín, etc., varían de unos fabricantes a otros; pero en todos los casos se persigue una mayor eficacia con un precio mínimo.

El rendimiento o eficacia de un colector plano cociente entre el calor obtenido y la radiación incidente varía con la intensidad de la radiación, con la velocidad del viento (la velocidad del viento aumenta las pérdidas por convección), con la inclinación respecto a la horizontal, con la diferencia de temperatura entre la cubierta de vidrio y el absorbedor, aumenta si en vez de una cubierta de vidrio son dos o más, aumenta si en vez de pintura negra corriente se utiliza pintura selectivas, las cuales tienen un coeficiente de absorción elevado para las radiaciones visibles e infrarrojas de corta longitud de onda mayores de aproximadamente 2 micras; varía con el tipo y espesor del vidrio de la cubierta (el vidrio verdoso que contiene hierro absorbe las radiaciones solares, mientras que el Pyrex o el de silicio son transparentes a ellas), aumenta si se evita el contacto con el suelo (pues así se evitan pérdidas por conducción), si existe o no vacío entre la cubierta y la placa absorbedora, etc. En las figuras 1.12, 1.13 y 1.14, se dan las variaciones de la eficiencia de los colectores planos en función de algunos de los factores que, mencionamos. En todos los casos se representa en ordenadas la eficiencia y en abcisas la diferencia de temperatura entre el absorbedor y la cubierta de vidrio exterior, que para efectos prácticos es aproximadamente igual a la diferencia de temperatura del fluido entre la salida y la entrada al colector.

Los colectores planos se montan mirando hacia el Sur en el Hemisferio Norte con una inclinación respecto al a horizontal que varía con la latitud del lugar y la utilización. Las principales ventajas de los colectores planos con relación a los concentradores (los cuales se estudiarán en el apartado siguiente son: cuestan más baratos, aprovechan la radiación solar difusa y no requieren ningún mecanismo de seguimiento del SOL, ya que van fijos. Sin embargo, no son utilizables cuando interesan temperaturas elevadas y una demanda energética grande. [4] [5]

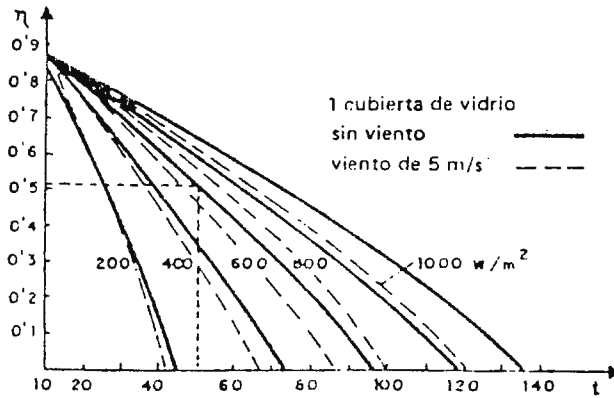


Fig. 1.12 Efecto del viento para la eficiencia de un colector plano.

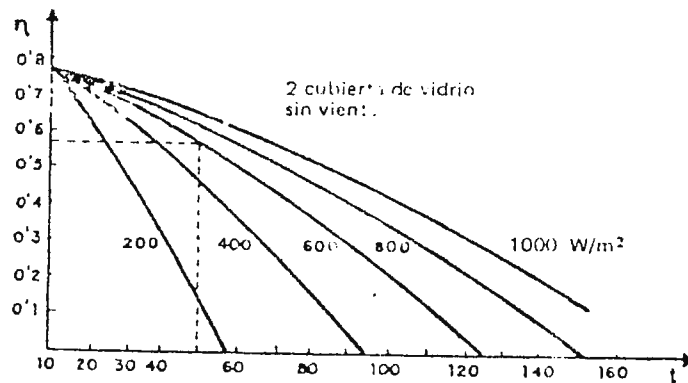


Fig. 1.13 Efecto del número de cubiertas para la eficiencia de un colector plano.

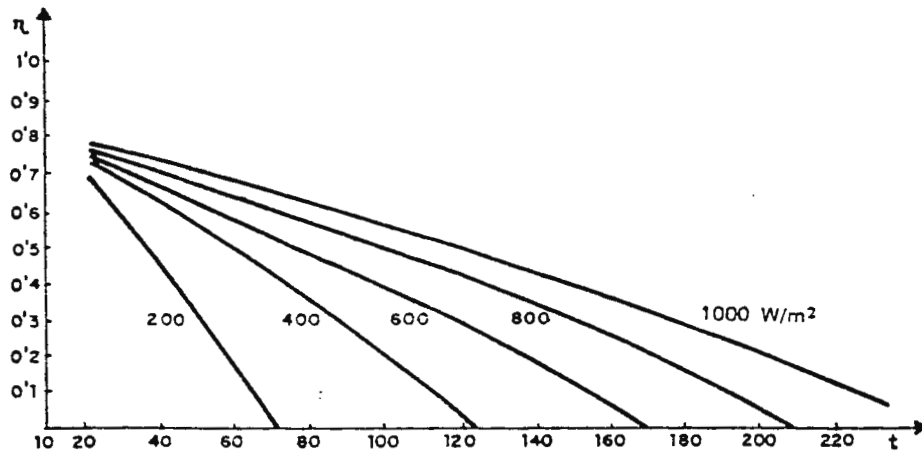


Fig.1.14 Eficiencia de un colector plano con una sola cubierta de vidrio, tratada la superficie del absorbedor con pintura negra selectiva.

### **1.2.1.b COLECTORES CONCENTRADORES**

En este apartado vamos a referirnos a aquellos dispositivos que captan el calor del SOL en una superficie más o menos grande y lo concentran en una zona reducida. A tal fin se define el "factor de concentración, C" como la relación entre la acción transversal del sistema óptimo de captación de la radiación solar y la superficie absorbedor. Así cuando decimos que este coeficiente es igual a  $60:2 = 30$ , queremos decir que la radiación se recibe en un área proporcional a 60 y se concentra en un área proporcional a 2. Lógicamente, la densidad de energía sobre el absorbedor es C veces mayor que la de la radiación solar captada.

Estos dispositivos utilizan esencialmente la porción directa de la radiación solar y necesitan estar orientados continuamente hacia el SOL.

Existen muchas posibilidades de concentrar la radiación solar combinaciones de espejos planos reflectores cilíndrico-parabólicos reflectores parabólicos y lentes de Fresnel (cilíndricos o esféricas). Dado que los diversos tipos de lentes (sean de Fresnel o vulgares lupas) no se pueden usar para grandes acopios de energía, nos referimos solamente a los sistemas reflectores.

### **CLASIFICACION DE COLECTORES SOLARES DE CONCENTRACION**

Los colectores solares de concentración pueden ser clasificados de acuerdo a:

- a) El rango de temperaturas de operación, específicamente la diferencia de temperaturas entre la entrada y la salida del tubo absorbedor.
- b) La facilidad del colector para mantener el sol dentro de un ángulo de aceptación adecuado.

c) El tipo de seguimiento: de doble o simple eje.

La figura 1.15 representa una gráfica de comportamiento cualitativo del rango de temperatura de operación de varios tipos de colectores de concentración. Los concentradores de curvatura simple tienen, por lo general, una razón de concentración hasta de 50 y las unidades de doble curvatura, desde 30 hasta varios cientos. Los sistemas de curvatura simple, pueden alcanzar temperaturas de salida hasta de 300°C.

Las condiciones de seguimiento dependen de la mitad del ángulo de captación,  $\Theta$  max. El mayor valor de  $\Theta$  max, requiere un mecanismo de seguimiento seguro; se puede identificar dos niveles de seguimiento:

b) Cambio intermitente de inclinación o completamente fijos.

c) Superficies reflectoras, refractoras o absorbedor de seguimiento continuo. Si se orientan de Este a Oeste, requieren 30% al día movimiento aproximadamente; si se orientan de Norte a Sur, requieren 15% hora de movimiento. Ambos casos deben acomodarse a 23°/ año, que representan el ancho angular de variación de la declinación solar anual.

Los concentradores de curvatura simple pueden ser de uno u otro tipo de seguimiento, pero los de doble curvatura, por lo general, son de seguimiento continuo, y poseen una razón de concentración ( $C_r$ ) alta. [3]

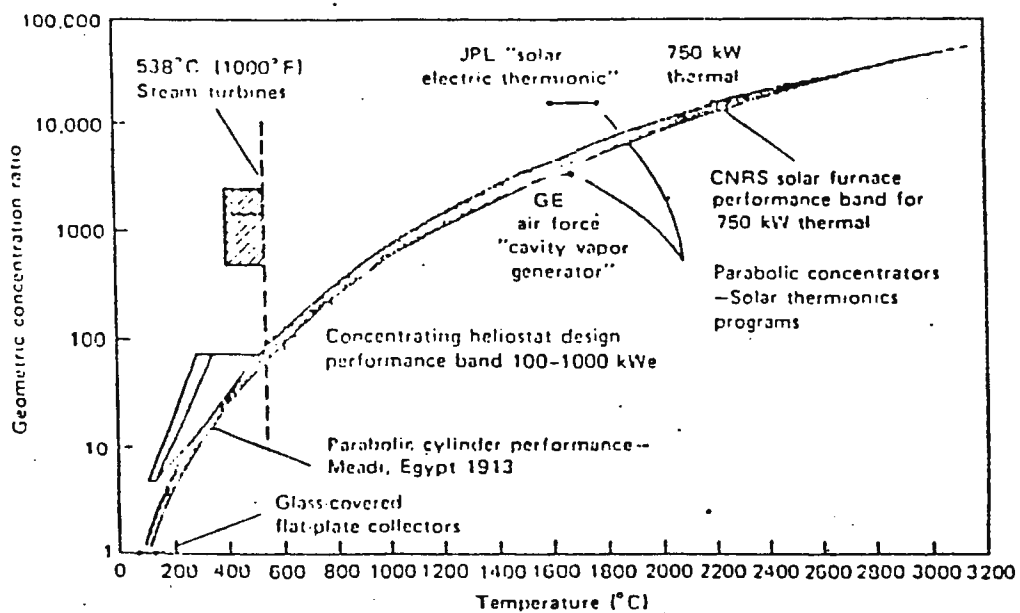


Fig. 1.15 Rangos de temperatura de los colectores solares de concentracion, comparados con los colectores de plana placa y turbinas de vapor.

## **1.2.2 COMPONENTES DE UN COLECTOR SOLAR PLANO**

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.

### **1.2.3.a 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 calentadoras para agua de piscinas, no se necesita ninguna cubierta.

### **1.2.3.b 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. [6]

### **1.2.3.c AISLANTE TERMICO**

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. [6]

### **1.2.4 COLECTOR PARA CALENTAR AIRE**

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. 1.16).

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, madera, de leña, de granos básicos, etc.
  - De dos cubiertas: Deshidratadoras 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 aleteando, etc.
  - De área norma: Láminas lisas, películas plásticas, etc.
  
- d. Por la relación de paso del aire en el absorbedor Figs. 1.17, 1.18, 1.19.
  - Aire arriba del absorbedor.
  - Aire abajo del absorbedor.
  - Aire arriba y abajo del absorbedor.
  - Aire en flujo cruzado respecto al absorbedor.

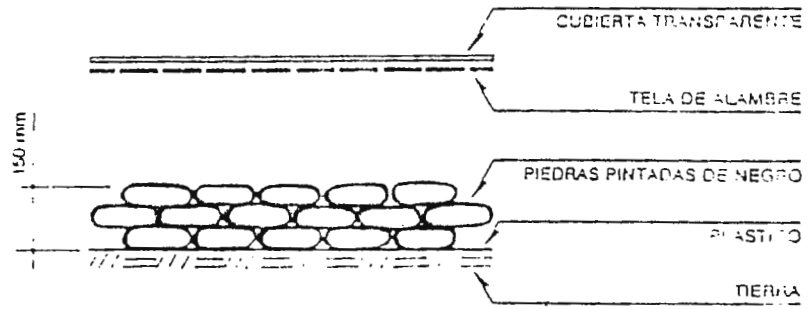


Fig. 1.16 Colector para calentamiento de aire.

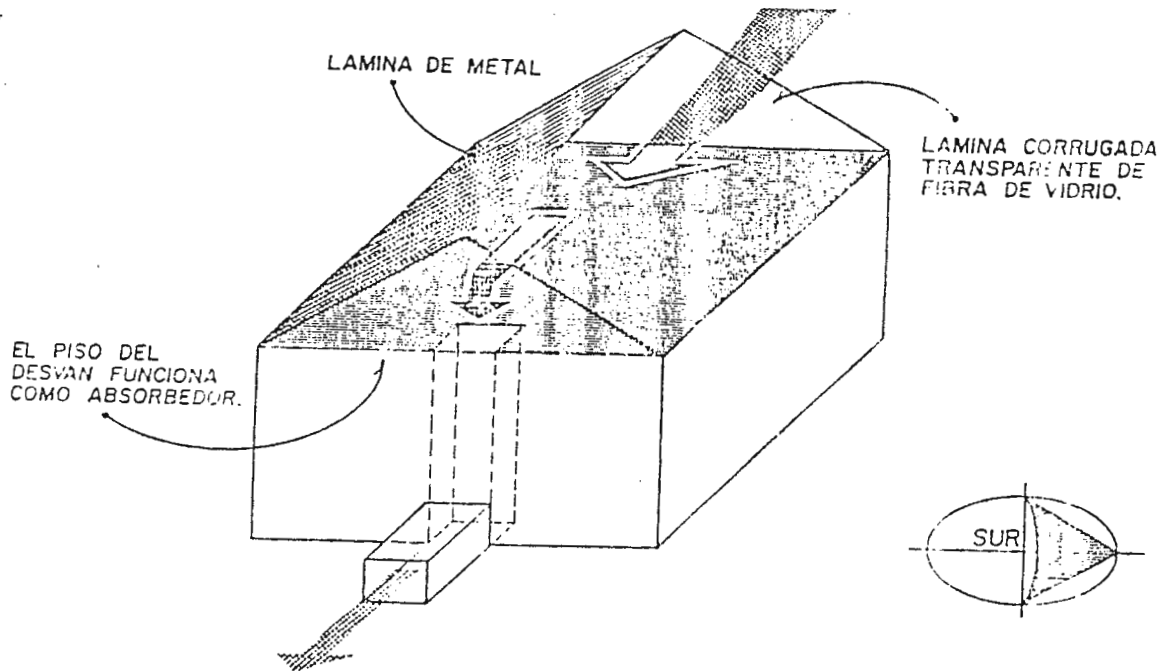


Fig. 1.17 Flujo de aire por arriba del absorbedor.

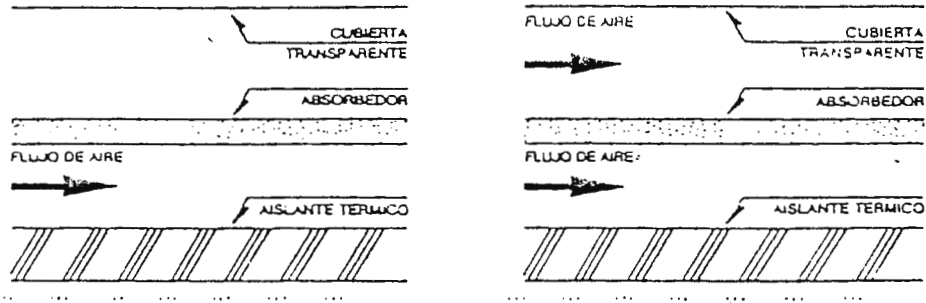


Fig. 1.18 Flujo de aire por ambos lados del absorbedor.

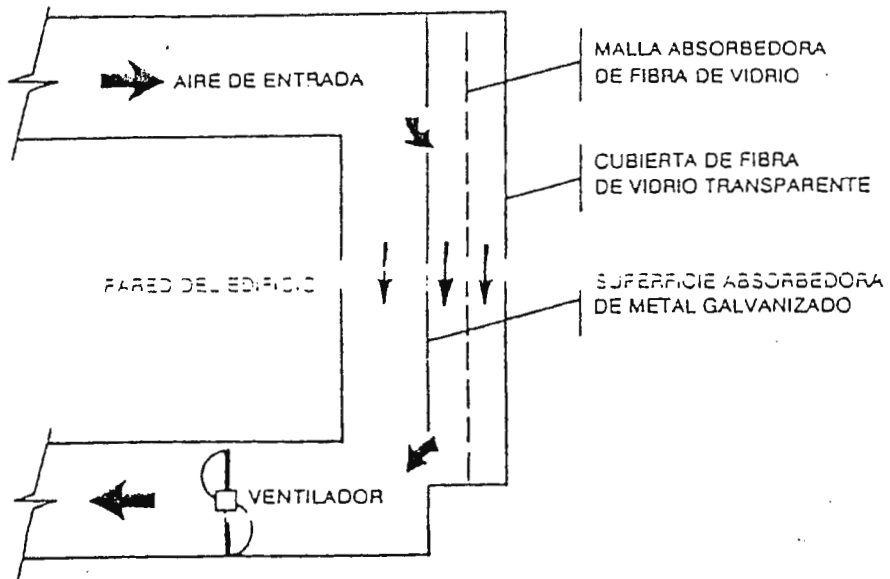


Fig. 1.19 Flujo de aire cruzado respecto al absorbedor.

## REFERENCIAS

- [1] Mecanismo Físico de la radiación y Propiedades de la radiación EP. Holman. transferencia de calor, Editorial CECSA, segunda impresión, México.
- [2] Radiación Solar, Angulos básicos y derivados tierra sol, estimación de la radiación solar y radiación en una superficie plana inclinada.  
Eduardo A. Lerma y Alfredo Perez-Laborie, Diseño de un sistema de refrigeración por absorción utilizando la energía solar como fuente alternativa (TESIS), México, 1985.
- [3] Radiación Solar en El Salvador y Colectores Concentradores  
Humberto Rodríguez M. Evaluación del Potencial de la Energía Solar y Eolica y Perspectivas de su utilización y desarrollo, Informa Final Volumen 1, El Salvador, Julio 1985.
- [4] Conversión Tecnológica, Energía Térmica, colectores planos y colectores concentradores.  
José Acosta Rubio, Energía Solar y aprovechamiento, Editorial Paraninfo, España 1983.
- [5] Colectores Planos  
Valdecir antoninho Dalpasquale, Secado de granos: Natural, Solar y a bajas temperaturas, FAO, Imprentra Cran BRASIL, 1985.
- [6] Componentes de un colector solar, colector para calentar aire, materiales para colectores y eficiencia en los colectores solares.  
ICAITI, Secado Solar de Granos D-307 ICAITI.

**CAPITULO 2.**

## **INTRODUCCION**

### **CAPITULO 2**

Para poder definir las características y fundamentos del secado de granos, se presentan en el este capítulo los resultados de una investigación de campo sobre el cultivo de granos y los problemas que acarrea el secado tradicional.

Esta misma investigación nos muestra que tipo de granos son los más cultivados por los agricultores, así como la ubicación geográfica de dichos cultivos.

Las condiciones que deben reunir los granos para su seguro manejo y almacenamiento, están dadas para los granos que más se cultivan según nuestras investigaciones de campo.

## 2.1) INVESTIGACION DE CAMPO SOBRE EL CULTIVO DE GRANOS Y SUS PROBLEMAS DE SECADO.

Con el propósito de conocer las localidades, respectivos problemas de secado, se realizaron una serie de preguntas en algunas asociaciones agrícolas ubicadas en diferentes zonas del país. Para ello se emplearon dos técnicas: la primera, una entrevista con el encargado de la cooperativa y a la persona que tuviera mayor conocimiento del tema.

La segunda técnica fue la resolución de un cuestionario pre-elaborado mostrado en el anexo I.

De 30 entrevistadas se obtuvieron los siguientes resultados a las diferentes preguntas:

a) Granos más cultivados

No. de Personas	Tipo de Grano	Porcentaje (%)
24	Maíz, Frijol	80.0
4	Arroz	13
2	Ajonjolí	
$\Sigma = 30$		$\Sigma = 100$

Ver gráfica 2.1

Destino de la Cosecha.

No. de Personas	Destino	Porcentaje (%)
15	Consumó propio	52
12	Venta	43
3	Semilla	5
$\Sigma = 30$		$\Sigma = 100$

c) Terreno utilizado para el secado natural .

No. de Personas	Terreno	Porcentaje (%)
26	El mismo cultivo	86
4	Otros	14
$\Sigma = 30$		$\Sigma = 100$

Ver gráfica 2.3

d) Problemas que afectan el secado.

No. de Personas	Problemas	Porcentaje (%)
24	Lluvia, viento, roedores.	68
6	Hurto	32
$\Sigma = 30$		$\Sigma = 100$

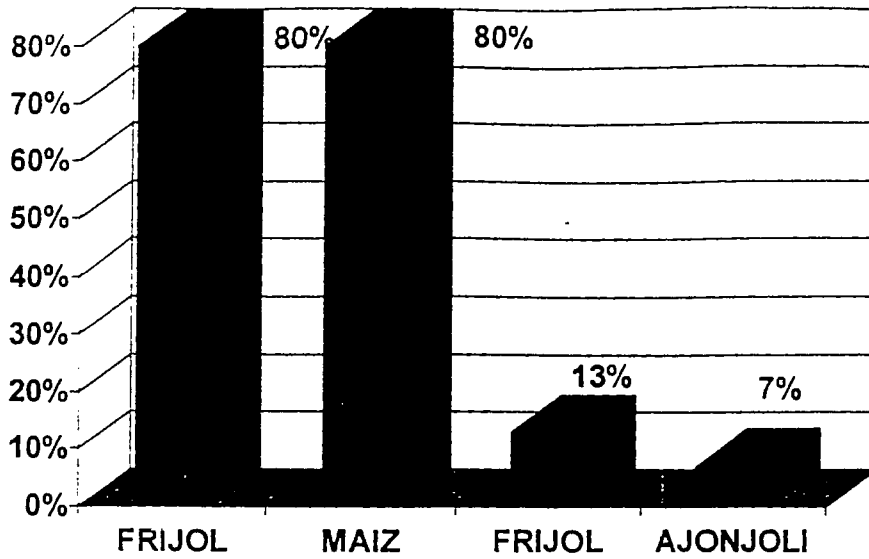
Ver gráfica 2.4

### 2.1.1) CONCLUSIONES DE LA INVESTIGACION DE CAMPO SOBRE LOS GRANOS COMUNMENTE CULTIVADOS Y LOS PROBLEMAS EN EL SECADO DE DICHOS PRODUCTOS.

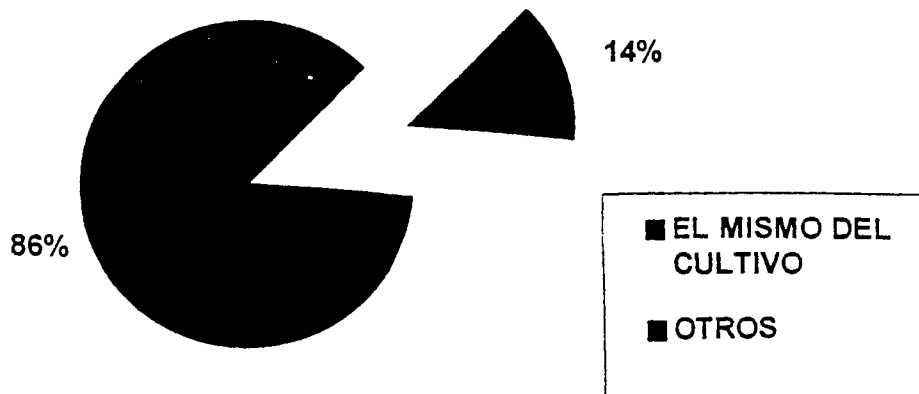
I) Los granos que se cultivan en mayor cantidad son el maíz y el frijol, y en menor cantidad el arroz.

- II) El destino que tiene la cosecha es para consumo propio de los agricultores y una cantidad para la venta, es muy poca la gente que separa grano para semilla.
- III) El método de secado que usan es el secado natural en el mismo terreno de cultivo; lo que no permite usar el terreno para otra cosecha o la siembra de hortalizas.
- IV) Durante el período de secado natural los problemas más sensibles son: La lluvia, los roedores y el hurto.
- V) La cantidad de producto que se pierde por el hurto es un parámetro que el agricultor muy difícilmente puede determinar con exactitud.
- VI) El hurto del producto genera una actividad adicional por el agricultor ya que tiene que destinar tiempo por lo general en las noches cuando el terreno esta próximo.
- VII) Si se implementa un método de secado no tradicional; los problemas son potencialmente reducibles
- VIII) Cualquier método de secado por implementar deberá ser factible para las condiciones técnico-económicas de los agricultores en pequeña escala.
- IX) La mejora del proceso de secado permitirá una mayor cantidad de impresos en los agricultores ya que la cantidad de grano recolectado aumentará y el porcentaje de consumo propio permanece constante, aumentando el porcentaje para la venta.

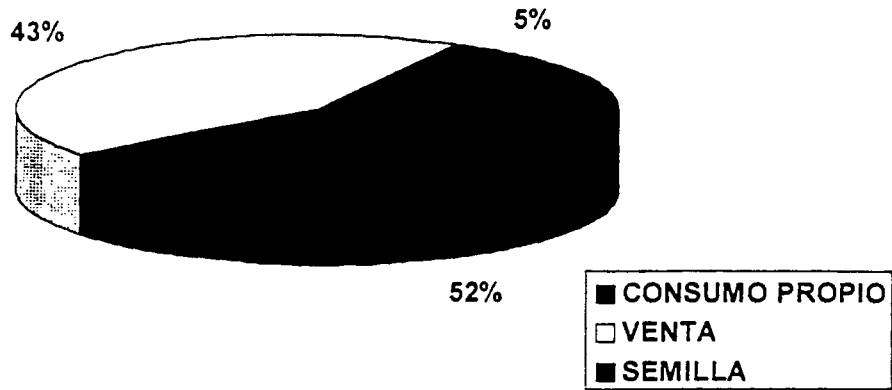
## CANTIDAD DE GRANOS (En Porcentaje)



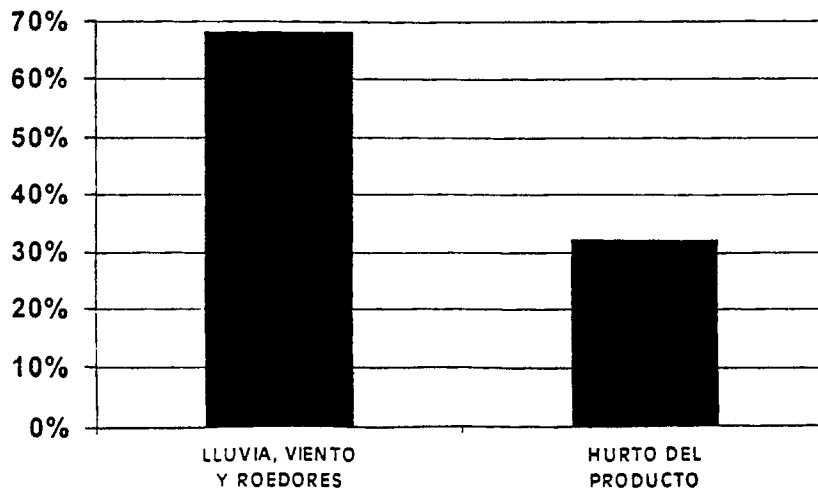
## TERRENO UTILIZADO PARA EL SECADO (En Porcentaje)



## DESTINO DE LA COSECHA (En Porcentaje)



## PROBLEMAS QUE AFECTAN DURANTE EL SECADO (En Porcentaje)



## **2.2) UBICACION DE CULTIVOS EN EL SALVADOR**

La Tabla 2.1 muestra que los mayores problemas de secado se dan por excesiva cantidad de insectos que atacan los granos cuando éstos están en el período de secado; el viento y la lluvia hacen más aguda esta situación. La anterior conlleva a dos situaciones. Una de disminución en la producción con ello una alza en los precios del producto y un ineficiente uso de la energía solar, debido a la falta de mecanismos apropiadas, ya que la mayoría de las haciendas - cooperativas se encuentran en una zona de mucha incidencia solar y el secado se realiza a la intemperie. Se observa además que los cultivos más comunes en las zonas visitadas son maíz, frijol, arroz y sorgo los cuales representan los granos básicos en El Salvador.

### **2.2.1) CLASIFICACION DE LOS GRANOS**

#### **b) Clasificación del Maíz.**

Se entiende como maíz desgranado, el conjunto de granos enteros y quebrados procedentes de cualquier variedad de la gramínea “Z Mays”. El maíz se clasifica comercialmente en base a su color textura. De acuerdo a su color, se agrupa en tres clases: 81 amarillo y mezclado, y de acuerdo a su textura en tres tipos, dentado duro (tipo flint) y mixto (1).

Tabla 2.1

DEPARTAMENTO	MUNICIPIO	NOMBRE DE HACIENDA	GRANO CULTIVADO	PROBLEMA DE SECADO
Sonsonate	Caluco	Plan de Amayo	Maíz, Frijol, Arroz, Ajonjolí	Excesivo viento, Lluvia e Insectos.
	Izalco	Las Lajas	Café, Maíz y Frijol.	Poco espacio de secado, excesivos insectos.
	San Julian	Los Lagartos	Café, Maíz, Frijol, Arroz, Maicillo, Caña de Azúcar.	Excesiva cantidad de insectos y lluvia.
La Libertad	Colón	Zapotitan	Frijol, Hortalizas.	Excesiva cantidad, de insectos y lluvia.
	Colón	San Andrés	Frijol, Maíz, Sorgo, Hortalizas.	No presenta problemas de secado.
	Colón	Pasatiempo	Café, Maíz.	No presenta problemas de secado.
San Salvador	San Salvador	Apopa	Sorgo	Problemas de espacio e insectos.
La Paz	San Luis Talpa	Astoria	Maíz, Sorgo, Frijol.	Excesivo viento, insectos y lluvia.
	Zacatecoluca	Escuinila	Maíz, Sorgo, Arroz.	Excesivo viento, insectos y lluvia.
San Vicente	San Vicente	Lempa Acahuapa	Maíz, Frijol, Arroz, Hortalizas.	No presenta problemas de secado.
San Miguel	San Miguel	San Francisco Anchico	Caña, Algodón	Lluvia, insectos.
	Chapeltique	Singaltique	Sorgo Forragero	Viento, Lluvia.
	San Miguel	La Esperanza	Maíz, Frijol.	Viento, Lluvia.
Usulután	Jiquilisco	El Tercio	Maíz, Sorgo, Arroz.	Lluvia, Insectos, Viento.
	Jiquilisco	Valle de San Juan No. 1.	Maíz, Sorgo.	Lluvia, Insectos, Viento.
	San Alejo	La Maltez	Sorgo.	Lluvia, Insectos.
La Unión	Conchagua	San Ramón	Sorgo Forragero, Algodón.	Viento, Insectos.
	El Carmen	El Guanacastal	Maíz, Sorgo.	Lluvia, Insectos, Viento.

Las definiciones en cuanto a tipo y clase varían de país a país y de año con año, de acuerdo a políticas o lineamientos técnicos. Ejemplo: Para las normas centroamericanas, el maíz clase blanco será todo lote de granos que presentan dicha característica, un ligero color pajizo claro, cremoso o rosado los granos no afecta su clasificación como tal. Esta clase no podrá tener más de 6% de maíz de otros colores. En cambio en las normas norteamericanas, maíz blanco será todo lote de granos que presentan dicha característica y puedan contener no más del 2% de granos de maíz de otros colores. (1)

Otros factores que deben tomarse en cuenta para la clasificación del maíz son: El porcentaje de Impurezas, el contenido de humedad, el peso específico, los granos dañados por insectos, roedores, hongos, pájaros y la cantidad de granos no desarrollados. (1)

El maíz dentado tiene un hundimiento en la corona del grano, debido a la continuación natural de una zona del endosperma almidonado, relativamente blando.

El maíz duro tiene una capa córnea del endosperma, más duro en la zona de la corona y disminuye el tamaño durante el secado, de modo que no forma ningún hundimiento. (2)

En la tabla 3-2 se presentan las variedades de maíz y sus características más importantes. Estas son los que actualmente están a disposición del agricultor y que se recomiendan sembrar.

Todas estas variedades se adaptan a altitudes de 0 a 900 metros sobre el nivel del mar. Los híbridos H-5 y H-3 poseen un buen potencial de rendimiento, ya que

condiciones de buen manejo pueden llegar a producir hasta 100 quintales por manzana.

**TABLA 2.2 CARACTERISTICAS AGRONOMICAS DE VARIEDADES DE MAIZ RECOMENDADAS.**

<b>CARACTERISTICAS</b>	<b>H-3</b>	<b>H-5</b>	<b>H-101</b>	<b>H-8</b>
Color del grano	Blanco	Blanco	Amarillo	Blanco
Días de Flor	56	58	57	57
Días de Cosecha	95	110	110	100
Altura de Mazorca (cm)	140	155	155	155
Altura de Planta (cm)	240	258	258	250
Rendimiento (QQ/Mz)	80	90	90	70

Referencia (2).

**TABLA 2.3 CARACTERISTICAS AGRONOMICAS DE VARIEDADES DE SORGO DISPONIBLE PARA LOS AGRICULTORES.**

<b>VARIEDADES</b>	<b>DIAS DE FLORACION</b>	<b>DIAS DE COSECHA</b>	<b>COLOR DEL GRANO</b>	<b>RENDIMIENTO</b>
Centa S-1	62	90	Blanco	3.5
Centa S-2	65	100	Blanco	3.0
Centa S-2 (f)	65	70	Salmón	5.5
Centa SH-500	58	85	Anaranjado	4.0

Referencia (2).

El híbrido H-3 se recomienda para zonas costeras, el H-5 se recomienda para valles intermedios de 450 a 900 metros sobre el nivel del mar; mientras el H-8 se recomienda desde los 400 hasta 1750 metros sobre el nivel del mar. El híbrido amarillo H-101, se adopta a zonas, ecológicas de 0-900 metros sobre el nivel del mar (2).

Para el maíz se recomienda que el contenido de humedad para su almacenaje sea del 10% al 13% (3)

## **b) Clasificación del Maicillo**

Maicillo es el conjunto de granos enteros y quebrados procedentes de cualquier variedad granífera del "Sorghum Vulgare".(1)

El maicillo se clasifica por su color en diferentes clases comerciales: Blanco, Amarillo, Rojo, Moreno y Mezclado; las respectivas proporciones en la masa no podrán ser inferiores al 90% de granos enteros excepto en la clase mezclada. La clase mezclada comprende la mezcla de sorgo de diversos colores que tengan más de un 10% de una clase dentro de la otra (normas, centroamericanas). (1)

Otros factores que influyen en la clasificación del sorgo son: El contenido de humedad, el porcentaje de impureza, el grano quebrado, el grano dañado, los granos contrastantes y los granos no desarrollados. El sorgo, son los granos más pequeños entre los cereales, que se utilizan comúnmente para el alimento humano y su forma es más o menos estética. La mayoría de los sorgos son variedades híbridas de dos grupos principales: los sorgos que tienen grano de tamaño

mediano, y color blanco, rosado, rojo y los sorgos que tienen granos grandes de color blanco salmón.

La harina producida por la molienda del grano se oxida fácilmente y por ese motivo es que cuando se le necesita se muele. (2)

Las características agronómicas de las variedades de sorgo que se recomiendan actualmente, se describen en la tabla 2.3.

La tabla 2.3 presenta las características principales que deben reunir las variedades de sorgo en El Salvador.

En este grano el porcentaje de humedad recomendado para almacenaje oscila entre 9% al 11%. (3)

### **c) Clasificación del Frijol**

Se entiende como frijol, el conjunto de granos enteros, quebrados o abiertos longitudinalmente de cualquier variedad de la leguminosa “Phaseolus Vulgaris”. (1)

La clasificación del frijol se hace en base a su color y se agrupa en las siguientes clases comerciales: negro, rojo, blanco, mezclado. (1)

Dentro de las principales clases se tienen los guisantes (chícharos), frijoles (alubias), habichuelas, habas y lentejas. Aunque estas semillas son de tamaño y de formas diferentes su estructura básica es similar. Cada una tiene una cubierta exterior (testa), protectora de la semilla, que es indigerible y tiene poco valor nutritivo.

Esta cubierta encierra los cotiledones que envuelven el diminuto embrión vegetal.  
(2)

Hablando en sentido estricto, los cotiledones son parte de embrión y no hay ninguna reserva extra acumulada de alimento ó endosperma tal como se encuentra en los cereales. Todas las reservas alimenticias proteínicas y de carbohidratos están almacenados en dos cotiledones. (2)

Otros factores de clasificación del frijol son: el contenido de humedad, las impurezas, los granos partidos, las clases contrastantes, las clases mezclables, el tiempo de cocción el peso específico, los granos no desarrollados (Normas Centroamericanas). (1)

Los factores antes expuestos están definidos y limitados por cada país para efecto de transacciones comerciales, extra -regionales o intra -regionales. (1)

La tabla 2.4 presenta la descripción de las variedades de frijol recomendadas para sembrar. El porcentaje de humedad para almacenaje de éste grano oscila entre 9% y 13%. (3)

#### **d) Clasificación del arroz**

Se entiende por arroz cáscara el conjunto de granos procedentes de cualquier variedad, de la gramínea “Orizzativa”, el conjunto de la masa deberá estar formada más del 98% de granos, sin que les haya removido la cara (glumas). (1)

El arroz (ya sea en granza, descascarado o elaborado), se clasifica en los siguientes tipos comerciales: Extralargo, mediano, corto y mezclado (Normas Centroamericanas).

**Tipo Largo:** Estará formado por todas las variedades de arroz, cuyos granos elaborados midan de 6.0 a 6.9 milímetros de longitud. (1)

**Tipo Extralargo:** Estará formado por todas las variedades de arroz, cuyos granos elaborados midan más de 7 milímetros de longitud. (1)

**Tipo Mediano:** Estará formado por todas las variedades de arroz, cuyos granos elaborados midan de 5.0 a 5.9 milímetros de longitud. (1)

**Tipo Corto:** Este tipo comprende la mezcla de grano de arroz, cuyos granos elaborados miden menos de 5.0 milímetros de longitud. (1)

**Tipo Mezclado:** Este tipo comprende la mezcla de granos de arroz en cáscara de diversos tamaños, que contenga más del 12% de un tipo dentro de otra. (1)

El arroz difiere de los demás cereales porque está envuelto por hollejo construido por dos cáscaras duras unidas por los bordes. (2)

Este hollejo está con el germen y las capas de salvado se eliminan durante el proceso de depilación, con el objeto de producir grano limpio, entero y no quebrado. Está constituido casi en su totalidad por el endosperma.

Las características de las diversas variedades de arroz que se recomienda sembrar, se encuentran detalladas en tabla 2.5.

El contenido de humedad para el almacenaje de grano oscila entre 10% al 12%. (2)

**TABLA 2.4 VARIEDADES DE FRIJOL RECOMENDADAS PARA SEMBRAR**

<b>VARIEDAD</b>	<b>DIAS DE FLORACION</b>	<b>DIAS DE COSECHA</b>	<b>COLOR DEL GRANO</b>	<b>RENDIMIENTO (QQ/Mz)</b>
SECCION 184-N	60	70	NEGRO	25
PORRILLO-70	65	75	NEGRO	25
CENTA-CHALCHUAPA	60	70	NEGRO	30
ROJO-70	60	75	ROJO	30
ROJO DE SEDA	60	75	ROJO	25
CENTA-NAHUIZALCO	55	75	ROJO	25
CENTA-NAHUIZALCO	55	60	NEGRO	20

Referencia (2)

**TABLA 2.5 CARACTERISTICAS DE LAS VARIEDADES DE ARROZ QUE SE RECOMIENDA SEMBRAR.**

<b>VARIEDAD</b>	<b>DIAS DE FLORACION</b>	<b>CICLO VEGETATIVO DIAS</b>	<b>CLASIFICACION GRANO</b>
X-10	90 A 100	120 A 130	LARGO
CICA-4	90	120	LARGO
CICA-6	85 A 90	115 A 125	LARGO
CICA-9	90 A 100	120 A 130	LARGO

Referencia (2)

## **2.2.2 EPOCAS DE CULTIVO Y RECOLECCION DE LOS GRANOS BASICOS**

A continuación se presenta la información referente a los departamentos en donde se identifica el tipo de cultivo, épocas estacionales de siembra y recolección de granos básicos en El Salvador.

### **a) Cultivo del Maíz**

En El Salvador, siendo el maíz uno de los principales cultivos para la alimentación, se siembra en todo el territorio nacional; el cultivo del maíz generalmente se desarrolla entre los meses de Mayo - Agosto ó Junio - Septiembre, siendo la época de recolección entre los meses de Agosto - Noviembre o Septiembre - Diciembre respectivamente.

Como se nota en la tabla 2.6, en el departamento de sonsonate el cultivo del maíz se desarrolla en todo el año.

### **b) Cultivo del Frijol**

Dentro de las diversas variedades de frijol cultivados en El Salvador, se distinguen tres clases: el frijol rojo de seda, el cual se siembra a una altura entre 400 y 1,200 metros sobre el nivel del mar; este grano tiene una mayor producción entre los meses de Octubre y Diciembre, aunque se siembra en pequeñas parcelas por riego, cosechándose en Febrero.

El frijol mono es un tipo de cultivo que se siembra en casi todas las tierras Salvadoreñas, especialmente en las zonas costeras; el frijol mono tiene una gran

producción entre los meses de Febrero - Marzo, encontrándose en grandes cantidades en el mes de Agosto; tal grano se caracteriza por ser consumido fresco, se seca solamente para obtener la semilla para siembra.

**TABLA 2.6 CULTIVO POR DEPARTAMENTO. EPOCAS DE SIEMBRA Y RECOLECCION DE GRANOS BASICOS.**

DEPARTAMENTO	MESES CULTIVO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
AHUACHAPAN	MAIZ				■	■	■	■	■	■	■	■	
	FRIJOL								■	■		—	—
	ARROZ					■	■				—	—	
	SORGO	—							■	■			—
SANTA ANA	MAIZ								■	■		—	—
	FRIJOL	—							■	■		—	—
	ARROZ°												
	SORGO	—										—	—
SONSONATE	MAIZ	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	FRIJOL	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
	ARROZ	—	—	—	—	■	■	■	■	■	■	■	—
	SORGO	—							■	■		—	—
SAN MIGUEL	MAIZ					■	■	■	■	■	—	—	
	FRIJOL *												
	ARROZ *												
	SORGO	—							■	■			—
CHALATENANGO	MAIZ					■	■	■	■	■	—	—	—
	FRIJOL					■	■	■	■	■	—	—	—
	ARROZ					■	■				—	—	
	SORGO	—							■	■			—
MORAZAN	MAIZ	—					■	■	■	■	■	—	—
	FRIJOL *												
	ARROZ *												
	SORGO	—							■	■			—
LA UNION	MAIZ	—					■	■	■	■	■	—	—
	FRIJOL *												
	ARROZ *												
	SORGO	—							■	■			—

	MAIZ	—										
LA LIBERTAD	FRIJOL			—								
	ARROZ											
	SORGO											
SAN SALVADOR	MAIZ											
	FRIJOL											
	ARROZ°											
	SORGO	—										
LA PAZ	MAIZ											
	FRIJOL											
	ARROZ	—										
	SORGO	—										
SAN VICENTE	MAIZ											
	FRIJOL											
	ARROZ	—										
	SORGO	—										
CUZCATLAN	MAIZ											
	FRIJOL	—										
	ARROZ°											
	SORGO	—										
CABAÑAS	MAIZ											
	FRIJOL											
	ARROZ°											
	SORGO											
USULUTAN	MAIZ											
	FRIJOL *											
	ARROZ	—										
	SORGO	—										

Referencias (4) (5) (6) (7) (8)

Donde: □ : Epoca de Cultivo

— : Epoca de Recolección

: No hay datos

° : No se conoce datos de su cultivo

El frijol blanco se cultiva en la mayoría de tierras del país; este frijol es abundante en la zona costera, debido a lo cual se cultiva en toda época del año, ya sea por riesgo o por inundación; su máxima producción se da en el mes de Agosto. (2)

#### **c) Cultivo del Arroz**

Es el tercer grano de importancia en el país. Este cultivo generalmente es producido en las zonas costeras de El Salvador, ya que las variedades de arroz son para cultivo en inundancia así como también se cultiva en algunas zonas aledañas al Lempa en el norte del país.

Generalmente el arroz se siembra entre los meses de Mayo a Noviembre, y la época de recolección se lleva a cabo cinco meses después; prácticamente este cultivo se desarrolla en los departamentos que pertenecen a la zona costera del país. (2)

La siembra del arroz en un 95% se realiza en estación lluviosa y la época de siembra esta estrechamente relacionada con el ciclo vegetativo de las diferentes variedades. En términos generales se recomienda sembrar cuando el invierno es bien establecido, en los meses de Mayo a Junio con las variedades de ciclo largo y hasta finales de Julio con las variedades de ciclo corto. (2)

#### **d) Cultivo de Sorgo**

Referente a este cultivo se puede deducir que la mayor parte de la producción se utiliza para alimentación y como un cultivo secundario para el aprovechamiento

de tierra, luego del cultivo del maíz. El sorgo es un cultivo resistente a las sequías y es originario de Africa. En su mayoría se cultiva en la zona costera del país. La tabla 2.6 presenta algunos departamentos donde su cultivo es representativo.

La tabla 2.6 muestra que es recomendable efectuar la siembra en la época comprendida entre la primera quincena de Mayo y la primera de Septiembre, para obtener un mayor número de cortes. Sin embargo la época depende del propósito de la siembra.

### **2.2.3) ANALISIS DE PRODUCCION Y RENDIMIENTO DE LOS GRANOS: MAIZ, FRIJOL, SORGO.**

Por otro lado, la producción de granos básicos alcanza a cubrir de un 80 a un 90 por ciento de la demanda total, según se muestra en las tablas 2.7, 2.8, 2.9. Cuando se piensa en satisfacer las necesidades alimenticias de la sociedad Salvadoreña por un lado, y por otro mantener un progreso tanto económico como social, surge como solución inmediata: 1) El aumento de producción a través de una mayor utilización de la tierra ó bien; 2) La búsqueda de mayores eficiencias que signifiquen mayores volúmenes de producción. Estas soluciones implican que en todas las tareas de post-cosecha, los volúmenes de granos sean mayores lo que obliga, en forma indirecta, a la creación ó mejoramiento de equipo mecánico como secadores, almacenes acondicionados, clasificadores, desgranadoras, limpiadoras, empacadoras, equipo de transporte etc, que deberán mantener la calidad deseada del grano.

**TABLA 2.7 MAIZ RETROSPECTIVA (Superficie, producción y rendimientos 1970/1971 - 1981/1982).**

<b>Año Agrícola</b>	<b>Superficie sembrada Mz</b>	<b>Producción qq</b>	<b>Rendimiento qq/Mz</b>
1970/71°	294,200	7,893,000	26.8
71/72	300,300	8,200,000	27.3
72/73	292,800	5,147,440	17.6
73/74	287,270	8,815,640	30.7
74/75	302,100	7,668,500	25.1
75/76	351,700	9,548,800	27.2
76/77	334,500	7,444,100	22.3
77/78	349,780	8,255,170	23.6
78/79	377,600	11,020,600	29.2
79/80	394,300	11,364,500	28.8
80/81	417,000	11,447,748	27.5
81/82	395,000	10,867,815	27.5

Referencia: (2)

**TABLA 2.8 FRIJOL RETROSPECTIVA (Superficie, producción y rendimientos 1971/1972 - 1981/1982).**

<b>Año Agrícola</b>	<b>Superficie sembrada Mz</b>	<b>Producción qq</b>	<b>Rendimiento qq/Mz</b>
1971/72	57,000	750,000	13.2
72/73	56,850	595,700	10.5
73/74	64,440	814,700	12.6
74/75	73,470	732,200	10.0
75/76	79,800	861,800	10.8
76/77	75,540	870,100	11.5
77/78	75,125	733,540	9.8
78/79	74,000	933,000	12.6
79/80	78,700	1,011,300	12.8
80/81	75,000	866,500	11.6
81/82	71,000	831,820	11.7

Referencia: (2)

**TABLA 2.9 MAICILLO RETROSPECTIVA (Superficie, producción y rendimientos 1971/1972 - 1981/1982).**

<b>Año Agrícola</b>	<b>Superficie sembrada Mz</b>	<b>Producción qq</b>	<b>Rendimiento qq/Mz</b>
1971/72	180,000	3,400,000	18.9
72/73	186,400	3,170,000	17.0
73/74	170,000	3,400,000	20.0
74/75	182,000	2,850,000	15.7
75/76	189,100	3,800,000	20.1
76/77	178,500	3,399,200	19.0
77/78	188,800	3,285,000	17.4
78/79	195,400	3,517,700	18.0
79/80	205,000	3,485,000	17.0
80/81	170,700	3,040,900	17.8
81/82	165,000	2,950,280	17.9

Referencia: (2)

## **2.2.4) ACONDICIONAMIENTO, ALMACENAMIENTO Y CONSERVACION**

### **D) ACONDICIONAMIENTO**

Acondicionar un grano significa: secarlo hasta el grado necesario para su buena conservación, librarlo de los materiales y cuerpos extraños que lo acompañan y extirpar los insectos que lo destruyen. El acondicionamiento se inicia ó debe iniciarse en la finca inmediatamente después de la recolección se perfecciona o completa como requisito previ6 para el almacenamiento.

## **EL CONTENIDO DE HUMEDAD EN LOS GRANOS**

Para que un grano pueda conservarse en buenas condiciones y ser apto para la comercialización, es requisito indispensable que este seco o por lo menos con un contenido de humedad que se ponga en peligro la preservación de su calidad puesto que humedad excesiva es la causa principal del deterioro del grano.

Los términos siguientes dan idea del contenido de humedad de la mayoría de los granos.

**Seco:** El grano que contiene el 14% de humedad ó menor.

**Húmedo:** El grano que contiene más del 14% y menos del 18% de humedad.

**Mojado o verde:** El grano que contiene más del 18% de humedad.

## **HUMEDAD PARA LA RECOLECCION**

Para la recolección debe tenerse en cuenta primero que toda la madurez del grano que debe ser plena si se quiere obtener un producto de la mayor calidad.

La maduración de los granos se califica como proceso en el cual se completan todas las transformaciones que sufren los componentes del grano para llegar al reposo. Se inicia con la madurez de leche que se caracteriza por que el grano tiene todavía cerca de un 50% de agua, muestra al partirlo un aspecto interior espeso y lechos continua con la madurez amarilla en la cual el contenido de agua llega al 30 ó 40%, con una consistencia del grano que no el liquida sino hasta cierto punto compacta que se deja doblar con la uña. En la madurez amarilla la conexión con la planta madre se

desliga y el grano se considera como **Fisiológicamente Maduro**.

Avanzando más el proceso de madurez, continúa desecamiento hasta que las substancias que forman el grano se depositan densamente juntas para formar el firme y por harinoso” o sea la **Madurez Plena** que se alcanza con el grano tiene de 20 a 22% de humedad.

En la mayoría de las regiones agrícolas de nuestro país resulta difícil esperar la madurez plena y hay que proceder a la recolección con humedades superiores y las causas siguientes:

- a) Las lluvias extemporáneas tan frecuentes en nuestro medio.
- b) La necesidad de preparar el terreno para los objetivos siguientes.
- c) El crecimiento de malas hierbas en climas cómodos y húmedos.
- d) El ataque de pájaros e insectos.
- e) La propensión de algunas variedades al volvimiento y desgrane.
- f) La necesidad de vender el producto para tener un buen precio o para cancelar compromisos económicos urgentes.
- g) La humedad ambiental y el invierno en determinado lugar del país.

Medios adecuados para evitar el daño de las cosechas por exceso de humedad deben proveerse en muchos lugares del país, pues la mayoría de los cultivadores está incapacitada para adquirir equipo debido al tamaño reducido de sus explotaciones.

## **II) EL CONTENIDO DE IMPUREZAS REMOVIBLES**

Al cosechar el grano, especialmente si la operación se hace por medios mecánicos, se recolectan simultáneamente muchos materiales distintos del grano, tales como pedazos de tallo, plantas y semillas de malezas, terrenos, granos, etc, que luego deben eliminarse durante la etapa de limpieza y secado. Por medio de máquinas especiales que utilizan cribas y zarandas de distinta forma y con auxilio del aire, se pueden extraer gran parte de las impurezas recolectadas.

La parte que puede extraerse por medios mecánicos adecuados se denomina **“Impureza Removible”**.

Las impurezas que no pueden removerse mecánicamente por tener el mismo tamaño, forma, peso, específico, etc, que el grano de que se trate y que permanecen en la masa del mismo como vicio o como defecto inseparable se llaman “materia extraña o cuerpos extraños”. Según la proporción en que se encuentren y sus características especiales rebajan la calidad del producto unas veces por concepto de apariencia como las pepas negras en el arroz blanco, otras por desmejorar el color del producto final como en la harina de trigo en ocasiones por comunicar sabores indeseables y en pocas oportunidades por las molestas que ocasiona a las amas de casa por, quitarlas a mano, a fin de que no aparezcan en los platos ya elaborados (piedrecillas en la lenteja, terrones en el frijol, etc.).

## **III) NIVEL DE EQUILIBRIO DE HUMEDADES**

Cuando el grano y el aire se encuentran en contacto con el tiempo se establece un

equilibrio entre el contenido de humedad del grano, y la humedad relativa del aire circundante. Este balance debe considerarse como un equilibrio de energía y como una igualación de cantidades de humedad.

Si la H.R. del aire es mayor que la corresponde en equilibrio al contenido de humedad del grano, el aire perderá humedad y el grano se humedecerá hasta que el equilibrio se estanca.

Si la H.R. del aire circunda en contacto con el grano es inferior en condiciones de equilibrio al contenido del agua del grano, este se secará y el aire se humedecerá hasta encontrar el equilibrio. Esta tendencia de la humedad y notar de llegar a un balance con el aire de baja H.R. producirá evaporación de agua en la superficie del grano, fenómeno que traerá como consecuencia una migración de humedad desde el interior del grano hacia su superficie para nivelar su contenido de humedad. Si el aire cargado de humedad se renueva constantemente por otro de baja H.R. para traer la humedad granular, el grano se secará hasta el punto en que una nueva cantidad de aire de baja H.R. no puede extraer más agua del grano por haberse llegado al equilibrio.

Esto es en esencia lo que ocurre en el secamiento ahora bien, para que la humedad del aire predomine sola del grano es necesario hacer pasar a través de las grandes cantidades de aire a una H.R. más bajo que correspondiente a una condición de equilibrio.

#### **IV) AIRE CON CAPACIDAD DESECANTE**

Este concepto como puede deducirse de lo dicho anteriormente, depende de la humedad del grano con que esté en contacto. Podemos decir, entonces, que aire con capacidad desecante es aquel cuya humedad relativa es inferior a la que corresponde en equilibrio para un grano determinado con un contenido también determinado de humedad.

#### **V) CARACTERISTICAS DEL SECAMIENTO DE GRANOS CON AIRE DESECANTE**

Un secamiento eficiente, en promedio, rara vez utilizará más del 50 ó 60% del calor obtenible del aire.

La fuerza del secamiento y por consiguiente, la rapidez con que efectúa decrecen rápidamente a medida que el aire desecante atraviesa el grano. Las primeras capas se secarán con rapidez y las siguientes con lentitud creciente, proporcional en todo caso, al enfriamiento y saturación del aire.

Si el secamiento es estacionario y muy gruesa la capa de grano, los primeros estratos se secarán rápidamente y algunas veces se resecarán antes de que el secamiento llegue a las capas superiores. Este sistema de secamiento se denomina secamiento localizado por zonas.

## VI) CONTROL DE CALIDAD DURANTE EL SECAMIENTO

El empleo de temperaturas excesivas en el aire desecante puede ocasionar directa o indirectamente perjuicios considerables a la calidad comercial de los granos, entre los cuales podemos enumerar: a) la muerte del germen; b) la rotura o el requebramiento; c) cambios químicos indeseables, etc.

Por otra parte, si la temperatura es demasiado baja, el tiempo de secamiento, se prolongará en exceso lo cual influirá en el enmohecimiento del grano.

Siempre ha resultado difícil especificar, aún en forma aproximada, las temperaturas que deben secarse los diversos granos porque el resultado depende de la humedad del grano y del tiempo que éste permanezca en contacto con el aire desecante.

Es por consiguiente, necesario que al hablar de temperaturas se especifiquen las condiciones de tiempo y humedad. Desde el punto de vista de la germinación se sabe que entre más seco esté un grano, soporta mejor las temperaturas altas. Se sabe también que si se disminuye el tiempo de exposición se pueden aumentar las temperaturas y que el secamiento por etapas disminuye el tiempo total empleado en el secamiento.

Es mucho lo que se ha investigado en los últimos años sobre las posibilidades y limitaciones de la temperatura. De la investigación y de la práctica se han deducido límites de temperatura para ciertos granos y sistemas de secamiento son aplicables para las condiciones nuestras.

Algunos de estos límites son los que contienen el cuadro sobre: Temperatura de Secamiento para algunos granos.

El secamiento del arroz en cáscara tiene exigencias muy especiales, que se resumen a continuación.

- a) Si el secamiento se hace en una sola etapa, la temperatura no debe pasar de 37, 8°C en el aire desecante. Esta misma es la temperatura usual para el secamiento de la semilla.
- b) Si el secamiento se hace por etapas con períodos de reposo o de temple, se usan temperaturas mayores que varían según el contenido de humedad del grano, y humedad del ambiente.

### **2.3) CONDICIONES CLIMATOLOGICAS DE EL SALVADOR**

La Tabla 2.10 presenta los datos de ubicación de las estaciones de toma de datos climatológicos en toda la República de El Salvador. Los promedios anuales y mensuales de la presión del aire, y promedios mensuales y anuales de redacción global en distintos puntos de El Salvador.

Tabla 2.10

<b>ABREVIATURAS DE LAS ESTACIONES Y SUS ELEVACIONES EN METROS</b>														
SN	Santa Ana El Palmar	725	ST	Santa Tecla	965									
MO	Montecristo	2230	SD	San Diego	20									
GU	Guija	485	SS	San Salvador, ITIC,	710									
LA	Finca Los Andes	1770	IL	Aeropuerto Ilopango	615									
CF	Candelaria de la Frontera	700	CJ	Cojutepeque	880									
CV	Cerro Verde	2030	SC	Santa Cruz Porrillo	10									
LP	La Palma	1 000	AQ	Apastepeque	570									
PI	Las Pilas	1960	CA	La Carrera	75									
NC	Nueva Concepción	320	SG	Santiago de María	920									
CH	Chorrera del Guayabo	190	SM	San Miguel	140									
AH	Ahuachapán	725	FG	San Francisco Gotera	250									
AP	Apaneca, Santa Leticia	1300	CO	Corinto	820									
LN	Los Naranjos	1450	MO	La Galera	1900									
LZ	Izalco	390	UN	La Unión	95									
AC	Acajutla	15	IN	Intipuca	110									
SA	San Andrés	460	AS	Astoria	40									
<b>PROMEDIOS MENSUALES Y ANUALES DE RADIACION GLOBAL, CAL x CM<sup>2</sup> DIA HASTA 1980</b>														
AH	493.0	538.2	561.5	551.2	461.6	444.0	487.6	465.8	408.2	423.8	432.2	429.6	474.7	11 años
SS	418.4	458.4	479.5	473.5	473.9	421.4	473.7	442.4	390.7	403.3	411.5	409.0	432.9	12 "
NC	422.0	467.3	489.2	487.4	446.4	455.4	472.4	472.3	442.0	438.6	422.0	402.5	451.4	11 "
UN	422.3	465.1	489.8	472.0	433.0	442.6	465.0	449.3	427.2	427.7	404.1	405.8	442.0	11 "
AQ	395.3	445.7	457.3	439.0	414.4	406.5	443.0	447.2	392.0	387.0	391.8	376.9	416.4	9 "
CA	419.4	460.4	476.2	447.3	414.6	413.1	462.4	466.3	414.6	413.5	409.9	413.2	434.2	8 "
MO	398.4	427.3	414.3	370.4	309.1	331.3	405.7	351.9	294.6	336.3	366.3	369.7	364.6	5 "
LG	375.0	420.9	440.4	389.6	359.6	367.3	393.7	365.6	314.4	326.5	320.8	328.8	166.9	5 "
PI	341.2	296.5	392.3	357.7	352.2	342.5	370.5	366.1	298.2	232.1	303.6	308.4	364.8	4 "

Referencia (10)

La tabla 2.11 presenta los datos promedios mensuales y anuales de la temperatura en distintas partes de El Salvador.

PROMEDIOS MENSUALES Y ANUALES DE LA TEMPERATURA (EN °C) HASTA 1981														
	M E S E S												AÑO	PERIODOS
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC		
SN	21.6	22.2	23.6	24.4	23.9	23.0	23.1	23.0	22.6	23.0	22.2	21.6	22.8	23 años.
GU	24.4	25.2	26.7	27.3	26.7	25.1	25.0	24.8	24.5	24.6	24.6	24.3	25.3	18 "
LA	14.7	15.3	17.0	17.7	17.9	17.2	17.1	17.1	16.1	16.2	15.2	14.7	16.4	19 "
CF	22.5	22.9	24.7	25.3	25.0	23.9	24.0	23.7	23.1	23.4	23.1	22.5	23.7	12 "
AH	21.7	22.2	23.6	24.4	24.2	23.2	23.3	23.0	23.0	23.0	22.5	22.0	23.0	13 "
AP	17.8	18.0	19.1	19.8	19.9	19.6	19.8	19.6	19.1	19.3	19.0	18.3	19.1	12 "
IZ	23.3	23.8	24.3	25.4	25.0	24.0	24.6	24.4	24.0	24.0	24.0	24.0	24.2	26 "
AC	25.9	26.5	27.6	28.3	28.1	27.1	27.1	26.9	26.4	26.5	26.6	26.1	26.9	27 "
SA	22.3	23.2	24.6	25.5	25.2	24.3	24.1	24.2	23.8	23.6	22.8	22.2	23.8	33 "
ST	19.2	19.7	20.7	21.6	21.6	21.2	21.4	21.4	20.8	20.7	20.1	19.4	20.6	34 "
SS	22.0	22.6	23.8	24.6	24.0	23.5	23.1	23.1	22.6	22.6	22.4	22.0	23.0	29 "
AQ	23.6	24.0	24.9	25.2	24.4	23.4	23.7	23.8	22.9	23.2	23.6	23.4	23.8	9 "
II	22.1	22.6	23.8	24.4	24.2	23.3	23.2	23.1	22.8	22.7	22.3	21.9	23.0	25 "
CJ	21.2	21.6	22.8	22.7	22.6	22.1	22.3	22.0	21.4	21.3	21.2	21.0	21.8	12 "
NC	24.8	25.7	27.4	27.4	27.9	25.5	25.2	25.0	24.8	25.0	24.7	24.4	25.7	12 "
LP	19.0	19.6	21.4	22.0	21.8	20.9	21.0	20.8	20.8	20.3	19.6	19.0	20.5	17 "
CH	26.3	27.2	28.5	28.9	27.7	26.0	25.9	25.9	25.4	25.6	25.7	25.8	26.6	26 "
SC	26.2	26.5	27.4	28.2	27.9	26.9	27.1	26.8	26.3	26.2	26.1	26.0	26.8	32 "
SG	21.2	21.6	22.5	22.9	22.5	21.9	22.6	22.3	21.5	21.5	21.4	21.1	21.8	24 "
SM	26.8	27.0	28.3	29.0	28.2	26.9	26.8	26.7	25.9	25.8	25.8	25.8	26.9	31 "
FG	25.8	26.5	27.9	28.6	27.4	26.0	26.3	25.9	25.3	25.6	25.6	25.5	26.4	12 "
CO	21.4	22.1	23.3	24.0	23.6	23.0	23.1	22.8	22.5	22.3	22.0	21.5	22.6	13 "
UN	27.4	27.9	29.0	29.5	28.7	27.6	28.2	27.6	26.7	26.8	27.2	27.2	27.8	11 "
MO	11.1	11.2	13.1	13.3	14.1	13.7	13.4	13.6	13.5	12.8	11.9	11.2	12.7	11 "
LN	14.6	14.9	16.4	17.6	18.0	18.1	18.2	18.1	17.4	17.4	16.2	15.0	16.8	9 "
CV	13.5	14.2	15.1	15.5	15.5	15.0	15.0	15.0	14.6	14.9	14.5	14.0	14.7	7 "
LG	12.7	13.3	15.2	15.6	16.1	15.7	15.5	15.6	15.4	14.8	13.6	13.0	14.7	9 "
PI	13.4	13.8	15.6	16.1	16.7	16.1	15.9	16.0	15.5	15.2	14.4	13.8	15.2	9 "
SD	26.5	24.4	26.7	28.0	27.7	27.0	26.9	26.7	26.2	26.2	26.3	25.6	26.4	10 "
CA	25.4	26.2	27.3	28.1	27.6	26.9	27.2	26.8	26.0	26.0	26.2	25.4	26.4	9 "
IN	26.8	26.9	27.7	28.2	27.5	26.5	27.2	26.7	25.9	26.0	26.4	26.7	26.9	10 "
AS	26.0	25.7	26.9	27.8	27.4	26.5	27.0	26.6	25.9	26.0	26.3	25.8	26.5	8 "

Referencia (10)

La Tabla 2.12 presenta los datos promedios mensuales y anuales de Humedad Relativa del aire en distintas partes de la República de El Salvador.

PROMEDIOS MENSUALES Y ANUALES DE LA HUMEDAD RELATIVA DEL AIRE (EN °C) HASTA 1981)														
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	AÑO	PERIODOS
SN	65	65	65	64	73	80	76	77	81	77	70	67	71	26 años.
GU	62	59	58	60	69	78	77	79	82	77	69	64	69	21 "
LA	78	74	71	72	80	84	83	84	86	88	85	82	80	21 "
CF	60	58	58	59	68	75	71	74	79	73	65	62	67	13 "
AH	65	64	66	67	75	81	77	80	84	79	70	66	73	16 "
AP	69	69	73	72	80	70	72	80	84	79	72	66	76	14 "
IZ	70	69	70	72	79	84	81	83	86	85	76	73	77	28 "
AC	69	67	71	72	77	81	78	80	83	82	74	70	76	29 "
SA	68	68	69	70	78	84	82	82	85	82	77	72	76	24 "
ST	73	72	73	76	85	86	82	83	87	84	77	75	79	34 "
SS	63	62	63	67	75	81	78	79	83	79	71	66	72	28 "
IL	67	68	70	71	82	85	82	83	86	83	76	70	76	26 "
CJ	68	65	69	72	82	85	81	83	88	35	77	70	77	14 "
NC	60	56	59	62	71	80	79	80	82	78	69	63	71	15 "
LP	73	70	68	71	78	86	82	85	86	83	78	75	78	20 "
CH	60	58	58	60	70	79	79	79	82	78	71	64	70	26 "
SC	63	62	64	68	74	80	77	80	84	82	73	66	73	33 "
SG	67	65	66	71	80	83	75	78	85	83	75	70	75	26 "
SM	59	50	58	62	71	78	72	76	82	82	75	65	70	33 "
FG	56	53	55	58	69	76	71	73	80	79	69	60	67	16 "
CO	69	65	64	66	77	80	75	77	81	81	78	73	74	16 "
UN	56	56	16	58	69	75	68	71	78	76	67	59	66	15 "

Referencia (10)

## REFERENCIAS

- 1) Manual de Almacenamiento y conservación de granos y semillas.  
FAO - IRA - FOO  
Ing. Gabriel Regifo  
Ing. Ricardo Macado de Toledo
- 2) Guía Técnica Agropecuaria Documento preliminar CENTA Departamento de Información Documentación 1991.
- 3) Diseño, construcción y pruebas de un deshidratador solar de productos agropecuarios.  
Trabajo de Graduación  
Escuela de Ingeniería Mecánica  
UES 1992
- 4) Planificación de las Asociaciones, Cooperativas del Sector Agropecuario de E.S.  
Trabajo de Graduación  
Facultad de Ciencias Económicas
- 5) Instituto Salvadoreño de Recursos Naturales.  
Anuario Forrestal (1980-1981)
- 6) Reunión Anual de Programa Cooperativo Centroamericano.  
Maíz y Sorgo, 1991.
- 7) Reunión Anual del Programa Cooperativa Centroamericano.  
Frijol, 1921

- 8) Evaluación de cuatro fechas de siembra en dos variables de arroz (isletas, zacatecoluca).
- 9) Facultad de Ciencias Agronómicas UES, 1987.
- 10) Diseño y Construcción de un secado de convección natural, utilizando Energía Solar.

Trabajo de Graduación.

↳ Luis Alonso Figueroa

↳ Mario Edgardo Lemus

Escuela de Ingeniería Mecánica

UCA 1985.-

- 11) Almanaque Salvadoreño 1990

Ministerio de Agricultura y Ganadería

Centro de Recursos Naturales

Servicio de Meteorológico e Hidrología, E.S. C.A.

**CAPITULO 3.**

## INTRODUCCION

### CAPITULO 3

El secado de granos se puede definir de distintas maneras, según el enfoque que se desee adoptar. En los estudios más teóricos se pone el énfasis en los mecanismos de transferencia de energía y de materia. Así, el secado se puede definir como un proceso en que hay intercambio simultáneo de calor y masa, entre el aire del ambiente de secado y los granos. En cambio, en los casos generales se define el secado como la operación unitaria responsable de la reducción del contenido de humedad de cierto producto, hasta un nivel que se considera seguro para el almacenamiento de éste.

Se entiende que es seguro un nivel de humedad por debajo del cual se reduce la actividad respiratoria de los granos y se dificulta el ataque de insectos y hongos. Dicho nivel varía con los distintos tipos de granos, abarca una gama entre 10 y 14% de humedad expresada sobre base húmeda.

Se han secado productos agrícolas desde los albores de la civilización. Al comienzo no había preocupación por el almacenamiento, y la disminución de la humedad se producía en el campo mismo. Era un "secado" que se realizaba en las condiciones naturales del ambiente, dictadas principalmente por la energía solar incidente y el movimiento del aire, es decir, por el viento. Más adelante se intentó controlar parcialmente las condiciones del secado, y éste pasó a realizarse en hornos especiales o en recintos calentados. Recién entre la Primera y Segunda Guerras Mundiales se construyeron diversas unidades experimentales de secado. En aquella época sólo funcionaban algunas unidades comerciales, las que se destinaban, fundamentalmente, a la deshidratación de frutas, verduras, heno y al secado de semillas de maíz.

Después de la Segunda Guerra Mundial se hicieron comunes las grandes unidades de secado de granos comerciales, y en las haciendas se empezó a secar grandes cantidades de ellos.

Este aumento en la demanda de secado fue consecuencia del desarrollo de los métodos mecánicos de cosecha. En América Latina, una parte importante de la producción de granos de seca todavía en forma primitiva, es decir, se seca en el campo durante largos períodos. El uso de esta técnica acarrea elevadas pérdidas de producción, puesto que los granos quedan expuestos, durante lapsos prolongados, a condiciones adversas y a la acción de depredadores.

## **APROVECHAMIENTO DE LA ENERGIA DEL SOL PARA EL SECADO DE GRANOS.-**

### **3.1 TEORIA DEL SECADO DE GRANOS**

#### **3.1.1 NECESIDAD DEL SECADO**

Al llegar a la madurez fisiológica, los productos agrícolas y en especial los granos, presentan en la mayoría de los casos, un contenido máximo de materia seca. Sería recomendable cosechar los granos en ese punto de desarrollo, desde el punto de vista del rendimiento máximo de la producción. No obstante, varios factores limitan esa posibilidad, destacándose entre ellos el contenido de humedad de los granos.

Al comienzo de la etapa de madurez fisiológica, los granos presentan, además del contenido máximo de materia seca, un elevado porcentaje de agua. Esta condición acarrea algunas dificultades, pues los granos no resisten los procedimientos mecánicos de recolección y demás operaciones de tratamiento. Es preciso esperar, entonces, que la cosecha se realice "tan pronto" como los granos lo soporten. Esta técnica ofrece algunas ventajas, como son: un mayor porcentaje de materia seca (menor contaminación del producto en el campo, menor pérdida por ataque de depredadores, mayor porcentaje de germinación y vigor y otras.

El mayor inconveniente de la cosecha de productos húmedos es la necesidad de reducir su contenido de humedad a niveles seguros para su almacenamiento siendo un proceso que exige un gran consumo de energía. En general el secado artificial de granos es una técnica poco difundida en América Latina. En las regiones en que se la conoce, normalmente está mal utilizada. En consecuencia, hay elevadas pérdidas de granos en esos países.

### **3.1.2 TÉCNICAS DE SECADO DE GRANOS**

Las técnicas de secado de granos son ampliamente conocidas y utilizadas en países desarrollados. Esto quiere decir que luego de adaptarlas a las condiciones de cada país, es posible perfeccionar rápidamente las técnicas que se emplean en esos países.

Por lo menos en principio, esta afirmación es valedera; pero dicho perfeccionamiento se ve dificultado por algunos factores: el nivel de instrucción de los productores, los costos de la tecnología de secado importada, el volumen de producción y la disponibilidad de energía eléctrica, son los más importantes.

Un sistema de secado y almacenamiento exige costos de inversión relativamente elevados. La adquisición de tal sistema requiere además el adiestramiento técnico del operador, para que se pueda aprovechar al máximo los beneficios que esa nueva tecnología puede ofrecer, pues las ventajas del sistema dependen del buen manejo. Además de conocer las características de equipo adquirido, el productor debe saber que su capacidad de negociación aumenta en la comercialización. El aprovechamiento correcto de esa capacidad puede llevarlo a maximizar sus utilidades.

Debido a los costos iniciales aludidos, para que el uso de las técnicas de secado y almacenamiento sean económicamente viables, debe haber un nivel de producción mínimo. Con todo, es un error suponer que esta tecnología es recomendable sólo para grandes producciones. Las variaciones de la técnica extienden su utilización a un abanico bastante amplio de producción. Como es natural a medida que se traten volúmenes mayores mejor será el tratamiento que ellos podrán recibir, por los refinamientos que se podrán incorporar a los sistemas.

En los métodos de secado más modernos, los intercambios de aire y masa entre granos y ambiente se producen principalmente por convección de aire forzado.

## **METODOS DE SECADO**

Los métodos que se emplean para realizar el secado de granos son diversos y se pueden clasificar como sigue:

a. Secado Natural

- En el campo
- En asoleaderos

b. Secado Artificial

- A baja temperaturas:
  - Con aire natural
  - Con aire ligeramente calentado
- A altas temperaturas:
  - En lecho fijo
  - En flujos cruzados
  - En flujos concurrentes
  - En flujos contracorriente
  - En cascada (flujos mixtos)
- En combinación:
  - Alta temperatura/baja temperatura
- Secado
- Aireación

Se denominan procedimientos de secado a bajas temperaturas, aquellos que usan aire a temperatura ambiente o calentado en 3 a 5°C, como medio de transporte de

humedad y energía. En estos procedimientos se emplean bajos flujos específicos de aire (2,0 - 5,0 m<sup>3</sup>/min.t). Los bajos flujos de aire, junto con las condiciones de éste, hacen que los procedimientos de secado a bajas temperaturas sean típicamente lentos y tarden días o semanas en alcanzar la humedad deseada del producto. En cambio, estos procedimientos son energéticamente eficientes y el producto final es de buena calidad. Se les puede emplear para producciones tanto pequeñas como grandes, y sus puntos limitantes son las condiciones ambientales, la velocidad de cosecha del producto y el posible desarrollo de hongos.

Los procedimientos de secado a altas temperaturas se caracterizan por el empleo de aire calentado; por lo menos a 10°C, sobre la temperatura ambiente. Los flujos específicos del aire son mayores que en los casos anteriores y en consecuencia, la velocidad de secado es más alta. Así, el secado de granos a altas temperaturas se emplea en los predios en que hay grandes producciones y la cosecha diaria es de un alto volumen, y en unidades almacenadoras colectoras e intermedias, que reciben los productos húmedos.

Los procedimientos de secado a altas temperaturas exigen un manejo más cuidadoso y con mayor vigilancia, porque el peligro de accidentes, principalmente incendios, es más grandes y porque la posibilidad de que se dañe el producto también se acentúa. Aun así, el manejo correcto de los secadores permite que se sequen algunos productos a 400°C, sin alterar su calidad final.

### **3.1.3 EFICIENCIA TERMICA DEL SECADO**

El consumo de energía en un secador no se debe medir solamente en unidades de combustible usadas en el proceso. Es importante que se relacione este consumo con la cantidad correspondiente de agua evaporada, de ahí la necesidad de definir un

elemento que sirva de término de comparación entre diferentes procedimientos, o incluso entre diferentes secadores. Ese término, bien aceptado ya entre la comunidad científica, es el que aquí denominamos eficiencia térmica de secado y se define así: "relación entre la cantidad de energía destinada al secado y la cantidad de agua evaporada durante el proceso".

Para los efectos de calcular este término no se incluye la energía para mover los granos.

El consumo de energía por unidad de agua evaporada varía con diversos parámetros.

De ellos, los más importantes son: la variación de la humedad del producto durante el secado (tasa de secado), las condiciones ambientales y el tipo de secador empleado.

La tasa de secado de cierto tipo de granos, a su vez, es función de la temperatura y del flujo de aire de secado, del contenido de humedad inicial y de equilibrio de los granos, de la temperatura y, cuando corresponda, de la velocidad de los granos dentro del secador.

El tipo de secador que se utilice ejerce gran influencia sobre el rendimiento térmico del secado. Cada producto se seca a una tasa diferente y cada uno presenta exigencias más o menos precisas respecto a la calidad.

### **3.2 SECADO DE GRANOS A BAJAS TEMPERATURAS**

Se define como secado de granos a bajas temperaturas el método artificial de secado en que se ocupa aire natural o aire ligeramente calentado (1 a 5°C por encima de la

temperatura ambiente). En general, este proceso se realiza en silos secadores almacenadores y, luego del secado, el producto queda almacenado en el mismo lugar.

Para que un silo se preste para el secado a bajas temperaturas, debe presentar ciertas características especiales que no se exigen a los silos que sirven sólo para almacenar.

La primera de estas características se refiere al piso, el cual debe ser hecho totalmente de metal, con un 10%, por lo menos, de su superficie perforada, para promover la distribución uniforme del aire, factor importante en la seguridad del proceso. El ventilador debe proporcionar una cantidad de aire suficiente para efectuar el secado de toda la masa de granos sin que haya deterioro. Las dimensiones del silo (diámetro y altura) condicionan la potencia del ventilador que se necesita para realizar el secado.

El secado a bajas temperaturas es un procedimiento lento; puede tardar una semana o, en determinados casos, hasta un mes. Tal lentitud se debe a la pequeña cantidad de aire que se utiliza por unidad de masa de granos por secar y a la dependencia del sistema respecto de la capacidad del aire para evaporar agua, muy inferior a la de los sistemas que emplean temperaturas elevadas. La capacidad del aire para evaporar la humedad del producto, denominada también potencial de secado, determina el contenido final de humedad que alcanzarán los granos al término del proceso. Una región en que haya baja humedad relativa media tendrá mayor potencial del secado que las regiones de alta humedad relativa media, y determinará, por tanto, un menor contenido de humedad final.

Los ventiladores producen calentamiento del aire, normalmente en un rango de 1 a 2°C y reducen la humedad relativa. Se han usado también combustibles, resistencias eléctricas o colectores solares para complementar la energía. No obstante, el uso de

una fuente suplementaria de energía de estar condicionado al potencial de secado de la región y al contenido de humedad final que se persigue. En la mayoría de los casos, el potencial de secado del aire natural y el calentamiento que provoca el ventilador son suficientes para obtener el contenido de humedad final recomendado para un almacenamiento seguro. El uso indebido de la fuente suplementaria de energía puede provocar problemas de secado excesivo, especialmente en las capas inferiores. Cabe recordar que el secado excesivo causa perjuicio al usuario, quien venderá un grano de menor peso al no tener el contenido máximo de agua permitido y además habrá gastado más energía en el secado excesivo.

Un sistema de secado a bajas temperaturas, se está debidamente proyectado y manejado, es un método de secado económico y técnicamente eficiente. Cuando se trata de unidades menores, por ejemplo para almacenamiento en el campo, el sistema resulta interesante por la inversión inicial, inferior a la que necesitan los sistemas que emplean temperaturas elevadas. Hay un límite a partir del cual los costos de los sistemas de bajas temperaturas pasan a ser superiores a los de los sistemas de altas temperaturas, porque a mayor cantidad de granos, mayor tendrá que ser el número de silos para realizar el secado. Estudios comparativos de los costos del secado con ambos sistemas, en los Estados Unidos, indican que, si se trata de unidades hasta de 530 toneladas, los costos de los sistemas de secado de bajas temperaturas son menores. (1)

Algunos grandes productores de granos para semillas han optado por el secado a bajas temperaturas, debido a la calidad final del producto, la cual es mejor que la que se obtiene con los secadores que emplean aire a temperaturas elevadas, porque la pérdida de humedad es lenta y el producto no sufre choques térmicos; con esto se reduce la presencia de tensiones internas en los granos, las que podrían perjudicar su

calidad. Además, en los sistemas de bajas temperaturas el producto sufre menos movimiento, lo que reduce los daños mecánicos.

Una de las grandes limitaciones del secado a bajas temperaturas se refiere al contenido de humedad inicial. Sabemos que, cuanto mayor es el contenido de humedad de un producto, más acelerado es su deterioro, mientras no se reduzca la humedad hasta un nivel seguro para el almacenamiento. Esto significa que la necesidad de aire para el secado aumenta, por el mayor riesgo de deterioro y por el hecho de que el producto contiene más humedad que hay que eliminar. Por tanto, para secar un producto con mayor contenido de humedad se necesita un ventilador con motor más potente. Otro factor que hay que considerar es la temperatura media del aire, pues el proceso de deterioro también se acelera con el aumento de la temperatura.

### **3.2.1 PRINCIPIO DE SECADO A BAJA TEMPERATURA CONTENIDO DE HUMEDAD DE EQUILIBRIO:**

El secado a bajas temperaturas se parece al secado en el campo. El producto puede perder humedad hasta que se alcance el equilibrio entre la humedad del aire y la del grano. Como ese tipo de secado es lento, al término del proceso casi la totalidad de la masa de granos va a estar en equilibrio térmico e higroscópico con las condiciones psicrométricas medias del aire de la región.

La diferencia entre los dos tipos de secado está en el tipo de movimiento del aire; en el secado a bajas temperaturas el aire pasa a través de la masa de granos por acción de un ventilador, en tanto que el secado en el campo se produce por el movimiento natural del aire (viento). El potencial de secado de una región determinan el

contenido de humedad final que alcanzará la masa de granos, porque hay un contenido de humedad de equilibrio del producto, respecto a cada combinación de temperatura y humedad relativa.

El contenido de humedad de equilibrio varía de un producto a otro. En los cuadros 3-1, 3-2, 3-3, 3-4, 3-5, 3-6 presentan los valores de humedad de equilibrio del maíz, soya, trigo, arroz, sorgo, y frijol respectivamente, valores que se calcularon mediante la ecuación de CHUNG-PFOST. (2)

En el secado a bajas temperaturas, la temperatura y la humedad relativa varían durante el proceso. Los valores medios de la temperatura y humedades relativas, durante el período de secado, determinan el contenido de humedad final.

En las tablas presentadas se observa la influencia de la temperatura. Se ve que, con la misma humedad relativa, a medida que aumenta la temperatura disminuye el contenido de humedad de equilibrio. Con la humedad relativa ocurre lo contrario, es decir, que al aumentar la humedad relativa aumenta también el contenido de humedad de equilibrio.

El uso de una fuente suplementaria de energía eleva la temperatura de secado y reduce la humedad relativa del aire. Para estimar el contenido de humedad final, en este caso, se emplean las tablas presentadas y el gráfico psicrométrico (Figura 3.1)

CUADRO 3.1

*Contenido de humedad de equilibrio del maiz ( % ).*

Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)												
	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
10	9,9	10,6	11,2	11,8	12,5	13,1	13,8	14,6	15,4	16,3	17,3	18,6	20,3
12	9,7	10,3	11,0	11,6	12,3	12,9	13,6	14,4	15,2	16,1	17,1	18,4	20,0
14	9,4	10,1	10,7	11,4	12,0	12,7	13,4	14,2	15,0	15,9	16,9	18,2	19,9
16	9,2	9,9	10,5	11,2	11,8	12,5	13,2	14,0	14,8	15,7	16,7	18,0	19,7
18	9,0	9,7	10,3	11,0	11,6	12,3	13,0	13,8	14,6	15,5	16,6	17,9	19,5
20	8,8	9,5	10,1	10,8	11,5	12,1	12,8	13,6	14,4	15,3	16,4	17,7	19,4
22	8,6	9,3	10,0	10,6	11,3	12,0	12,7	13,4	14,3	15,2	16,2	17,5	19,2
24	8,5	9,1	9,8	10,4	11,1	11,8	12,5	13,3	14,1	15,0	16,1	17,4	19,1
26	8,3	8,9	9,6	10,3	10,9	11,6	12,3	13,1	13,9	14,9	15,9	17,2	19,0
28	8,1	8,8	9,4	10,1	10,8	11,5	12,2	12,9	13,8	14,7	15,8	17,1	18,8
30	7,9	8,6	9,3	9,9	10,6	11,3	12,0	12,8	13,6	14,6	15,6	17,0	18,7
32	7,8	8,4	9,1	9,8	10,5	11,1	11,9	12,6	13,5	14,4	15,5	16,8	18,6

CUADRO 3.2

*Contenido de humedad de equilibrio de la soya ( % ).*

Temperatura (°C)	Humedad relativa (%)												
	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
10	6,1	7,0	7,8	8,6	9,5	10,3	11,2	12,2	13,2	14,4	15,7	17,3	19,4
12	6,0	6,9	7,7	8,5	9,4	10,2	11,1	12,1	13,1	14,3	15,6	17,2	19,3
14	5,9	6,7	7,6	8,4	9,3	10,1	11,0	12,0	13,0	14,2	15,5	17,1	19,2
16	5,8	6,6	7,5	8,3	9,2	10,0	10,9	11,9	12,9	14,1	15,4	17,0	19,1
18	5,7	6,5	7,4	8,2	9,1	9,9	10,8	11,8	12,8	14,0	15,3	16,9	19,0
20	5,6	6,4	7,3	8,1	9,0	9,8	10,7	11,7	12,8	13,9	15,2	16,9	19,0
22	5,4	6,3	7,2	8,0	8,9	9,7	10,7	11,6	12,7	13,8	15,2	16,8	18,9
24	5,3	6,2	7,1	7,9	8,8	9,6	10,6	11,5	12,6	13,7	15,1	16,7	18,8
26	5,2	6,1	7,0	7,8	8,7	9,6	10,5	11,4	12,5	13,7	15,0	16,6	18,7
28	5,1	6,0	6,9	7,7	8,6	9,5	10,4	11,3	12,4	13,6	14,9	16,5	18,6
30	5,0	5,9	6,8	7,6	8,5	9,4	10,3	11,3	12,3	13,5	14,8	16,5	18,6
32	4,9	5,8	6,7	7,5	8,4	9,3	10,2	11,2	12,2	13,4	14,8	16,4	18,5

CUADRO 3.3

*Contenido de humedad de equilibrio del trigo ( % ).*

Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)												
	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
10	10,1	10,7	11,3	11,9	12,6	13,2	13,9	14,6	15,3	16,2	17,2	18,4	20,0
12	9,9	10,6	11,2	11,8	12,4	13,1	13,7	14,4	15,2	16,1	17,1	18,3	19,9
14	9,8	10,4	11,0	11,7	12,3	12,9	13,6	14,3	15,1	16,0	17,0	18,2	19,8
16	9,7	10,3	10,9	11,5	12,1	12,8	13,5	14,2	15,0	15,8	16,8	18,1	19,7
18	9,5	10,1	10,8	11,4	12,0	12,7	13,3	14,1	14,8	15,7	16,7	18,0	19,6
20	9,4	10,0	10,6	11,3	11,9	12,5	13,2	13,9	14,7	15,6	16,6	17,8	19,5
22	9,3	9,9	10,5	11,1	11,8	12,4	13,1	13,8	14,6	15,5	16,5	17,7	19,4
24	9,1	9,8	10,4	11,0	11,6	12,3	13,0	13,7	14,5	15,4	16,4	17,6	19,3
26	9,0	9,6	10,3	10,9	11,5	12,2	12,9	13,6	14,4	15,3	16,3	17,5	19,2
28	8,9	9,5	10,2	10,8	11,4	12,1	12,8	13,5	14,3	15,2	16,2	17,4	19,1
30	8,8	9,4	10,0	10,7	11,3	12,0	12,8	13,4	14,2	15,1	16,1	17,3	19,0
32	8,6	9,3	9,9	10,6	11,2	11,9	12,5	13,3	14,1	15,0	16,0	17,2	18,9

CUADRO 3.4

*Contenido de humedad de equilibrio del arroz ( % )*

Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)												
	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
10	9,9	10,4	10,9	11,4	11,9	12,4	13,0	13,6	14,2	14,9	15,8	16,8	18,1
12	9,7	10,2	10,7	11,2	11,7	12,3	12,8	13,4	14,1	14,8	15,6	16,6	18,0
14	9,6	10,1	10,6	11,1	11,6	12,1	12,7	13,3	13,9	14,6	15,5	16,5	17,9
16	9,4	9,9	10,4	10,9	11,4	12,0	12,5	13,1	13,8	14,5	15,4	16,4	17,8
18	9,3	9,8	10,3	10,8	11,3	11,8	12,4	13,0	13,7	14,4	15,3	16,3	17,6
20	9,1	9,6	10,2	10,7	11,2	11,7	12,3	12,9	13,5	14,3	15,1	16,1	17,5
22	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,6	12,1	12,7	13,4	14,1	15,0	16,0	17,4
24	8,9	9,4	9,9	10,4	10,9	11,5	12,0	12,6	13,3	14,0	14,9	15,9	17,3
26	8,7	9,3	9,8	10,3	10,8	11,3	11,9	12,5	13,2	13,9	14,8	15,8	17,2
28	8,6	9,1	9,6	10,2	10,7	11,2	11,8	12,4	13,1	13,8	14,7	15,7	17,1
30	8,5	9,0	9,5	10,0	10,6	11,1	11,7	12,3	13,0	13,7	14,6	15,6	17,0
32	8,4	8,9	9,4	9,9	10,5	11,0	11,6	12,2	12,8	13,6	14,5	15,5	16,9

CUADRO 3.5

*Contenido de humedad de equilibrio del sorgo ( % ).*

Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)												
	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
10	9,6	10,2	10,7	11,3	11,9	12,4	13,1	13,7	14,4	15,2	16,1	17,2	18,7
12	9,5	10,1	10,7	11,2	11,8	12,4	13,0	13,6	14,3	15,1	16,1	17,2	18,7
14	9,5	10,0	10,6	11,2	11,7	12,3	12,9	13,6	14,3	15,1	16,0	17,1	18,6
16	9,4	10,0	10,5	11,1	11,7	12,2	12,9	13,5	14,2	15,0	15,9	17,1	18,6
18	9,3	9,9	10,5	11,0	11,6	12,2	12,8	13,4	14,2	15,0	15,9	17,0	18,6
20	9,3	9,8	10,4	11,0	11,6	12,1	12,7	13,4	14,1	14,9	15,8	16,9	18,4
22	9,2	9,8	10,3	10,9	11,5	12,0	12,7	13,4	14,0	14,8	15,8	16,9	18,4
24	9,1	9,7	10,3	10,8	11,4	12,0	12,6	13,3	14,0	14,8	15,7	16,8	18,3
26	9,1	9,6	10,2	10,8	11,3	11,9	12,5	13,2	13,9	14,7	15,6	16,8	18,3
28	9,0	9,6	10,1	10,7	11,3	11,9	12,5	13,1	13,9	14,7	15,6	16,7	18,2
30	8,9	9,5	10,1	10,6	11,2	11,8	12,4	13,1	13,8	14,6	15,5	16,7	18,2
32	8,9	9,4	10,0	10,6	11,1	11,7	12,4	13,0	13,7	14,5	15,5	16,6	18,1

CUADRO 3.6

*Contenido de humedad de equilibrio del frijol ( % ).*

Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)												
	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
10	8,8	9,5	10,2	10,9	11,6	12,3	13,1	13,9	14,7	15,7	16,8	18,2	19,9
12	8,8	9,5	10,2	10,8	11,5	12,3	13,0	13,8	14,7	15,7	16,8	18,1	19,9
14	8,7	9,4	10,1	10,8	11,5	12,2	13,0	13,8	14,6	15,6	16,7	18,1	19,9
16	8,6	9,3	10,0	10,7	11,4	12,2	12,9	13,7	14,6	15,5	16,7	18,0	19,8
18	8,6	9,3	10,0	10,7	11,4	12,1	12,9	13,7	14,5	15,5	16,6	18,0	19,8
20	8,5	9,2	9,9	10,6	11,3	12,0	12,8	13,6	14,5	15,4	16,6	17,9	19,7
22	8,5	9,2	9,9	10,6	11,3	12,0	12,7	13,6	14,4	15,4	16,5	17,9	19,7
24	8,4	9,1	9,8	10,5	11,2	11,9	12,7	13,5	14,4	15,3	16,5	17,8	19,6
26	8,3	9,1	9,8	10,5	11,2	11,9	12,6	13,5	14,3	15,3	16,4	17,8	19,6
28	8,3	9,0	9,7	10,4	11,1	11,8	12,6	13,4	14,3	15,3	16,4	17,7	19,5
30	8,2	9,0	9,7	10,3	11,1	11,8	12,5	13,4	14,2	15,2	16,3	17,7	19,5
32	8,2	8,9	9,6	10,3	11,0	11,7	12,5	13,3	14,2	15,2	16,3	17,7	19,5

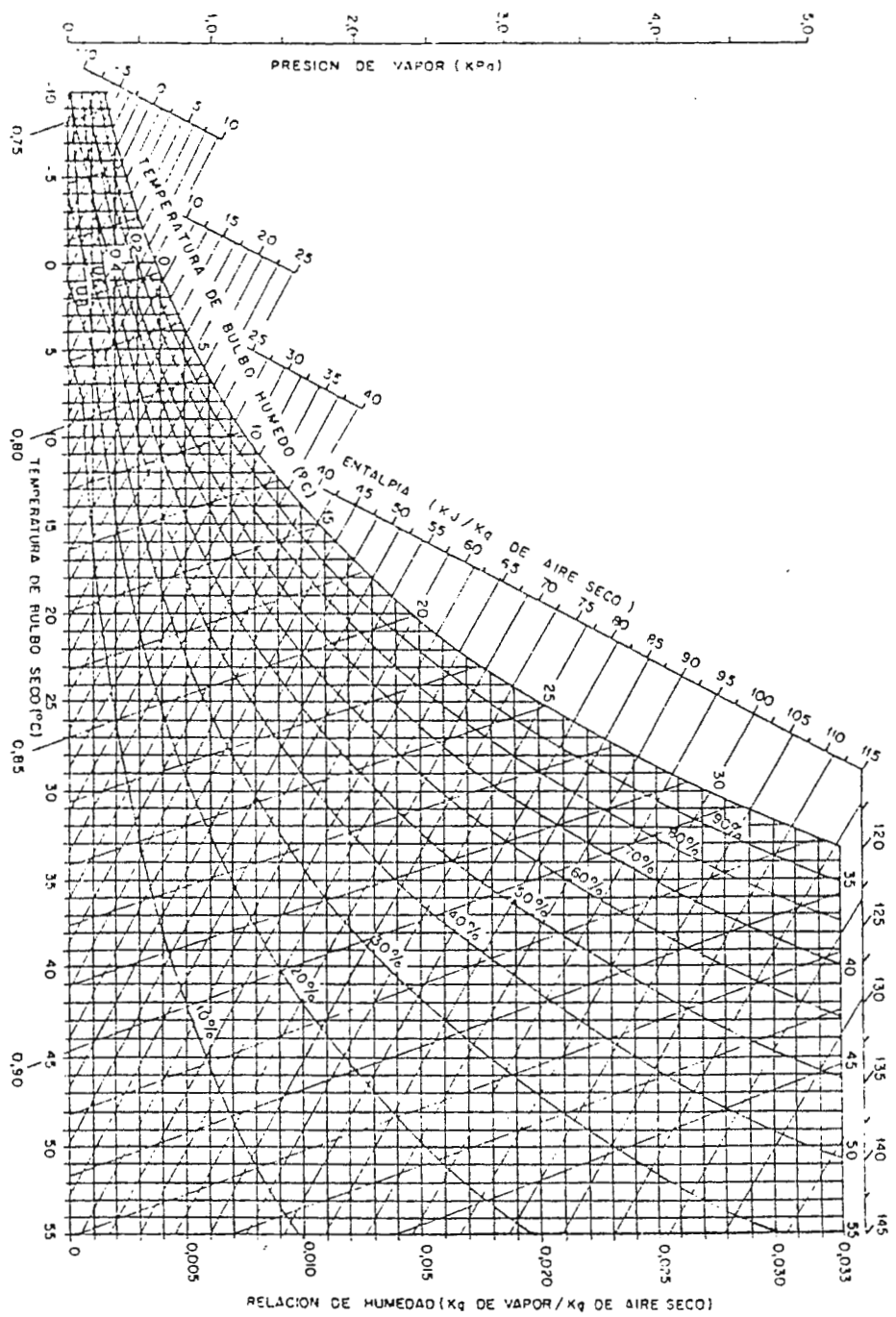


Fig. 3.1 Carta psicrometrica.

## COMO SE PRODUCE EL SECADO EN EL SILO

El secado a bajas temperaturas comienza en la parte inferior del silo y va subiendo hasta llegar a la superior. Durante el secado se distinguen en el silo tres capas distintas de contenido de humedad, como se ilustra en la Figura 2-2. La primera capa se compone de granos secos; el producto ya alcanzó el equilibrio higroscópico con las condiciones del aire. En la segunda capa, denominada frente de secado, se realiza efectivamente la transferencia de humedad del producto al aire. El espesor de esta capa varía, en general, entre 30 y 60 cm. La tercera capa se compone de granos húmedos, cuyo contenido de humedad se aproxima al inicial, pues el aire pasa por esa capa con su capacidad de secado agotada. La temperatura de esa capa es normalmente inferior a la del aire que entra al silo, pues que la evaporación de la humedad, en el frente de secado, enfría el aire.

### 3.3 ASPECTOS TECNICOS SOBRE SECAMIENTO

El secamiento artificial de granos se desarrolló en sus comienzos sobre bases empíricas; las secadoras mecánicas se construyeron y mejoraron de acuerdo con resultados prácticos, sus fundamentos teóricos sólo se estudiaron años más tarde. Para completar la visión global del almacenamiento de granos, se desarrollarán en forma general los principales aspectos teóricos del secamiento y almacenamiento de granos.

**Secado:** Proceso que normalmente se define como remoción por medios térmicos de agua contenida dentro de sólidos.

Prácticamente la totalidad de las secadoras utilizadas comercialmente para granos,

transportan el calor para la evaporación por "convección" utilizando aire en movimiento. Naturalmente en toda secadora, una pequeña parte del secamiento se realiza por "conducción" de calor por sus paredes y aún por "radiación" en algunos casos.

**Humedad relativa (HR):** La relación entre la masa de vapor presentes en un volumen dado de aire y la masa de vapor que existiría en el mismo volumen de aire, y en iguales condiciones de temperatura y presión, cuando está completamente saturado de agua, se denomina humedad relativa y es numéricamente igual a la relación de las presiones de vapor del aire de la muestra y del aire completamente saturado. La HR se expresa normalmente como un porcentaje.

**Humedad absoluta:** Su valor indica directamente la masa de vapor de agua que contiene cada unidad de aire seco; para el secamiento de granos, su valor normalmente varía entre 0.005 y 0.2 kilos de agua por kilo de aire seco.

**Temperatura y calor:** La temperatura de un cuerpo indica su nivel de actividad molecular; en el aire es un índice de su capacidad desecante y de la cantidad de calor que transporta.

La unidad de medida de calor en el sistema métrico es la caloría, que se define como la cantidad de calor necesaria para aumentar la temperatura de un gramo de agua en un grado centígrado; en los cálculos prácticos se utiliza con mayor frecuencia la kilocaloría, para evitar el manejo de numerosos muy grandes; en el sistema inglés de unidades se utiliza la BTU que equivale a aproximadamente 4 kilocalorías.

La cantidad de calor presenta en el aire húmedo, por unidad de masa de aire seco se

denomina entalpía (h) del aire, y está formada por la suma de las entalpías del aire seco y del vapor de agua asociado. Su valor en sí mismo no tiene ningún significado práctico, solamente su comparación con otras entalpías relacionadas en el proceso, proporciona resultados útiles. Normalmente la entalpía del aire seco se mide utilizando una temperatura de 17.8°C (0°F) como Datum, y la del vapor de agua con 0°C (32°F).

El calor específico (C) de una sustancia se define como la cantidad de calor que debe suministrársele a su unidad de masa, para aumentar su temperatura en 1°C; de tal manera que para un cuerpo de masa M y cuya temperatura se modifique en  $\Delta T$ , la cantidad de calor (Q) suministrada, o extraída, será:

$$Q = M \times C \times \Delta T \quad (\text{Ec. 3.1})$$

El calor específico del aire seco es de 0.24 caloría/gramo °C numéricamente igual en (BTU/lb°F), de tal manera que la entalpía correspondiente al aire seco por libra (ha) será de:  $h_a = 0.24 (T - T_o)$ .

(Ec. 3.2)

Como ya se mencionó, el vapor asociado a el aire está normalmente recalentado, en un valor igual a la diferencia entre su temperatura y la de su punto de rocío (T - Tr), de tal manera que su entalpía (h) será igual a la suma de la entalpía del agua líquida, a la temperatura de rocío (hf), más el calor que fue necesario añadirle para convertirla en vapor (hfg), denominado calor latente de evaporación, más el calor necesario para recalentar el vapor en T - Tr grados.

La cantidad de agua presente por kilo de aire seco es la humedad absoluta Habs; el calor específico del vapor es 0.45 calorías/gramo °C y el del agua a 1 por definición.

En consecuencia:

$$h = 0.24 (T - T_o) + H_{abs} [0.45 (T - T_r) + h_{fg} + (T_r - T'_o)] \quad (\text{Ec.3.3})$$

Para facilitar la determinación de las diferentes propiedades de la mezcla aire-vapor, se han desarrollado las cartas psicrométricas. Fig. 3.1.

El secamiento por convección, analizado, puede realizarse únicamente, cuando la presión de vapor ejercida por el agua situada en la superficie de los granos, es mayor que la presión parcial del vapor en el aire circundante; la velocidad de secamiento será función de la diferencia de estas presiones, del coeficiente de transferencia de masa y del área expuesta del grano.

El coeficiente de transferencia de masa es análogo al de transferencia de calor familiar a los ingenieros. Ambos coeficientes son medidas de resistencia al flujo por unidad de área, el primero al paso de masa (agua) y el segundo de calor, a través de la fina película de aire estancado que rodea los granos y dependen de la velocidad del aire circulante que modifica el espesor de la película.

La presión de vapor de los granos varía con su humedad y temperatura. Los granos húmedos presentan en su superficie una presión de vapor aproximadamente igual a la del agua líquida libre. Cuando se va removiendo la humedad por secamiento y la superficie no se encuentra totalmente húmeda, la presión de vapor va disminuyendo en forma acelerada.

**Calor Consumido:** La cantidad total de calor que consume un proceso de secado de granos incluye además de calor latente utilizado en la evaporación, calor para

recalentar el vapor del aire, para compensar las pérdidas por radiación, para calentar el producto y el agua que contenga, para calentar el aire y el vapor que contenga el calor adicional que se requiera para promover la difusión de la humedad de los granos hasta su superficie.

$$\text{Calor latente: } Q_1 = hfg \times W \times \Delta H \quad (\text{Ec. 3.4})$$

donde W es la cantidad de producto a secar y  $\Delta H$  = humedad removida por Kg. de producto.

$$\text{Calor de recalentamiento: } Q_v = (0.45) \times T \times \Delta H \times W \quad (\text{Ec. 3.5})$$

**Calor de radiación:** Depende del material de construcción y características de la secadora, régimen de vientos circundante, etc.

**Calor para calentar el producto:**

$$Q_p = W(C_p + C_a \times H_f) \Delta T \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Donde W = cantidad de producto que se calienta,  $C_p$  calor específico de la sustancia,

$C_a$  calor específico del agua = 1

$H_f$  = humedad final del producto en base seca

$\Delta T$  = variación de temperatura del producto

**Calor para calentar el aire:**

$$Q_a = W_a (C_a + C_v H_{abs}) \Delta T$$

donde  $W_a$  = flujo de aire en kilogramos,

$C_a$  = calor específico del aire = 0.24,

$C_v$  = calor específico del vapor = 0.45

$H_{abs}$  = humedad absoluta

$T$  = variación de temperatura del aire.

Haynes (1961) (3) preparó una tabla para el calor de vaporización de varios cereales según su contenido de humedad y temperatura, la tabla No. 3.7

Tabla 3.7

Producto	Humedad (base húmeda)	Temperatura		
		10°C	21°C	38°C
Agua (hfg)		1.065	1.055	1.037
Trigo	9%	1.218	1.207	1.186
	13%	1.163	1.152	1.133
	16.6%	1.091	1.081	1.062
Sorgo	9%	1.214	1.203	1.182
	13%	1.154	1.144	1.124
	16.6%	1.097	1.087	1.068
Maíz	9%	1.371	1.359	1.335
	13%	1.292	1.280	1.258
	16.6%	1.191	1.180	1.160

Color de vaporización BTU/tb, de granos en varias condiciones.

### 3.3.1 VELOCIDAD DE SECADO

Generalmente se define el secado como la remoción de agua contenida en sólidos por medios térmicos; es un proceso diferente al desaguado en el cual la remoción se efectúa por medios mecánicos, prensas, rodillos, etc.

El secamiento comercial utiliza en casi todos los casos un proceso de convección

forzada de aire caliente, para el transporte de calor y evacuación de la humedad.

La velocidad de secado es proporcional a la diferencia de presión de vapor del medio desecante y de la humedad en la superficie del producto, a la superficie expuesta y al coeficiente de transferencia de masa, coeficiente que, indica la "resistencia" por unidad de área que ejerce la película de aire situada en la periferia del grano, al flujo de masa de agua.

Cuando se seca un grano, ocurren simultáneamente dos procesos diferentes: transferencia de calor para evaporar el agua, y transferencia de masa en forma de humedad interna que se difunde, y de líquido que se evapora y remueve de la superficie. Los factores que gobiernan cada uno de estos procesos determinarán la velocidad de secado.

Los movimientos internos de humedad pueden ser de varios tipos, dependiendo de la estructura del grano; algunos serán de difusión pura, otros de flujo capilar o causados por la acción mecánica de la contracción del grano.

**Etapas de secamiento:** Pueden distinguirse tres etapas principales durante el secado de granos.

La figura No.3.2 relaciona la velocidad de secado con la duración del proceso y permite distinguir muy claramente las tres etapas.

La primera etapa, de calentamiento, se cumple entre los puntos A y B, en ellas la velocidad de evaporación aumenta según el grano se va calentando.

La segunda etapa, de velocidad constante, se lleva a cabo entre los puntos B y C; el

secamiento tiene lugar en la superficie del producto que se mantiene húmeda en su totalidad; la velocidad de secado en esta etapa es independiente de las características internas del grano y es controlada fundamentalmente por las características del aire desecante. La velocidad está determinada por la rata de difusión del vapor de agua, a través de la película de aire estancado que envuelve los granos, hasta la corriente de aire principal. (4)

$$V = \frac{C_t \times A \times (T_a - T_g)}{h_{fg}} \quad (\text{Ec. 3.7})$$

Donde:

$C_t$  = Coeficiente total de transmisión de calor y de masa.

$A$  = Area expuesta

$T_a$  = Temperatura del aire de secado

$T_g$  = Temperatura del grano

$h_{fg}$  = Calor latente de evaporación

La temperatura del grano,  $t_g$ , en esta etapa tiende a ser igual a la temperatura de bulbo húmedo del aire desecante, sin embargo la acción de la "conducción" de calor o de "radiación" pueden elevarla.

El coeficiente de transferencia de calor y masa depende principalmente del espesor de la película de aire estancado que envuelve el grano, espesor que disminuye al aumentar la velocidad del aire.

El punto C, donde la superficie deja de permanecer completamente húmeda, se denomina en ocasiones punto crítico e indica el inicio de la tercera etapa, de velocidad decreciente, etapa que a su vez puede subdividirse en dos partes: una primera en la cual la superficie aun presenta partes húmedas y otra en la cual se

encuentra completamente seca. En la primera parte la velocidad de secado depende de las condiciones tanto del aire como de las características físicas internas del grano; en la segunda parte depende de las características del grano, que determinan el tiempo de difusión de la humedad interna; todo intento que se haga por acelerar el secamiento, utilizando temperatura más elevada o mayor volumen de aire, produce daños internos, al obligar a la humedad a desplazarse más rápidamente, "abriendo" en cierta forma nuevos caminos que producen inevitablemente daños físicos. (5) (6) (7).

Durante la etapa de velocidad decreciente, la temperatura del grano es superior a la del bulbo húmedo, por la disminución de la conversión de calor sensible en latente. El aumento de temperatura contribuye al daño de los granos; acelerando la formación de fisuras y produciendo daños químicos y físicos de importancia.

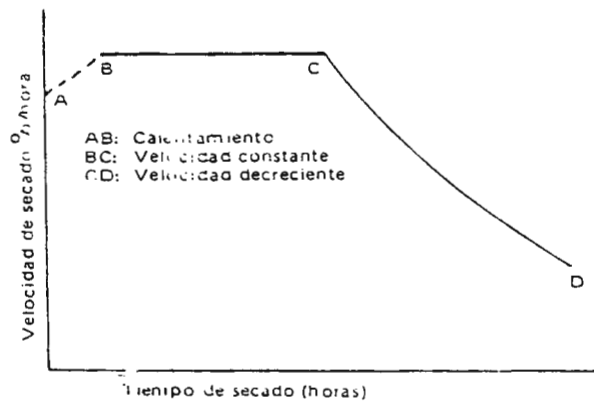


Fig. 3.2 Curva de secado de materiales higroscópicos.

Diferentes investigaciones han desarrollado ecuaciones semi-empíricas, que representan el proceso de difusión interna de humedad en granos individuales, en forma aproximada.

Sabbah (1971), por ejemplo, encontró que para maíz el tiempo máximo teórico en el cual la humedad, concentrada inicialmente en un sólo punto en el centro del grano, se distribuye uniformemente en todo el grano, puede expresarse como:

$$T_{\max.} = \frac{R_g^2}{60D} \quad (\text{Ec. 2.8})$$

60

$R_g$  = radio promedio del grano en pies

$D$  = Difusividad de masa del grano en pies cuadrados por hora.

La difusividad es función de la temperatura y del contenido de humedad según la siguiente expresión:

$$D = 0.057 H_s^{-4.812/(T + 460)} \quad (\text{Ec. 3.9})$$

$H_s$  = Humedad en base seca

$T$  = Temperatura en °F.

## REFERENCIAS DEL CAPITULO

- 1) CHAG, D,T, CHUNG D.S. SHIDGES, T.O. Grain dryer Selección Model ASAE, ST Joseph, Michigan, 1979, 32p.
- 2) ASAE - AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. Agricultural Engineers year book. 1981, ST Joseph, Michigan, 1980.
- 3) HAYNES, VAPOR PRESSURES in hygroscopic graisn seeds, USDA, Technical, bulletin No. 1229, 1975.
- 4) TUIITE - FOSTER, Effects of artificial drying on the higroscopie prepertires of corn, Cereal Chemistry, Vol. 4 No.6 - 1963.
- 5) FOSTER en, Grains Storage, part of a system, capitulo 8, 1973.
- 6) USDA, STRESS CRACKS and breakage in artificially dried corn. Research report No. 631, 1963.
- 7) BROOKER, BAKER, HALL, Op. cit, p.20, 1964.

**CAPITULO 4.**

## **INTRODUCCION**

### **CAPITULO 4.**

El desarrollo del Capítulo 4, comprende todos los elementos de tipo técnico que son útiles en el dimensionamiento y diseño propio del secador de granos.

Primero se enuncian los métodos para calcular y definir la cantidad de energía calorífica que el sistema tendrá que transmitir al aire; definiendo también las cantidades mínimas de aire que pueden usarse.

Posteriormente se hace pequeña pero sustancial discusión sobre el movimiento del aire las características de este cuando es conducido hacia un lugar específico.

El capítulo termina con los diseños de los elementos que constituyen el secador que incluye sus memorias de cálculo y consideraciones adicionales para mejoras del sistema.

## **4.1 DETERMINACION DEL CALENTAMIENTO DEL AIRE**

### **4.1.1 EMPLEO DEL ABACO SICROMETRICO EN LA DESECACION DE GRANOS**

El ábaco sicrométrico (figura 4.0), está basado en valores de la temperatura, en función de la humedad hallados experimentalmente y permite la determinación inmediata de la humedad relativa del aire, si se conocen las temperaturas del la bola o cubeta húmeda y de la bola o cubeta seca. La humedad puede medirse, entonces de varias maneras.

En el laboratorio, se mide haciendo circular un volumen conocido de aire a través de una serie de tubos que contengan cloruro cálcico. Como esta sustancia absorbe el vapor de aire, el aumento de peso representa el peso del vapor de agua absorbido.

En el campo, es más corriente utilizar un termómetro de bola húmeda y otro de bola seca. Este par de termómetros, constituyen un higrómetro, basado en que cuando se hace girar en el aire un trapo húmedo, éste se enfría al evaporárcele el agua. Cuanto más baja sea la humedad relativa del agua más agua, más rápida será la evaporación del agua y, por lo tanto, mayor el efecto de enfriamiento, por lo cual el termómetro, cuya cubeta se haya envuelto en el trapo húmedo marcará una temperatura mucho más baja que el termómetro de la cubeta seca. Los termómetros seco y húmedo se constituyen formando una sola unidad , llamada sicrómetrohonda.



El sicrómetrohonda, sirve para determinar las temperaturas de la cubeta húmeda y de la cubeta seca. Conocidas estas temperaturas, puede hallarse la humedad relativa, si se consulta el ábaco sicrométrico. La humedad relativa, es una medida del grado de saturación relativa del aire con vapor de agua.

La humedad del aire ejerce también un presión de vapor que depende del grado en que el aire se encuentre saturado. La humedad relativa, es también, por lo tanto, la relación entre la presión real del vapor que se produce a las temperaturas de las cubetas húmeda y seca y la presión de vapor que se produciría en el punto de saturación correspondiente a la temperatura de la cubeta seca. Cuando más baja sea la humedad relativa, más baja será la presión de vapor a cualquier temperatura dada. Por consiguiente, si la humedad del grano se encuentra en el punto de equilibrio con unos 25 grados centígrados y 70% de humedad relativa del aire, si esta disminuye al 40%, habrá una diferencia de presión entre el grano y el aire y aquél sufrirá un fenómeno de desecación. Además, si se mantiene constante la cantidad real de humedad y se aumenta la temperatura, disminuirá la humedad relativa, pero la presión del vapor del aire permanecerá constante. En estas condiciones, el calor que el grano recibe del aire secante aumentará la presión del vapor en el grano tratado, por lo que éste cederá humedad al aire secante.

#### **4.1.2 AUMENTO DE TEMPERATURA DEL AIRE.**

Para determinar el aumento de temperatura del aire para secar granos, se requiere de los datos de temperatura y humedad relativa (promedio) de la región, y el contenido de humedad final al que el grano será almacenado.

Para obtener la humedad de equilibrio se emplea el cuadro 2.1 de la figura 4.1

CUADRO 2.1

Contenido de humedad de equilibrio del maiz ( % )

Temperatura (°C)	Humedad Relativa (%)												
	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
10	9,9	10,6	11,2	11,8	12,5	13,1	13,8	14,6	15,4	16,3	17,3	18,6	20,3
12	9,7	10,3	11,0	11,6	12,3	12,9	13,6	14,4	15,2	16,1	17,1	18,4	20,0
14	9,4	10,1	10,7	11,4	12,0	12,7	13,4	14,2	15,0	15,9	16,9	18,2	19,9
16	9,2	9,9	10,5	11,2	11,8	12,5	13,2	14,0	14,8	15,7	16,7	18,0	19,7
18	9,0	9,7	10,3	11,0	11,6	12,3	13,0	13,8	14,6	15,5	16,6	17,9	19,5
20	8,8	9,5	10,1	10,8	11,5	12,1	12,8	13,6	14,4	15,3	16,4	17,7	19,4
22	8,6	9,3	10,0	10,6	11,3	12,0	12,7	13,4	14,3	15,2	16,2	17,5	19,2
24	8,5	9,1	9,8	10,4	11,1	11,8	12,5	13,3	14,1	15,0	16,1	17,4	19,1
26	8,3	8,9	9,6	10,3	10,9	11,6	12,3	13,1	13,9	14,9	15,9	17,2	19,0
28	8,1	8,8	9,4	10,1	10,8	11,5	12,2	12,9	13,8	14,7	15,8	17,1	18,8
30	7,9	8,6	9,3	9,9	10,6	11,3	12,0	12,8	13,6	14,6	15,6	17,0	18,7
32	7,8	8,4	9,1	9,8	10,5	11,1	11,9	12,6	13,5	14,4	15,5	16,8	18,6

Fig. 4.1.

Al aumentar la temperatura, se emplea el ábaco sicrométrico y el cuadro 2.1 para la humedad de equilibrio, si el incremento de temperatura no da la humedad deseada, se seguirá incrementado hasta obtener el resultado deseado, luego el valor de temperatura incrementada total, será el incremento que deberá proporcionar el colector en la temperatura del aire para el secado de los granos.

## 4.2 DIMENSIONAMIENTO DEL SILO SECADOR

El dimensionamiento de los silos para el secado da bajas temperaturas comprende las dimensiones adecuadas, altura y diámetro, y la especificación del ventilador que servirá para mover el aire.

Los cuadros 4.1 y 4.2, presentan la capacidad estática de los silos cilíndricos de diferentes diámetros, para alturas hasta de 6 metros, que el máximo recomendable. La relación entre el diámetro y la altura debe ser la más próxima posible a 5:3.

D) Cantidad Máxima de producto que se puede colocar en una sola etapa.

La cantidad de producto que se puede colocar en el silo en cada etapa con un flujo de aire nominal y un flujo de aire específico, se determina por la ecuación 4.1:

$$V = Q_n / F_e \quad 3 \quad (\text{ec.4.1})$$

Donde:  $V$  = volumen de producto por etapa - [m<sup>3</sup>]

$Q$  = Flujo nominal del ventilador - [m<sup>3</sup>O/s]

$f_e$  = Flujo de aire específico [m<sup>3</sup>/s por m<sup>3</sup>]

para obtener toneladas:

$$V_{\text{ton}} = V \cdot m_e \text{ (ec. 4.2)}$$

Donde:  $V_{\text{ton}}$  = Volumen en toneladas

$V$  = volumen en  $M^3$

$m_e$  = masa específica del grano (ton /  $m^3$  ]

### 4.3 DETERMINACION DEL FLUJO DE AIRE.

Hay dos maneras de disminuir la duración del secado a bajas temperaturas:

- I) Aumentando el caudal del aire y
- II) Aumentando la temperatura del aire.

La elección de uno de los métodos se debe basar en el potencial de secado de la región en que se instalará el silo secador.

En general, el calentamiento del aire se recomienda solamente en regiones en que el potencial de secado del aire natural es insuficiente para que se alcance el contenido de humedad final que se busca. El calentamiento del aire no aumenta, prácticamente, la velocidad de desplazamiento del frente de secado, e interesaría únicamente durante los períodos de alta humedad relativa del aire, ya que no habría detención del desplazamiento del frente de secado.

El aumento del caudal de aire tiene más influencia del frente sobre el tiempo de secado, pues la velocidad de desplazamiento del frente de secado es directamente proporcional al flujo de aire por unidad de masa del producto que hay que secar.

En lugares donde la humedad relativa del aire, es alta, el aumento del caudal del aire no es suficiente para lograr el secado, pues esa variable no influye en el potencial de secado del aire.

La especificación del ventilador se obtiene sobre la base del flujo mínimo de aire para secado, en la región en que se va a instalar el silo, y la resistencia al flujo de aire que ofrece el producto. En ausencia de datos acerca de flujos mínimos de aire para secado, se emplean los cuadros 4.3, 4.4, 4.5 y 4.6.

CUADRO 4.1

Capacidad de silos, en toneladas, para maíz, soya y trigo,  
(masa específica aparente igual a 750 Kg m<sup>3</sup>)

Altura de la capa de granos (m)	Diámetro del silo (m)								
	2,3	3,7	5,5	6,4 <sup>(1)</sup>	7,8	8,2	9,1	10,1 <sup>(1)</sup>	11
0,25	0,78	2,0	4,5	6,0	9,0	9,9	12	15	18
0,50	1,6	4,0	8,9	12	18	20	24	30	36
0,75	2,3	6,0	13	18	27	30	37	45	53
1,00	3,1	8,1	18	24	36	40	49	60	71
1,25	3,9	10	22	30	45	50	61	75	89
1,50	4,7 <sup>(2)</sup>	12	27	36	54	59	73	90	107
1,75	5,5	14	31	42	63	69	85	105	125
2,00	6,2	16	36	48	72	79	98	120	143
2,25	7,0	18 <sup>(2)</sup>	40	54	81	89	110	135	160
2,50	7,8	20	45	60	90	99	112	150	178
2,75	-	22	49	66	99	109	124	165	196
3,00	-	24	53	72	108	119	146	180	214
3,25	-	26	58	78	116	129	159	195	232
3,50	-	28	62 <sup>(2)</sup>	84	125	139	171	210	249
3,75	-	30	67	90 <sup>(2)</sup>	134	149	183	225	267
4,00	-	-	71	97	143	158	195	240	285
4,25	-	-	76	103	152	168	207	255	303
4,50	-	-	80	109	161	178	220	270	321
4,75	-	-	85	115	170 <sup>(2)</sup>	188	232	285	339
5,00	-	-	89	121	179	198 <sup>(2)</sup>	244	300	356
5,25	-	-	94	127	188	208	256	315	374
5,50	-	-	98	133	197	218	268 <sup>(2)</sup>	330	392
5,75	-	-	-	139	206	228	280	346	410
6,00	-	-	-	145	215	238	293	361 <sup>(2)</sup>	428 <sup>(2)</sup>

(1) Dimensiones que no se comercializan en el Brasil.

(2) Relación diámetro: altura más próxima a 5:3.

Referencia ( 1 )

CUADRO 4.2

Capacidad de silos, en toneladas, para arroz,  
(masa específica aparente igual a  $600 \text{ Kg m}^3$  )

Altura de la capa de granos m	Diámetro del silo (m)								
	2,3	3,7	5,5	6,4 <sup>(1)</sup>	7,8	8,2	9,1	10,1 <sup>(1)</sup>	11
0,25	0,62	1,6	3,6	4,8	7,2	7,9	9,8	12	14
0,50	1,2	3,2	7,1	9,7	14	16	20	24	29
0,75	1,9	4,8	1,1	14	22	24	29	36	43
1,00	2,5	6,5	14	19	29	32	39	48	57
1,25	3,1	8,1	18	24	36	40	49	60	71
1,50	3,7 <sup>(2)</sup>	9,7	21	29	43	48	59	72	86
1,75	4,4	11	25	34	50	55	68	84	100
2,00	5,0	13	29	39	57	63	78	96	114
2,25	5,6	15 <sup>(2)</sup>	32	43	65	71	88	108	128
2,50	6,2	16	36	48	72	79	98	120	143
2,75	-	18	39	53	79	87	107	132	157
3,00	-	19	43	58	86	95	117	144	171
3,25	-	21	46	63	93	103	127	156	185
3,50	-	23	50 <sup>(2)</sup>	68	100	111	137	168	200
3,75	-	24	53	72 <sup>(2)</sup>	108	119	146	180	214
4,00	-	-	57	77	115	127	156	192	228
4,25	-	-	61	82	112	135	166	204	242
4,50	-	-	64	87	129	143	176	216	257
4,75	-	-	68	92	136 <sup>(2)</sup>	151	185	228	271
5,00	-	-	71	97	143	158 <sup>(2)</sup>	195	240	285
5,25	-	-	75	101	151	166	205	252	299
5,50	-	-	78	106	158	174	215 <sup>(2)</sup>	264	314
5,75	-	-	-	111	165	182	224	276	328
6,00	-	-	-	116	172	190	234	288 <sup>(2)</sup>	342 <sup>(2)</sup>

(1) Dimensiones que no se comercializan en el Brasil.

(2) Relación diámetro: altura más próxima a 5:3.

Referencia ( 1 ).

### **4.3.1 FLUJO DE AIRE MINIMO PARA SECADO A BAJAS TEMPERATURAS.**

La elección de un flujo de aire adecuado tiene vital importancia par el éxito de los sistemas de secado a bajas temperaturas. Si el flujo de aire es inferior al valor adecuado, hay demora en el secado y se puede comprometer la calidad del producto. Si el flujo de aire es superior al valor adecuado, si bien disminuye el tiempo de secado, aumenta el consumo de energía para accionar el ventilador y aumenta, por tanto, el costo operativo del sistema, además de exigir una mayor inversión inicial.

Los flujos de aire recomendados para el secado, que también se conocen como flujos mínimos de aire, se expresan normalmente en función de la unidad del volumen del producto. El flujo mínimo de aire depende de los factores siguientes:

- a) Tipo de producto.
- b) Clima de la región
- c) Contenido de humedad inicial.

La dependencia del tipo de grano está ligada a la mayor susceptibilidad al deterioro que presentan algunos granos, en relación con otros, debido a su composición química y a la facilidad que tienen los hongos para penetrar en su interior en busca de alimento para sobrevivir. De tal modo, las necesidades de aire para secar el arroz, son diferentes de las necesidades del maíz, por los factores citados. La influencia del clima de la región determina el potencial de secado: en regiones en que hay grandes probabilidades de que ocurran períodos prolongados de elevada humedad relativa, durante la época de secado, se necesita un flujo de aire mayor o bien calentamiento suplementario, o ambas cosas, por el mayor riesgo del proceso. El contenido de humedad inicial, también, es un factor que determina el flujo mínimo, pues está

directamente relacionado con la susceptibilidad del producto al ataque de hongos. Los granos, que tienen un alto contenido de humedad son atacados con más facilidad por lo hongo, por los que están más expuestos al deterioro. Así, los productos, cuyo contenido de humedad inicial, es alto, necesitan un flujo de aire más intenso.

En el llenado por capas, el flujo de aire que se utiliza es, normalmente, inferior al flujo necesario para secar en una sola etapa. El flujo de aire que se recomienda para el secado por capas es de 1,25-10 al 1,56-10 m<sup>3</sup>/s , por m<sup>3</sup> de capacidad estática del silo secador. La presión estática que el ventilador tiene que vencer se calcula sobre la base de la altura final de la capa de granos. La cantidad máxima del producto que se puede colocar en cada etapa de llenado se calcula sobre la base del flujo de aire mínimo.

Por lo tanto, el flujo de aire, que el ventilador debe proporcionar, se calcula, mediante la ecuación 4.3:

$$Q_n = f_e * C_e \text{ (Ec. 4.3)}$$

Donde:  $Q_n$  = Flujo de ventilador [ m<sup>3</sup>/s ] (nominal)

$f_e$  = flujo específico [m<sup>3</sup>/s por m ]

$C_e$  = Capacidad estática del silo [m<sup>3</sup>]

El proyectista del sistema de secado, por precaución, debe dimensionar un ventilador que mueva alrededor del 25% más aire que el que necesita el proyecto, porque los ventiladores no repiten en el campo, el desempeño que tienen en los ensayos de laboratorio, donde las condiciones de funcionamiento son ideales.

Por lo que el flujo real del ventilador, se expresa en la ecuación 4.4:

$$Q = Q_n * f_s \text{ (Ec. 4.4)}$$

Donde:  $Q_n$  = flujo nominal del ventilador [ m<sup>3</sup>/s]

$f_s$  = factor de seguridad igual a 1.25

CUADRO 4.3

Influencia del flujo de aire y del contenido de humedad en el tiempo de secado y en la pérdida de materia seca del maíz, con temperatura de bulbo seco de 30° C y humedad relativa de 70 %.

Humedad del producto		Flujo de aire	Tiempo de secado	Férdida de materia seca
Inicial(%)	Final(%)	m <sup>3</sup> ·s · m <sup>3</sup>	(h)	(%)
22	12,6	3,75 · 10 <sup>-2</sup>	312	0,90 <sup>(2)</sup>
	12,6	5,00 · 10 <sup>-2</sup>	240	0,53 <sup>(2)</sup>
	12,7	6,25 · 10 <sup>-2</sup>	192	0,37
	12,7	7,50 · 10 <sup>-2</sup>	168	0,28
	12,6	8,75 · 10 <sup>-2</sup>	168	0,23
	12,7	1,00 · 10 <sup>-1</sup>	144	0,19
	12,6	1,13 · 10 <sup>-1</sup>	144	0,16
	12,8	1,25 · 10 <sup>-1</sup>	120	0,13
20	12,6	2,50 · 10 <sup>-2</sup>	384	0,63 <sup>(2)</sup>
	12,6	3,75 · 10 <sup>-2</sup>	264	0,34
	12,6	5,00 · 10 <sup>-2</sup>	216	0,22
	12,7	6,25 · 10 <sup>-2</sup>	168	0,16
	12,8	7,50 · 10 <sup>-2</sup>	144	0,13
	12,7	8,75 · 10 <sup>-2</sup>	144	0,10
	12,8	1,00 · 10 <sup>-1</sup>	120	0,09
	12,7	1,13 · 10 <sup>-1</sup>	120	0,07
18	12,7	1,25 · 10 <sup>-1</sup>	120	0,06
	12,6	1,25 · 10 <sup>-2</sup>	600	0,55 <sup>(2)</sup>
	12,7	2,50 · 10 <sup>-2</sup>	312	0,21
	12,7	3,75 · 10 <sup>-2</sup>	216	0,13
	12,8	5,00 · 10 <sup>-2</sup>	168	0,09
	12,8	6,25 · 10 <sup>-2</sup>	144	0,07
	12,7	7,50 · 10 <sup>-2</sup>	144	0,05
	12,7	8,75 · 10 <sup>-2</sup>	120	0,04
	12,7	1,00 · 10 <sup>-1</sup>	120	0,04
	12,8	1,13 · 10 <sup>-1</sup>	96	0,03
12,8	1,25 · 10 <sup>-1</sup>	96	0,03	

(1) Calentamiento del aire por ventilador: 1°C

(2) Condiciones de flujo de aire no recomendables.

Referencia ( 1 )

CUADRO 4.4

*Influencia del flujo de aire y del contenido de humedad en el tiempo de secado y en la pérdida de materia seca del maíz, con temperatura de budo seco de 25°C y humedad relativa de 67 %*

Humedad del producto		Flujo de aire	Tiempo de secado	Pérdida de materia seca
Inicial(%)	Final(%)	m <sup>3</sup> /s · m <sup>3</sup>	(h)	(%)
22	12,6	2,50 · 10 <sup>-2</sup>	456	0,91 <sup>(2)</sup>
	12,6	3,75 · 10 <sup>-2</sup>	312	0,45
	12,6	5,00 · 10 <sup>-2</sup>	264	0,30
	12,7	6,25 · 10 <sup>-2</sup>	216	0,22
	12,7	7,50 · 10 <sup>-2</sup>	192	0,17
	12,7	8,75 · 10 <sup>-2</sup>	168	0,14
	12,7	1,00 · 10 <sup>-1</sup>	168	0,11
	12,8	1,13 · 10 <sup>-1</sup>	144	0,10
	12,7	1,25 · 10 <sup>-1</sup>	144	0,08
20	12,6	2,50 · 10 <sup>-2</sup>	384	0,34
	12,6	3,75 · 10 <sup>-2</sup>	288	0,19
	12,7	5,00 · 10 <sup>-2</sup>	216	0,13
	12,7	6,25 · 10 <sup>-2</sup>	192	0,10
	12,7	7,50 · 10 <sup>-2</sup>	168	0,08
	12,8	8,75 · 10 <sup>-2</sup>	144	0,06
	12,7	1,00 · 10 <sup>-1</sup>	144	0,05
	12,9	1,13 · 10 <sup>-1</sup>	120	0,05
	12,8	1,25 · 10 <sup>-1</sup>	120	0,04
18	12,6	1,25 · 10 <sup>-1</sup>	624	0,30
	12,6	2,50 · 10 <sup>-2</sup>	336	0,13
	12,7	3,75 · 10 <sup>-2</sup>	240	0,08
	12,7	5,00 · 10 <sup>-2</sup>	192	0,06
	12,7	6,25 · 10 <sup>-2</sup>	168	0,04
	12,8	7,50 · 10 <sup>-2</sup>	144	0,03
	12,9	8,75 · 10 <sup>-2</sup>	120	0,03
	12,8	1,00 · 10 <sup>-1</sup>	120	0,02
	12,7	1,13 · 10 <sup>-1</sup>	120	0,02
12,9	1,25 · 10 <sup>-1</sup>	96	0,02	

(1) Calentamiento del aire por ventilador: 1°C

(2) Condiciones de flujo de aire no recomendables.

Referencia ( 1 ).

CUADRO 4.5

*Influencia del flujo de aire y del contenido de humedad en el tiempo de secado y en la pérdida de materia seca del maíz, con temperatura de bulbo seco de 20°C y humedad relativa de 65 %.*

Humedad del producto		Flujo de aire	Tiempo de secado	Pérdida de materia seca
Inicial(%)	Final(%)	m <sup>3</sup> /s · m <sup>3</sup>	(h)	(%)
22	12,6	2,50 · 10 <sup>-2</sup>	480	0,47
	12,7	3,75 · 10 <sup>-2</sup>	336	0,27
	12,7	5,00 · 10 <sup>-2</sup>	264	0,18
	12,8	6,25 · 10 <sup>-2</sup>	216	0,13
	12,8	7,59 · 10 <sup>-2</sup>	192	0,11
	12,7	8,75 · 10 <sup>-2</sup>	192	0,09
	12,8	1,00 · 10 <sup>-1</sup>	168	0,07
	12,9	1,13 · 10 <sup>-1</sup>	144	0,06
	12,8	1,25 · 10 <sup>-1</sup>	144	0,05
	20	12,6	1,25 · 10 <sup>-2</sup>	768
12,7		2,50 · 10 <sup>-2</sup>	408	0,20
12,7		3,75 · 10 <sup>-2</sup>	288	0,12
12,7		5,00 · 10 <sup>-2</sup>	240	0,09
12,8		6,25 · 10 <sup>-2</sup>	192	0,06
12,8		7,50 · 10 <sup>-2</sup>	168	0,05
12,8		8,75 · 10 <sup>-2</sup>	168	0,04
12,8		1,00 · 10 <sup>-1</sup>	144	0,04
12,8		1,13 · 10 <sup>-1</sup>	144	0,03
12,9		1,25 · 10 <sup>-1</sup>	120	0,03
18	12,6	1,25 · 10 <sup>-2</sup>	672	0,18
	12,7	2,50 · 10 <sup>-2</sup>	360	0,08
	12,7	3,75 · 10 <sup>-2</sup>	264	0,05
	12,8	5,00 · 10 <sup>-2</sup>	192	0,04
	12,8	6,25 · 10 <sup>-2</sup>	168	0,03
	12,8	7,50 · 10 <sup>-2</sup>	144	0,02
	12,8	8,75 · 10 <sup>-2</sup>	144	0,02
	12,9	1,00 · 10 <sup>-1</sup>	120	0,02
	12,8	1,13 · 10 <sup>-1</sup>	120	0,01
	12,8	1,25 · 10 <sup>-1</sup>	120	0,01

(1) Calentamiento del aire por ventilador: 1°C

(2) Condiciones de flujo de aire no recomendables.

*Referencia (1).*

CUADRO 4.6

Influencia del flujo de aire y del contenido de humedad en el tiempo de secado y en la pérdida de materia seca del maíz, con temperatura de bulbo seco de 15°C y humedad relativa de 62 %.

Humedad del producto		Flujo de aire	Tiempo de secado	Pérdida de materia seca
Inicial(%)	Final(%)	m <sup>3</sup> /s · m <sup>3</sup>	(h)	(%)
22	12,6	1,25 · 10 <sup>-2</sup>	984	0,63 <sup>(1)</sup>
	12,7	2,50 · 10 <sup>-2</sup>	528	0,23
	12,7	3,75 · 10 <sup>-2</sup>	384	0,14
	12,8	5,00 · 10 <sup>-2</sup>	312	0,10
	12,8	6,25 · 10 <sup>-2</sup>	264	0,08
	12,8	7,50 · 10 <sup>-2</sup>	240	0,06
	12,8	8,75 · 10 <sup>-2</sup>	216	0,05
	12,9	1,00 · 10 <sup>-1</sup>	192	0,04
	12,8	1,13 · 10 <sup>-1</sup>	192	0,04
	12,9	1,25 · 10 <sup>-1</sup>	168	0,03
20	12,6	1,25 · 10 <sup>-2</sup>	840	0,26
	12,7	2,50 · 10 <sup>-2</sup>	456	0,11
	12,7	3,75 · 10 <sup>-2</sup>	336	0,07
	12,8	5,00 · 10 <sup>-2</sup>	264	0,05
	12,8	6,25 · 10 <sup>-2</sup>	240	0,04
	12,9	7,50 · 10 <sup>-2</sup>	192	0,03
	12,8	8,75 · 10 <sup>-2</sup>	192	0,03
	12,9	1,00 · 10 <sup>-1</sup>	168	0,02
	12,8	1,13 · 10 <sup>-1</sup>	168	0,02
	12,9	1,25 · 10 <sup>-1</sup>	144	0,02
18	12,7	1,25 · 10 <sup>-2</sup>	720	0,10
	12,8	2,50 · 10 <sup>-2</sup>	384	0,05
	12,8	3,75 · 10 <sup>-2</sup>	288	0,03
	12,8	5,00 · 10 <sup>-2</sup>	240	0,02
	12,9	6,25 · 10 <sup>-2</sup>	192	0,02
	12,9	7,50 · 10 <sup>-2</sup>	168	0,01
	12,8	8,75 · 10 <sup>-2</sup>	168	0,01
	12,9	1,00 · 10 <sup>-1</sup>	144	0,01
	12,8	1,13 · 10 <sup>-1</sup>	144	0,01
	13,0	1,25 · 10 <sup>-1</sup>	120	0,01

(1) Calentamiento del aire por ventilador: 1° C

(2) Condiciones de flujo de aire no recomendables.

Referencia (1 ).

### **4.3.2 RESISTENCIA AL FLUJO DE AIRE**

Una vez determinada la cantidad de aire que se debe utilizar para el secado, es preciso determinar la cantidad de energía mecánica que el ventilador tiene que transferir al aire para vencer la resistencia que ofrecen los granos. Dicha resistencia se expresa, por lo general, como estática y depende, básicamente, de los factores siguientes:

- a) Tipo de grano
- b) Contenido de impurezas y presencia de granos quebrados
- c) Relación diámetro-altura del sitio y
- d) Grado de compactación del producto.

Los granos más voluminosos, como el maíz y la soya, tienen espacios intergranulares más grandes y ofrecen menos resistencia, en tanto que los granos más pequeños, como el trigo, el arroz y el sorgo, ofrecen más resistencia.

La presencia de granos partidos y material fino aumenta la resistencia al flujo de aire. Además, dicho material tiende a concentrarse debajo del lugar de descarga, lo que provoca la mala distribución del aire entre la masa de granos y compromete el éxito del proceso. Con el objeto de minimizar el problema, se recomienda la buena limpieza de los granos al cargarlos en el silo.

La relación diámetro-altura del silo, influye de manera importante en la presión estática que el ventilador tendrá que proporcionar para abarcar toda la masa de granos. Cuanto mayor sea esa relación, con igual flujo de aire y capacidad del silo, menor será la presión estática que el ventilador tendrá que asegurar, pues

disminuyen, tanto la altura de la masa de granos que hay que abarcar como la velocidad del aire en los espacios intergranulares. Este hecho es interesante, pues reduce la potencia necesaria para accionar el ventilador, pero con el inconveniente de que aumenta el precio del silo, por el incremento de su base y del área de la plancha perforada. Es frecuente el uso de una relación diámetro-altura de 5.3. Respecto a la altura del silo se recomienda que no pase de 6 m, para no elevar demasiado la presión estática. La resistencia al flujo de aire, expresada en la presión estática que el ventilador tiene que vencer, depende del flujo de aire, expresado en  $\text{m}^3/\text{s}$   $\text{m}^3$ , y de la altura de la capa de granos. Los cuadros 4.7, 4.8, 4.9 y 4.10, entregan los valores de presión estática para el maíz, soya, trigo.

CUADRO 4.7

Presion estatica ( K Pa ) para la soya.

Altura de la capa de granos (m)	Flujo de aire ( $10^2 \text{ m}^3 / \text{s} / \text{m}^3$ )												
	0,63	0,94	1,25	1,56	1,88	2,50	3,13	3,75	4,38	5,00	5,63	6,25	
0,20	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,020	0,020	0,020	0,020
0,75	-	-	-	-	-	0,020	0,020	0,029	0,029	0,039	0,039	0,049	0,049
1,00	-	-	-	0,020	0,020	0,029	0,039	0,049	0,059	0,068	0,078	0,088	0,088
1,25	-	0,29	0,29	0,029	0,029	0,049	0,059	0,078	0,098	0,12	0,14	0,16	0,16
1,50	0,020	0,020	0,29	0,039	0,049	0,069	0,098	0,12	0,15	0,18	0,21	0,24	0,24
1,75	0,020	0,029	0,49	0,059	0,069	0,098	0,14	0,17	0,21	0,24	0,29	0,34	0,34
2,00	0,029	0,039	0,059	0,078	0,098	0,14	0,19	0,24	0,28	0,34	0,40	0,47	0,47
2,25	0,039	0,059	0,078	0,098	0,13	0,18	0,24	0,30	0,38	0,45	0,54	0,63	0,63
2,50	0,039	0,069	0,098	0,13	0,16	0,23	0,30	0,39	0,49	0,59	0,70	0,80	0,80
2,75	0,049	0,088	0,12	0,16	0,20	0,28	0,38	0,49	0,61	0,73	0,87	1,02	1,02
3,00	0,059	0,098	0,15	0,19	0,24	0,35	0,47	0,61	0,75	0,91	1,09	1,26	1,26
3,25	0,078	0,12	0,18	0,23	0,28	0,42	0,57	0,73	0,91	1,11	1,32	1,55	1,55
3,50	0,088	0,15	0,21	0,26	0,34	0,50	0,67	0,88	1,10	1,33	1,59	1,86	1,86
3,75	0,098	0,17	0,24	0,31	0,40	0,59	0,80	1,04	1,30	1,58	1,88	2,20	2,20
4,00	0,12	0,20	0,27	0,36	0,46	0,68	0,94	1,21	1,52	1,85	2,21	-	-
4,25	0,14	0,22	0,31	0,42	0,54	0,79	1,09	1,41	1,77	2,16	-	-	-
4,50	0,16	0,25	0,36	0,48	0,61	0,91	1,24	1,63	2,04	2,49	-	-	-
4,75	0,18	0,28	0,40	0,54	0,70	1,04	1,42	1,85	2,33	-	-	-	-
5,00	0,20	0,31	0,46	0,62	0,78	1,18	1,62	2,11	-	-	-	-	-
5,25	0,22	0,35	0,51	0,69	0,88	1,31	1,82	2,38	-	-	-	-	-
5,50	0,24	0,39	0,57	0,76	0,98	1,48	2,04	-	-	-	-	-	-
5,75	0,26	0,43	0,63	0,85	1,10	1,65	2,27	-	-	-	-	-	-
6,00	0,28	0,48	0,70	0,94	1,21	1,82	2,53	-	-	-	-	-	-

Referencia ( 2 ).

CUADRO 4.8

Presion estatica ( k Pa ) para el trigo.

Altura de la capa de granos (m)	Flujo de aire ( $10^2 \text{ m}^3 / \text{s} / \text{m}^3$ )												
	0,63	0,94	1,25	1,56	1,88	2,50	3,13	3,75	4,38	5,0	05,63	6,25	
0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,50	-	-	-	-	-	0,029	0,039	0,049	0,059	0,069	0,069	0,079	0,079
0,75	-	0,029	0,029	0,039	0,049	0,069	0,088	0,11	0,13	0,15	0,18	0,20	0,20
1,00	0,029	0,049	0,059	0,078	0,098	0,13	0,17	0,21	0,25	0,28	0,32	0,36	0,36
1,25	0,049	0,069	0,098	0,13	0,15	0,21	0,26	0,32	0,39	0,46	0,53	0,61	0,61
1,50	0,069	0,098	0,14	0,18	0,22	0,30	0,39	0,49	0,59	0,69	0,79	0,91	0,91
1,75	0,088	0,14	0,20	0,24	0,30	0,42	0,55	0,69	0,82	0,97	1,13	1,29	1,29
2,00	0,12	0,19	0,25	0,32	0,40	0,56	0,73	0,92	1,11	1,31	1,53	1,76	1,76
2,25	0,16	0,24	0,32	0,42	0,52	0,72	0,95	1,20	1,45	1,72	2,01	2,31	2,31
2,50	0,20	0,29	0,41	0,53	0,66	0,92	1,21	1,52	1,85	2,20	2,57	2,96	2,96
2,75	0,24	0,36	0,50	0,65	0,80	1,14	1,50	1,88	2,30	2,74	3,21	3,71	3,71
3,00	0,28	0,44	0,61	0,78	0,97	1,37	1,83	2,30	2,81	3,36	3,95	-	-
3,25	0,33	0,52	0,71	0,93	1,16	1,65	2,18	2,76	3,39	4,07	-	-	-
3,50	0,38	0,61	0,84	1,10	1,36	1,95	2,59	3,28	4,04	-	-	-	-
3,75	0,44	0,71	0,98	1,27	1,59	2,27	3,03	3,86	-	-	-	-	-
4,00	0,51	0,80	1,13	1,47	1,83	2,64	3,52	-	-	-	-	-	-
4,25	0,58	0,92	1,28	1,68	2,10	3,03	4,06	-	-	-	-	-	-
4,50	0,65	1,04	1,46	1,91	2,39	3,45	-	-	-	-	-	-	-
4,75	0,73	1,17	1,64	2,15	2,70	3,91	-	-	-	-	-	-	-
5,00	0,82	1,30	1,83	2,41	3,04	-	-	-	-	-	-	-	-
5,25	0,91	1,45	2,05	2,69	3,39	-	-	-	-	-	-	-	-
5,50	1,00	1,61	2,26	2,99	3,77	-	-	-	-	-	-	-	-
5,75	1,11	1,76	2,50	3,30	4,17	-	-	-	-	-	-	-	-
6,00	1,21	1,94	2,75	3,63	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Referencia ( 2 )

CUADRO 4.9

Presion estatica ( K Pa ) para el arroz.

Altura de la capa de granos (m)	Flujo de aire ( $10^2 \text{ m}^3 / \text{s} / \text{m}^3$ )											
	0,63	0,94	1,25	1,56	1,88	2,50	3,13	3,75	4,38	5,00	5,63	6,25
0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,50	-	-	-	-	-	-	-	0,029	0,029	0,039	0,039	0,049
0,75	-	-	-	-	0,029	0,039	0,049	0,059	0,069	0,078	0,098	0,11
1,00	-	-	-	0,039	0,049	0,069	0,088	0,11	0,13	0,15	0,18	0,20
1,25	0,029	0,039	0,049	0,069	0,078	0,11	0,15	0,18	0,22	0,24	0,28	0,32
1,50	0,039	0,059	0,078	0,098	0,12	0,17	0,22	0,26	0,31	0,37	0,43	0,49
1,75	0,049	0,078	0,11	0,14	0,17	0,23	0,29	0,36	0,44	0,52	0,61	0,69
2,00	0,069	0,098	0,14	0,18	0,22	0,30	0,39	0,49	0,60	0,71	0,81	0,94
2,25	0,088	0,13	0,18	0,23	0,28	0,39	0,51	0,64	0,77	0,92	1,07	1,23
2,50	0,11	0,17	0,23	0,28	0,35	0,49	0,65	0,81	0,99	1,18	1,36	1,57
2,75	0,13	0,20	0,27	0,35	0,43	0,61	0,80	1,01	1,22	1,46	1,70	1,97
3,00	0,16	0,24	0,32	0,42	0,52	0,73	0,97	1,22	1,50	1,78	2,09	2,42
3,25	0,18	0,28	0,39	0,50	0,63	0,88	1,17	1,47	1,80	2,16	2,53	2,92
3,50	0,21	0,33	0,45	0,59	0,73	1,04	1,38	1,74	2,15	2,57	3,01	3,49
3,75	0,24	0,38	0,53	0,69	0,85	1,21	1,62	2,05	2,52	3,02	3,55	-
4,00	0,27	0,44	0,61	0,79	0,99	1,41	1,87	2,38	2,93	3,52	-	-
4,25	0,31	0,50	0,70	0,90	1,13	1,62	2,16	2,74	3,38	-	-	-
4,50	0,35	0,56	0,78	1,03	1,28	1,84	2,46	2,94	-	-	-	-
4,75	0,40	0,63	0,88	1,16	1,45	2,09	2,79	3,13	-	-	-	-
5,00	0,44	0,71	0,99	1,29	1,63	2,34	3,14	3,57	-	-	-	-
5,25	0,49	0,78	1,10	1,44	1,81	2,63	3,53	-	-	-	-	-
5,50	0,54	0,86	1,21	1,60	2,01	2,92	-	-	-	-	-	-
5,75	0,60	0,95	1,34	1,77	2,22	2,23	-	-	-	-	-	-
6,00	0,66	1,05	1,49	1,95	2,45	3,58	-	-	-	-	-	-

Referencia ( 2 ).

CUADRO 4.10

Presion estatica ( K Pa ) para el maiz .

Altura de la capa de granos (m)	Flujo de aire ( $10^2 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}^3$ )												
	0,63	0,94	1,25	1,56	1,88	2,50	3,13	3,75	4,38	5,00	5,63	6,25	
0,25	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,75	-	-	-	-	-	-	-	0,29	0,039	0,39	0,049	0,059	-
1,00	-	-	-	-	-	0,029	0,049	0,059	0,069	0,078	0,098	0,11	-
1,25	-	-	-	0,029	0,39	0,059	0,078	0,098	0,12	0,14	0,17	0,20	-
1,50	-	0,029	0,039	0,049	0,059	0,088	0,12	0,15	0,18	0,22	0,25	0,31	-
1,75	-	0,039	0,049	0,069	0,088	0,12	0,16	0,21	0,26	0,31	0,37	0,44	-
2,00	0,029	0,049	0,069	0,088	0,12	0,17	0,23	0,29	0,36	0,44	0,52	0,61	-
2,25	0,039	0,059	0,088	0,12	0,16	0,22	0,29	0,38	0,48	0,59	0,70	0,82	-
2,50	0,049	0,078	0,11	0,15	0,19	0,28	0,28	0,50	0,63	0,76	0,91	1,07	-
2,75	0,059	0,098	0,14	0,19	0,24	0,35	0,49	0,64	0,79	0,97	1,16	1,36	-
3,00	0,069	0,12	0,17	0,23	0,29	0,43	0,60	0,78	0,99	1,20	1,45	1,70	-
3,25	0,088	0,14	0,21	0,27	0,35	0,53	0,73	0,96	1,21	1,48	1,77	2,09	-
3,50	0,098	0,17	0,24	0,32	0,42	0,64	0,88	1,16	1,45	1,78	2,15	2,53	-
3,75	0,12	0,20	0,28	0,38	0,50	0,75	1,04	1,37	1,73	2,13	2,56	-	-
4,00	0,14	0,23	0,33	0,45	0,58	0,88	1,22	1,61	2,04	2,51	-	-	-
4,25	0,16	0,26	0,38	0,52	0,68	1,02	1,42	1,88	2,38	-	-	-	-
4,50	0,18	0,29	0,44	0,60	0,78	1,18	1,65	2,17	-	-	-	-	-
4,75	0,20	0,34	0,50	0,68	0,88	1,34	1,88	2,49	-	-	-	-	-
5,00	0,23	0,38	0,56	0,77	1,00	1,53	2,15	2,88	-	-	-	-	-
5,25	0,25	0,42	0,63	0,86	1,13	1,72	2,42	-	-	-	-	-	-
5,50	0,27	0,48	0,71	0,97	1,26	1,94	-	-	-	-	-	-	-
5,75	0,30	0,53	0,78	1,08	1,41	2,17	-	-	-	-	-	-	-
6,00	0,34	0,59	0,87	1,20	1,57	2,42	-	-	-	-	-	-	-

Referencia ( 2 ).

### 4.3.3 VENTILADORES

Los ventiladores son dispositivos para mover el aire, que se usan en diversos procedimientos agrícolas, entre ellos el secado a bajas temperaturas. Los costos de instalación y funcionamiento de dichos dispositivos se tornan cada día más onerosos. Es necesario, pues, que el proyectista de sistemas de secado a bajas temperaturas elija y aplique el mejor equipo para mover el aire, teniendo en cuenta los factores técnicos y económicos correspondientes.

El ventilador sopla o aspira aire en forma continua, por acción aerodinámica, transformando energía mecánica en cinética para mover una cantidad de aire, a través de un sistema conectando a él, y generar presión estática suficiente para vencer las resistencias al movimiento del aire.

Los ventiladores se clasifican en dos categorías generales:

- a) Ventiladores axiales
- b) Ventiladores centrífugos.

En los ventiladores axiales el escurrimiento del aire, es paralelo al eje de rotación, al que están fijadas las aspas. Este eje es, generalmente, el mismo eje del motor de impulsión. El conjunto va montado al interior de un cilindro que sirve de alojamiento.

Los ventiladores del tipo aspas axiales están previstos de aletas montadas en el cilindro, que sirven de alojamiento para el conjunto motor-aspas y cuyo objeto es rectificar el flujo de aire y reducir las pérdidas debidas a la turbulencia del aire que

Los ventiladores del tipo de tubo axial, son parecidos a los de tipo de aspas axiales, salvo que no tienen aletas y son menos eficientes.

Los ventiladores centrífugos se componen de un rotor que gira al interior de una carcasa en espiral. El aire entra al rotor axialmente y luego el ventilador lo mueve, del centro a la periferia, por acción de la fuerza centrífuga. La diferenciación primaria entre tipos de ventiladores centrífugos están en el formato de las láminas. Esta característica es la que define, esencialmente la relación volumen: presión y la eficiencia de un ventilador centrífugo.

Los ventiladores centrífugos que se ocupan en el secado a bajas temperaturas son, generalmente, del tipo de aspas vueltas hacia atrás.

Los ventiladores axiales están destinados a aplicaciones en lugares donde las presiones estáticas que hay que vencer son bajas y los flujos son elevados; los centrífugos sirven para las presiones estáticas elevadas.

El calentamiento del aire por los ventiladores aumenta el potencial de secado del aire. Los ventiladores axiales calientan más el aire porque se aprovecha la energía que libera el motor eléctrico.

En la selección de un ventilador, el proyectista del sistema de secado a bajas temperaturas debe trabajar junto con el ingeniero de la empresa proveedora de ventiladores, para encontrar la solución adecuada.

El proyectista debe suministrar las exigencias aerodinámicas del sistema, las

condiciones del aire, informaciones sobre el ciclo de operación y datos a cerca de la configuración del ventilador.

A continuación se presenta una lista de los parámetros esenciales y los factores que hay que definir y considerar para que se pueda hacer la elección apropiada de un ventilador.

a) Exigencias Aerodinámicas

- Flujo de aire, en volumen, masa.
- Presión total o estática a la entrada o a la salida del ventilador.

b) Exigencias del proyecto y ciclo de operaciones.

- Altura del local
- Temperatura media y máxima del aire.
- Tasa máxima de variación (aumento y disminución) de la temperatura.
- Precisar si las exigencias aerodinámicas son constantes o variables.
- Régimen de operación del ventilador.

c) Condiciones del Aire

- Precisar si el aire que se va a usar es limpio o está contaminado con partículas.
- Si se trata de aire contaminado, determinar la cantidad y tamaño de las partículas presentes.
- Si se trata de aire contaminado por agentes corrosivos, determinar la cantidad y el tipo.

### 4.3.3.i) RENDIMIENTO Y POTENCIAS

La potencia real transmitida al fluido y la altura real desarrollado defieren de estado ideal como un efecto de varias pérdidas. Estas pérdidas pueden clasificarse de acuerdo a que ya sea que afecten la altura, potencia, ó capacidad.

La llamada eficiencia hidráulica ( $n_h$ ) es la razón de la altura real o manométrica ( $H_T$ ), a la ideal ( $H_i$ ) si se incluyen efectos de pérdidas volumétricas. Si sólo se consideran las alturas, sin tomar aún en cuenta ningún efecto de pérdidas volumétricas, se tiene:

$$n_H = \frac{H_T}{H_i} \quad \text{EC. (4.5)}$$

La eficiencia volumétrica ( $n_v$ ) es la razón del flujo neto de volumen manejado por la maquina ( $Q$ ) al flujo de volumen manejado por el impulsor ( $Q_t$ ).

$$n_v = \frac{Q}{Q_t} \quad \text{EC. (4.6)}$$

El volumen de dispersión ( $Q_t - Q$ ) pasa a través de los pequeños espacios entre la parte girante y la estacionaria, recirculando a través del impulsor. La eficiencia volumétrica es una medida de la perfección en el diseño de tolerancias.

La eficiencia mecánica ( $n_m$ ) es la razón de la potencia mecánica interna o sea la potencia suministrada por el impulsor ( $P$ ), a la potencia de accionamiento requerida ( $P_a$ ) (potencial al freno).

$$\eta_m = \frac{P}{P_a} \quad \text{EC. (4.7)}$$

Las pérdidas mecánicas ( $P_a - P$ ) incluye la potencia perdida debido a fricción en los prensaestopas, en cojinetes y rozamiento de disco.

La eficiencia total es la razón de la potencia útil ( $P_u$ ) (incremento de potencia que experimenta el aire en el ventilador) a la potencia de accionamiento ( $P_a$ ).

$$\eta_t = \frac{P_u}{P_a} = \eta_N \eta_v \eta_M \quad (4.8)$$

y se cumple además  $\eta_N = \eta_H \eta_v$  y  $\eta_t = \eta_h \eta_{mec}$

La potencia útil se encuentra según:

$$P_H = \frac{Q_v H_r}{75} \quad (\text{CV}) \quad (\text{EC. 4.9})$$

75

#### 4.3.3.ii) CARACTERÍSTICAS DE LOS VENTILADORES

Las características de operación de un ventilador son descritas por gráficas. El método convencional de representar el comportamiento de un ventilador es mediante una serie de curvas, con capacidad como abscisa y cualquier otra variable como ordenada.

Las características de un ventilador a velocidad constante son ilustradas en la figura 4.2.

Estas características son para un ventilador de tamaño y tipo particular que maneja aire a una densidad dada y a unas revoluciones determinadas. El ventilador puede operar una capacidad desde cero hasta un máximo mostrado, pero cuando es acoplado a un sistema, el ventilador operará únicamente a las condiciones dadas por la intersección de la curva característica del sistema con las características de presión del ventilador. Para el caso ilustrado, el ventilador operará a un caudal de  $Q = 12.886 \text{ m}^3/\text{seg}$  ( $27300 \text{ pie}^3/\text{min}$ ), a una presión total de  $P_t = 846.9$ ,  $P_a$  (3.4 Plg.  $\text{H}_2\text{O}$ ), a una presión estática de  $P_s = 747.3$  (3 plg.  $\text{H}_2\text{O}$ ), requiriendo una potencia de  $13646.31 \text{ W}$  (18.3HP) a la velocidad y densidad para la cual las curvas fueron trazadas. La eficiencia estática en este punto de operación es de 73% y la eficiencia total es de 80%, si la resistencia del sistema fuera disminuida, la capacidad ( $\text{m}^3/\text{seg}$ ) del ventilador aumentaría, definiéndose el punto de operación por la intersección de la nueva curva característica del sistema con la curva de presión. Por el contrario, si la característica del sistema aumenta (mayor resistencia), la capacidad del ventilador disminuye. La capacidad puede disminuirse colocando un regulador de tiro en la salida.

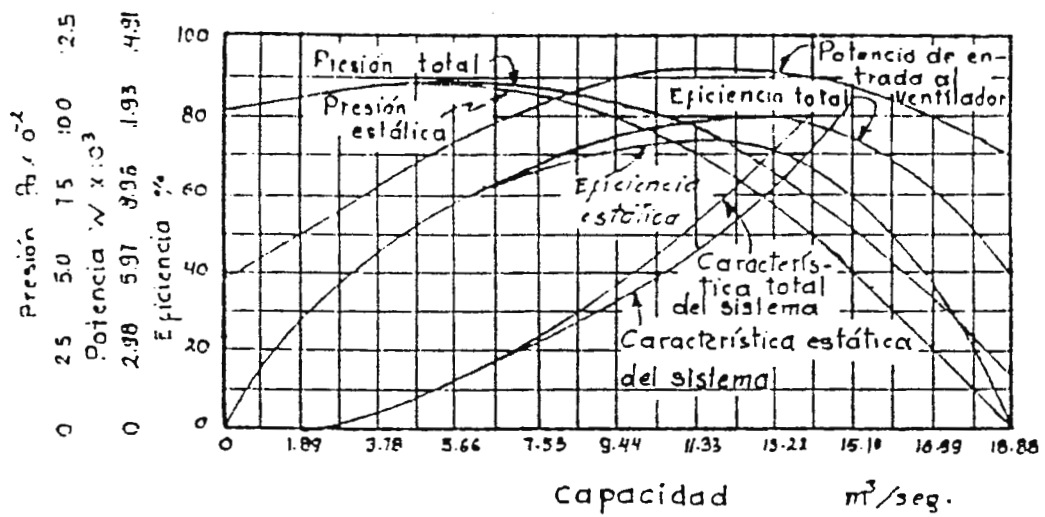


Fig. 4.2 Curvas características de un ventilador a velocidad constante.

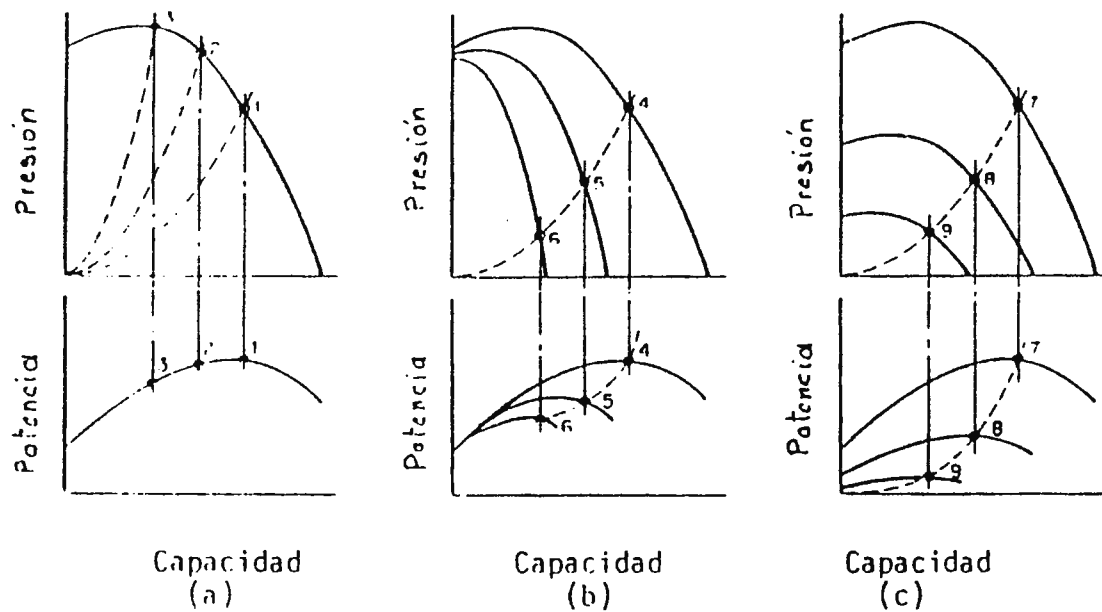


Fig. 4.3 Características de un ventilador con: a) regulador de tiro en la salida, b) aleta de control en la entrada, c) control de velocidad

La figura 4.3 ilustra las características de un ventilador con diversos dispositivos de control: regulador de tiro en la salida, aleta de control de flujo en la entrada y un control de velocidad de giro. Estas características particulares son para un ventilador centrífugo con aletas curvadas hacia atrás, pero el principio es aplicable a todos los ventiladores. Un regulador de tiro en la salida no afecta al aire que entra al ventilador y el resultado es similar al de adicionar resistencia al sistema, produciéndose un nuevo punto de intersección entre la característica del sistema y la del ventilador, para distintas posiciones del control. El punto 1 corresponde al control abierto y los puntos 2 y 3 cuando el control es cerrado progresivamente. Nótese que una reducción de potencia es acompañada por una reducción de capacidad. Las aletas de control en la entrada producen remolinos, los cuales reducen la capacidad del ventilador. El punto 4 corresponde al de las aletas de control totalmente abiertos, que corresponden al punto 1 del primer caso.

Los puntos 5 y 6 son para condiciones de cierre progresivo. Se observa que para pequeñas capacidades, la reducción de potencia es mayor en el caso de alabes en la entrada que para alabes de control en la salida.

El método más eficiente para el control de capacidad es el de control de velocidad. El punto 7 es para velocidad nominal, los puntos 8 y 9, revoluciones progresivamente menores. Nótese como baja el consumo de potencia a medida que lo hace el flujo; la disminución de potencia es más marcada que para los dos casos anteriores. El método de control de velocidad también tiene sus ventajas por el bajo nivel de sonido que se produce, además por los bajos efectos erosivos sin embargo, el costo inicial puede resultar alto.

### 4.3.3.iii) LEYES DE LOS VENTILADORES

Las leyes de los ventiladores están basadas en la experiencia la cual garantiza que los ventiladores de una serie de homóloga tienen curvas de comportamiento homólogas (se entiende por ventiladores homólogos cuando éstos tienen los mismos ángulos de alabe y las mismas proporciones geométricas). Dos ventiladores homólogos cuyos puntos de operación están situados similarmente, tienen eficiencias iguales y las otras variables son relacionadas de acuerdo a las leyes de los ventiladores. Si el tamaño y velocidad son consideradas como variables independientes las leyes de los ventiladores son (10).

$$N_{tc} = n_{tb}$$

$$Q_c = Q_b (D_c/D_b)^3 (N_c/N_b)$$

$$P_{tc} = P_{tb} (D_c/D_b)^2 (N_c/N_b)^2 (P_c/P_b)$$

$$P_c = P_b (D_c/D_b)^5 (N_c/N_b)^3 (P_c/P_b)$$

$$L_{wc} = L_{wb} + 70 \text{ Log } (D_c/D_b) + 50 \text{ Log } (N_c/N_b) + 20 \text{ Log } (P_c/P_b)$$

Siendo:

$D_c$  = Diámetro calculado

$D_b$  = Diámetro base

$N_c$  = Revoluciones por minuto calculadas

$N_b$  = Revoluciones por minuto base

$P_b$  = Densidad base

$P_c$  = Densidad calculada

$L_w$  = Nivel de potencia de sonido (c: Calculada, b: base)

Los demás símbolos representan lo acostumbrado:

El ventilador calculado deberá tener el mismo punto operación del ventilador base. Cuando existe duda, lo mejor será seleccionar el ventilador en lugar de utilizar las leyes de los ventiladores. El diseñador utiliza las leyes de los ventiladores en varias formas, algunas de la más usuales, además de las mencionadas, se derivan de considerar la capacidad y presión total como variable independientes. Esto conduce al diámetro específico, velocidad específico, y nivel de potencia de sonido específica (10).

$$D_s = d (P_t / P)^{1/4} / Q^{1/2} \quad (\text{EC. 4.10})$$

$$N_s = NQ^{1/2} / (P_t/P)^{3/4} \quad (\text{EC. 4.11})$$

$$L_{ws} = L_w - 10 \text{ Log } Q - 20 \text{ Log } P_t \quad (\text{EC. 412})$$

$D_s$ ,  $N_s$  y  $L_{ws}$  son diámetro, velocidad y nivel de potencia de sonidos de ventiladores homólogos.

#### **4.3.3.iv) SELECCION DE VENTILADORES**

En la mayoría de aplicaciones de ventiladores no es necesario el diseño completo del ventilador para los requerimientos específicos de trabajo. Hay diseños estándar disponibles en cada uno de los tipos aerodinámicos. Numerosos tamaños son ofrecidos en arreglos y tipos de construcción según conveniencia para un amplio rango de aplicaciones. La selección de ventiladores entonces trata de escoger el mejor tamaño y tipo de los disponibles.

La selección de ventiladores se inicia con la especificación de requerimientos y extremos de trabajo, con la evolución de posibles alternativas. De los muchos ventiladores capaces de cumplir requerimientos de caudal y presión, la mejor selección será aquella que realice el mismo trabajo con el mínimo costo posible. Costo inicial, costo de operación y costos de mantenimiento, deberán ser todos considerados.

El tipo de servicio para el cual el ventilador es destinado deberá especificarse. En algunas ocasiones el ducto de salida deberá especificarse como también el tamaño de las conexiones al ventilador.

La capacidad del ventilador deberá especificarse. Debido a la naturaleza de la aplicación, el diseñador puede encontrar conveniente calcular la capacidad como una razón de flujo de peso. La capacidad de un ventilador es usualmente expresada como una razón de flujo de volumen tal como m<sup>3</sup>/seg, pie<sup>3</sup>/min, etc. a las condiciones de entrada. Esto significa que para determinar la capacidad apropiada del ventilador en m<sup>3</sup>/seg, deberá dividirse la razón de flujo de peso en Kg/Seg, por la densidad en la entrada en Kg/m<sup>3</sup>.

$$[ \text{m}^3/\text{seg} ] = [ \frac{\text{Kg/Seg}}{\text{Kg/m}^3} ] = [ \text{m}^3/\text{seg} ]$$

$$\text{o bien: } [\text{CFM}] = \frac{[\text{lb/min}]}{1\text{b/pe}^3}$$

Si el control de flujo ajustable está involucrado, la capacidad mínima y algunas intermedias para las cuales los requerimientos de potencia han sido evaluados, deberán ser especificados.

Los requerimientos de presión para cada capacidad deberá especificarse. El ventilador deberá entregar suficiente presión para:

1. Acelerar el aire desde la velocidad de entrada hasta aquella requerida en la salida del sistema.
  2. Para cubrir alguna diferencia de presión entre la entrada y salida.
  3. Para cubrir las pérdidas por rozamiento, desviaciones, etc., a través del sistema.
- Si el sistema toma aire de la atmósfera o de un plenum, la entrada al sistema, aguas arriba de la boca de entrada, deberá considerarse como punto de referencia. La salida es el plano que contiene la boca de descarga a la atmósfera.

Puede ser especificada ya sea la presión total del ventilador o la presión estática.

La presión total del ventilador es la diferencia entre la presión total en la salida del ventilador (definida como punto 2) y la presión total en la entrada (definida como punto 1), así:

$$P_t = P_{t_2} - P_{t_1} \quad (\text{EC. 4.13})$$

y 
$$P_s = P_{t_2} - P_{t_1} - P_{v_2} \quad (\text{EC. 4.14})$$

Pero 
$$P_{s_2} = P_{t_2} - P_{v_2} \quad (\text{EC. 4.15})$$

Luego 
$$P_s = P_{s_2} - P_{t_1} \quad (\text{EC. 4.16})$$

Donde:

$P_t$  : Presión total del ventilador.

$P_{t_2}$  : Presión total en la salida del ventilador.

$P_{t_1}$  : Presión total en la entrada del ventilador.

$P_s$  : Presión estática del ventilador.

$P_{s_2}$  : Presión estática en la salida del ventilador.

$P_{v_2}$  : Presión de velocidad en la salida del ventilador.

Denotando por el subíndice “e” a las condiciones de presión en la entrada del sistema y por “X” la salida, se tiene que:

$$P_{t1} = P_{se} + P_{ve} + AP_{te-1} \text{ (EC.4.17)}$$

$$P_{t2} = P_{sx} + P_{vx} + Ap_{t2-x} \text{ (EC.4.18)}$$

Combinando las ecuaciones (4.13) (4.17) (4.18), se tiene:

$$P_t = Ap_{te-x} + Ap_{ve-x} + Ap_{se-x} \text{ (EC. 4.19)}$$

Donde:

$Ap_{te-1}$  : Caída de presión total en el tubo de succión

$Ap_{t2-x}$  : Caída de presión total desde la salida del ventilador hasta la salida del sistema.

$Ap_{te-x}$  : Caída de presión total desde la entrada al sistema hasta la salida del mismo.

$Ap_{ve-x}$  : Caída de presión de velocidad desde la entrada al sistema hasta la salida del mismo.

$Ap_{se-x}$  : Caída de presión estática, desde la entrada al sistema hasta la salida del mismo.

La ecuación 4.19 nos muestra la presión total del ventilador en función de las pérdidas por rozamiento, desviaciones, etc. ( $Ap_{te-x}$ ), las pérdidas por el cambio de

velocidad (aceleración) desde la entrada hasta la salida del sistema ( $Ap_{ve-x}$ ), y la diferencia de presiones estáticas ( $Ap_{se-x}$ ).

En la mayoría de aplicaciones, donde la entrada del sistema es a las condiciones atmosféricas, al igual que la salida del mismo, los valores de presión estática en la entrada y salida del sistema son cero (tomando como referencia de presión la atmosférica). La velocidad de aire en la entrada, cuando es succionado del ambiente, también puede considerada como cero, por lo que la carga de presión de velocidad en la entrada ( $P_{ve}$ ) es cero, la ecuación 4.19, se simplifica.

$$P_t = Ap_{te-x} + P_{vx} \text{ (EC. 4.20)}$$

Bajo las mismas condiciones se puede establecer que:

$$P_s = Ap_{te-x} + P_{vx} - P_{vx} - P_{v2} \text{ (EC. 4.21)}$$

Si el ventilador no tiene ducto de descarga o si la sección de salida del ventilador es igual a la del sistema, se cumple que  $P_{v2}$  es igual a  $P_{vx}$  y la ecuación 4.21 toma la forma:

$$P_s = Ap_{te-x} \text{ (EC. 4.22)}$$

La ecuación (4.22) no debe usarse si existe una apreciable diferencia entre  $P_{vx}$  y  $P_{v2}$ .

Las diferencias de presión entre la entrada y salida, como la obtenida por las ecuaciones 4.17 y 4.18, deberán ser especificadas, puesto que éstas harán variar la densidad en la entrada y por ende, el comportamiento del ventilador. Un adecuado

margen de seguridad deberá incluirse en las especificaciones de presión y capacidad.

La suma de las pérdidas de presión total a través del sistema deberá incluirse una tolerancia por alguna ampliación o accesorios requeridos en la conexión del ventilador al sistema; esta cantidad podrá despreciarse siempre que el tamaño de la boca del ventilador no defiera grandemente del tamaño del elemento de conexión con el ducto de trabajo.

El comportamiento de un ventilador es una función de la densidad del aire en la entrada la densidad en la entrada no únicamente determina el caudal de aire, sino que también, la presión que el ventilador desarrolla.

Como ejemplo; en las siguientes tablas se resumen las principales dimensiones de algunos tipos de ventiladores, fabricados por la compañía Buffalo Forge, Ver figura 4.4 y 4.5 para selección del ventilador según su aplicación ver tabla No. 4.2

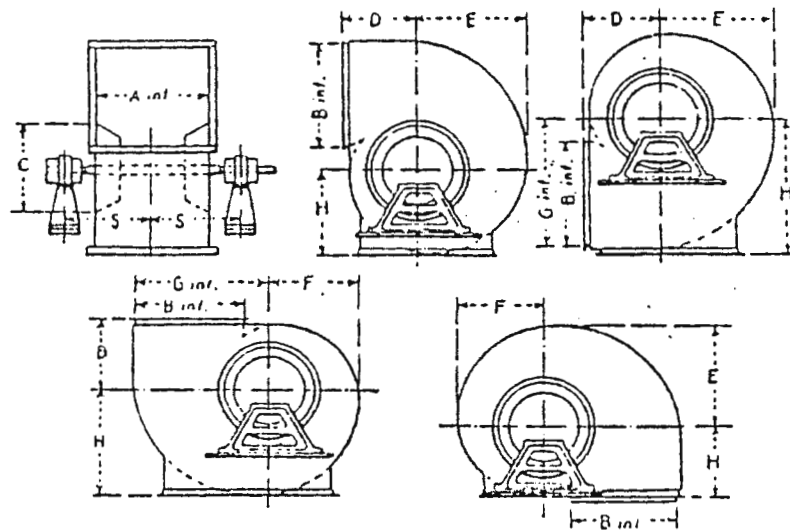


Fig. 4.4

Ventiladores de tiro forzado "Buffalo Forge", de doble ancho y doble admisión.

Dimensiones de los ventiladores supertipo "Buffalo" de doble admisión para tiro forzado, serie SCLD

N.º de ventilador	Dimensiones en milímetros											
	A	B	C	D	E	F	G	Boca vertic. arriba H	Boca vertic. abajo H	Boca horiz. arriba H	Boca horiz. abajo H	S
5	218	673	530	476	645	537	737	559	838	660	444	505
5 1/2	278	727	581	514	702	584	806	597	914	724	483	597
6	348	794	635	556	762	635	883	648	901	775	521	648
6 1/2	418	860	680	597	822	680	956	698	1007	838	553	680
7	497	927	740	635	883	737	1029	740	1143	902	597	718
7 1/2	557	994	794	679	943	784	1102	800	1219	965	648	762
8	630	1060	848	724	1016	848	1175	864	1295	1029	686	800
8 1/2	700	1124	902	762	1080	809	1248	914	1350	1002	724	864
9	770	1191	952	806	1137	940	1321	965	1435	1156	762	908
10	840	1254	1057	845	1204	1054	1470	1007	1587	1283	804	978
11	913	1324	1105	878	1284	1153	1616	1168	1751	1397	840	1080
12	995	1387	1200	907	1405	1251	1705	1270	1905	1524	1020	1187
13	1075	1454	1270	940	1532	1350	1911	1372	2057	1651	1105	1257
14	1175	1524	1383	972	1753	1457	2057	1473	2197	1765	1194	1321
15	1271	1602	1480	1014	1873	1550	2207	1575	2340	1892	1270	1407

Referencia ( 4 )

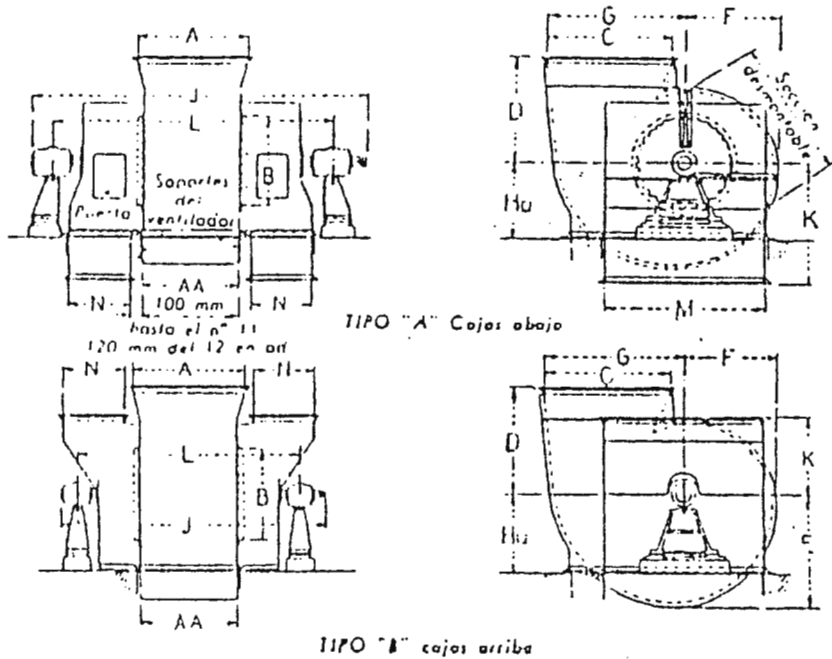


Fig 4.5

Dimensiones de los ventiladores "Buffalo Forge" supertipo de doble entrada, para tiro inducido con cajas de admisión.

Dimensiones de los ventiladores "Buffalo Forge" para tiro inducido. Series SCLD y SHLD

N° del ventilador	Dimensiones en milímetros																
	Tipo A									Tipo II							
	A	AA	B	C	D	E	F	G	H	J	K	L	J	K	L	M	N
5	673	575	530	718	651	686	537	791	737	2032	1041	1549	1905	571	1423	952	321
6	794	676	636	848	759	801	635	937	851	2337	1168	1803	2083	648	1600	1130	381
7	927	791	720	987	879	940	737	1089	991	2692	1346	2063	2515	737	1905	1321	444
8	1060	902	832	1130	997	1054	848	1248	1105	2921	1448	2341	2565	813	2032	1505	508
9	1191	1010	952	1270	1114	1181	946	1403	1232	3200	1575	2591	2921	902	2311	1695	571
10	1324	1130	1041	1410	1245	1264	1054	1556	1389	3658	1270	3048	3099	991	2480	1860	635
11	1454	1245	1150	1553	1416	1384	1153	1718	1501	4089	1372	3327	3327	1067	2667	2070	625
12	1587	1353	1270	1695	1480	1505	1251	1880	1667	4360	1524	3607	3454	1168	2845	2201	702
13	1721	1467	1356	1835	1600	1632	1350	2022	1868	4648	1626	3877	3658	1245	3048	2451	825
14	1854	1581	1464	1975	1715	1753	1457	2181	2045	4953	1702	4115	3861	1346	3251	2642	884
15	1981	1705	1581	2121	1835	1873	1550	2346	2222	5238	1820	4420	4143	1423	3481	2810	952

Referencia ( 4 )

TABLA 4.2

Aplicación	Presión en a. a.	Volumen en m. <sup>3</sup> por metro	Energía en H. P.	Tipo de ventilador
Secadero de plataforma . . . . .	1,11-5,08	810-1.608	2-4	Corriente axial directa. Baja presión centrífuga.
De corriente continua . . . . .	3,87-0,36	1.116-2.830		Corriente axial directa. Baja presión centrífuga.
Secaderos de bandejas . . . . .	2,51-7,03	910-1.608	3-8	Corriente axial directa. Baja presión centrífuga.
Secadero de capas profundas (por partículas) . . . . .	7,02-15,34	600-2.830	2-8	Corriente axial doble: Presión centrífuga media.
Silos ventilados . . . . .	10,16-20,33	810-2.830	5-15	Corriente axial doble: Presión centrífuga media.
Pequeños transportadores neumáticos . . . . .	15,21-30,48	283-600	3-5	Presión centrífuga alta.
Grandes transportadores neumáticos . . . . .	20,32-45,73	600-1.132	5-15	Presión centrífuga alta.

Referencia ( 7 ).

#### 4.3.4 METODO PARA DISEÑO DE DUCTOS

En cualquier sistema de ventilación con circulación mecánica, el ventilador ó ventiladores deben tener la capacidad adecuada en cuanto a cantidad de aire y una presión estática igual o ligeramente mayor que la resistencia total que se tiene en el sistema de ductos. El tamaño de los ductos se escoge para las velocidades del aire que puede utilizarse sin causar ruidos molestos y pérdidas excesivas de presión.

Los ductos grandes reducen las pérdidas de fricción, pero la inversión y el mayor espacio deben compensar el ahorro de potencia del ventilador. Tiene que hacerse un balance económico al hacer el diseño de las instalaciones. En general debe hacerse un trazado de ductos tan directo como sea posible, evitar vueltas muy agudas y no hay que tener ductos muy desproporcionados.

Para un ducto rectangular es buena práctica que la relación del lado mayor al menor sea hasta de 6 a 1 y esta relación nunca debe exceder de 10 a 1.

a) Etapa para diseño de ductos.

1. Hacer un trazado del sistema más conveniente, colocando los diferentes ductos para obtener una distribución adecuada y para facilitar la construcción de los mismos.
2. De acuerdo con la exigencia de diseño calcule las necesidades de aire (pies cúbicos por minuto) para cada salida de ducto.
3. Determine el tamaño de los ductos, empleando las velocidades apropiadas, o caídas de presión para suministrar la cantidad necesaria de aire.
4. Calcular el tamaño de cada ducto por el del método siguiente:

El ducto es dimensionado de tal manera que las pérdidas de presión por pie de longitud sean constantes en lo posible que las resistencias en los ductos ramales sean esencialmente iguales, a menos de que se tenga mucha diferencia en sus longitudes. Cuando se aplica este método se acostumbra determinar la caída de presión de acuerdo con la velocidad deseada en el ducto principal en la parte más alejada del ventilador. Los ductos ramales deben tener compuerta para su control de flujo.

5. Determinar de acuerdo con los métodos descritos en el punto 4, el circuito que tenga la mayor resistencia por fricción. Al determinar dicho circuito no necesariamente el de mayor longitud será el que tenga mayores pérdidas. La resistencia máxima determina la presión estática que el ventilador debe entregar al aire a través de los ductos. Note que el ventilador debe suministrar una cantidad mayor de aire que la indicada en el punto 2, a fin de considerar las fugas que se tengan en el sistema de ductos.

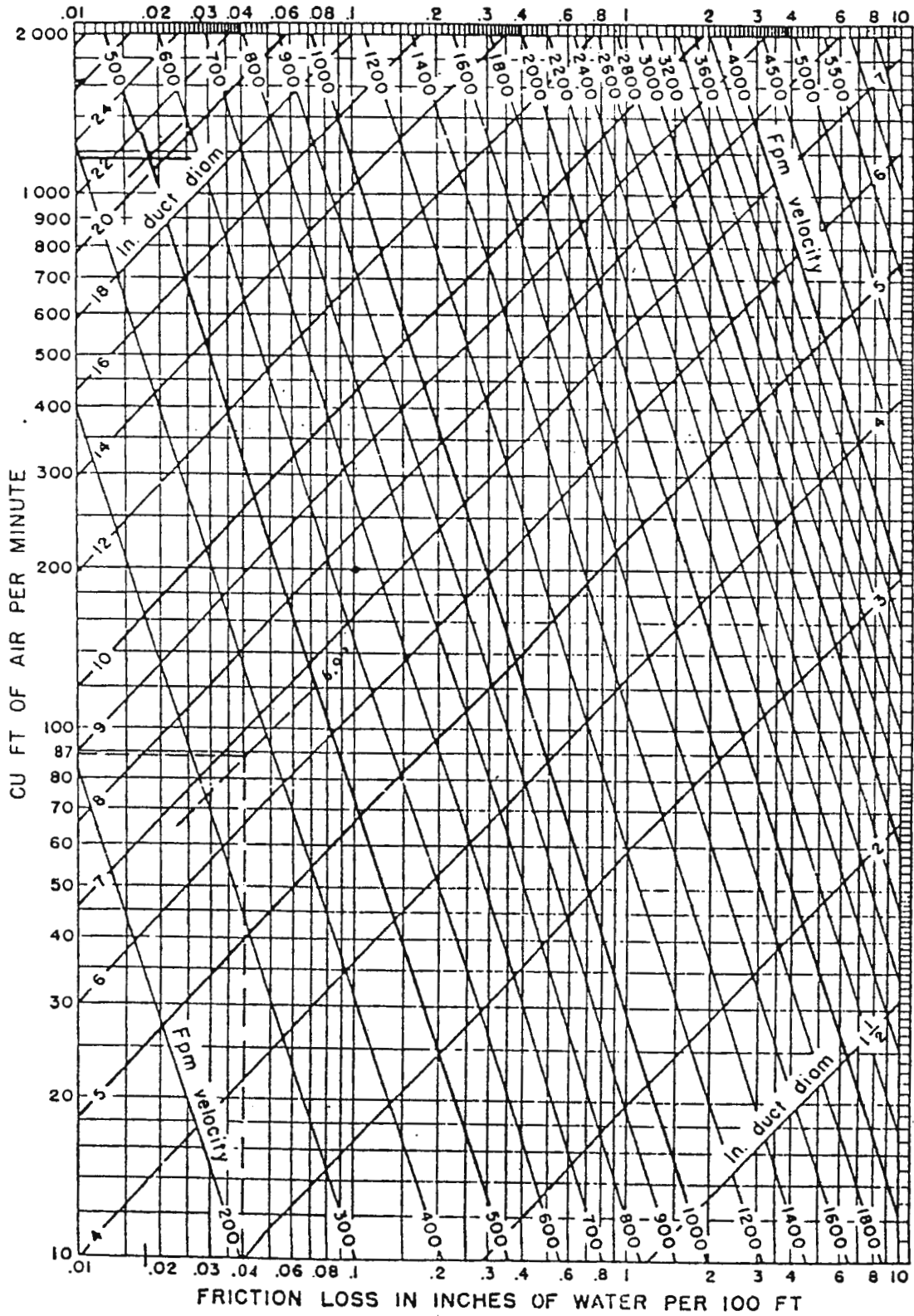
#### **4.3.4.i) PERDIDAS EN DUCTOS**

Los resultados de pruebas por fricción efectuadas por la ASHRAE respecto a pérdidas por fricción de aire fluyendo en ductos galvanizados están trazados en la fig. 4.6.

Las figuras 4.7, 4.8 y 4.9 ilustran muchos componentes usados así como su longitud equivalente, expresada en pies de ductos rectos con la misma resistencia al flujo de aire.

Cuando se diseña un sistema de ductos, ninguna sección de tamaño constante debe exceder los 24 pies cuando la longitud total del ducto de suministro principal sobre pasa los 24 pies, se recomienda que el tamaño del ducto sea reducido cada 15 ó 20 pies.

COMPORTAMIENTO DEL FLUJO DE AIRE EN DUCTOS CIRCULARES.



(Based on Standard Air of 0.075 lb per cu ft density flowing through average, clean, round, galvanized metal ducts having approximately 40 joints per 100 ft.) Caution: Do not extrapolate below chart.

Fig. 4.6

Referencia ( 5 ).

DERIVACIONES PARA DUCTOS REDONDOS

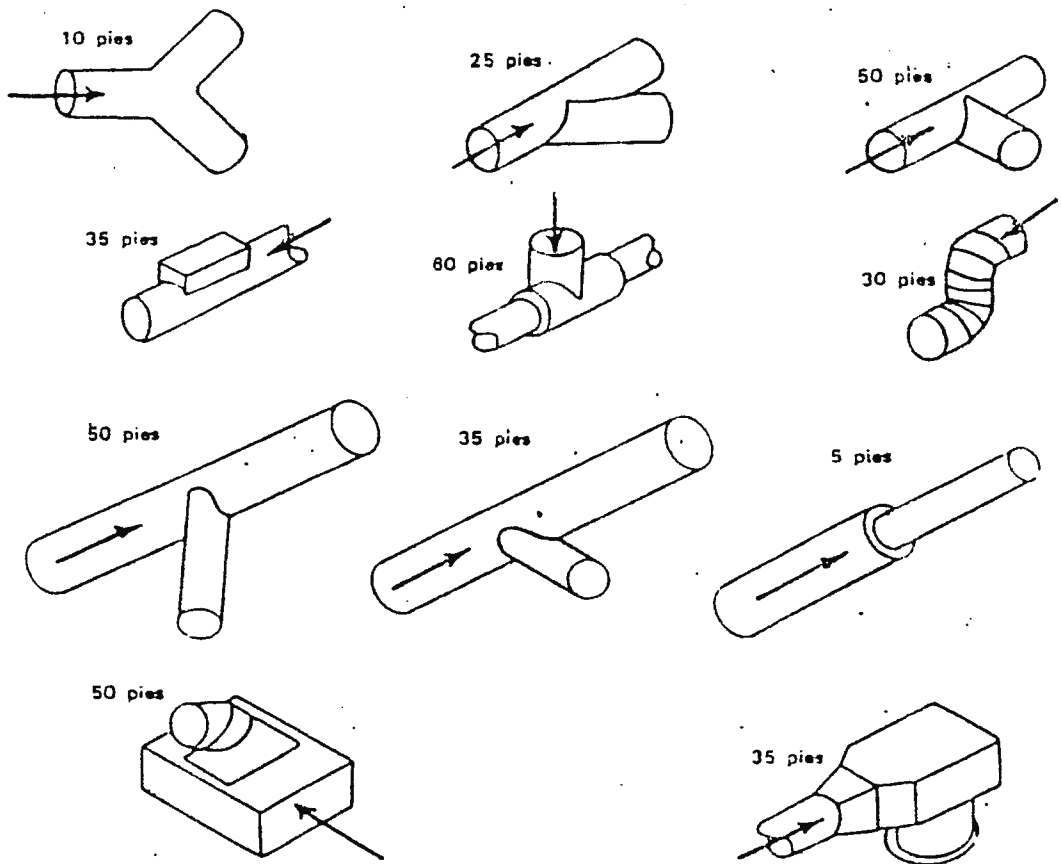


Fig. 4.7

Referencia ( 6 )

ANGULOS Y CODOS PARA DUCTOS INDIVIDUALES Y RAMALES

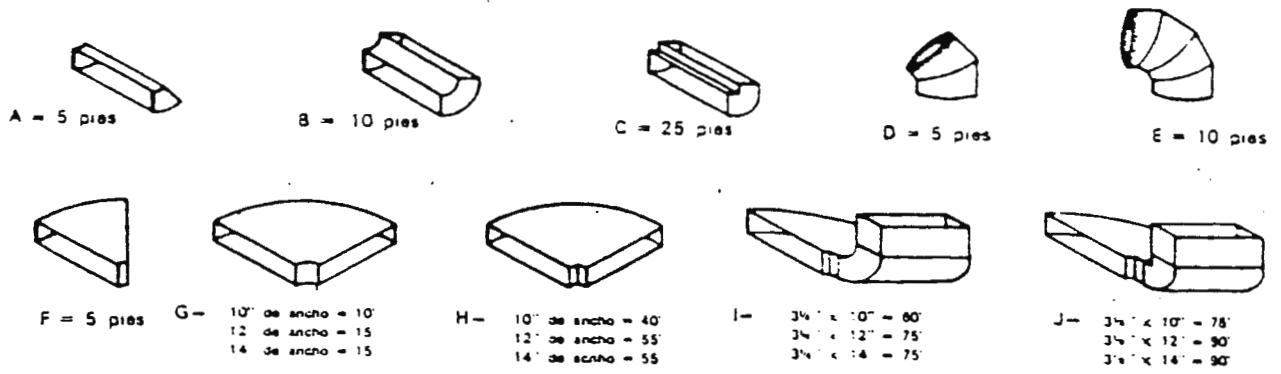


Fig. 4.8

Referencia ( 6 )

Zapatos conectores

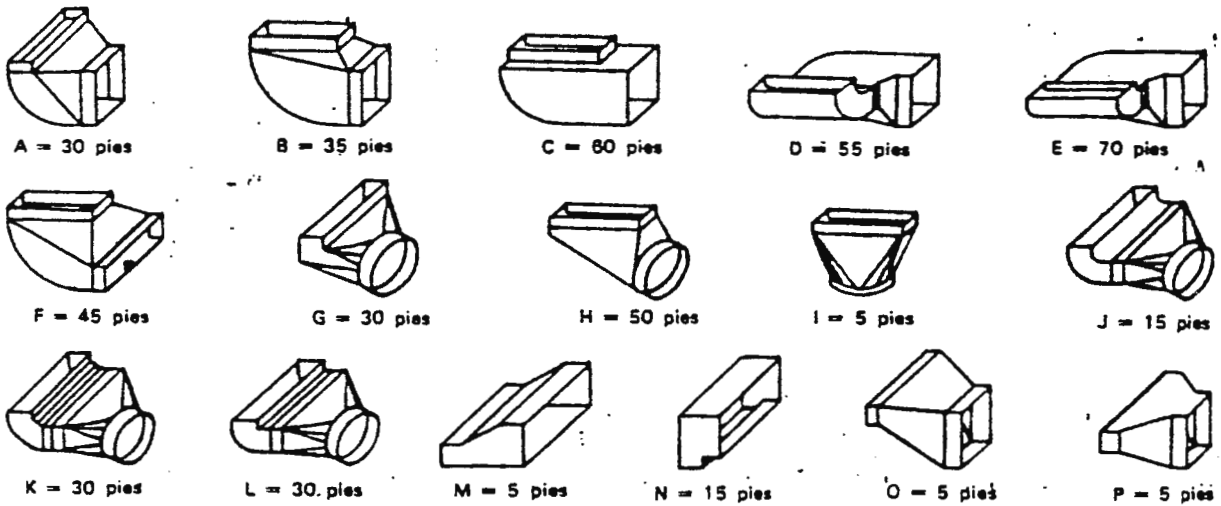


Fig. 4.9

Referencia ( 6 ).

## 4.4 DISEÑO DEL COLECTOR SOLAR

### 4.4.1 EFICIENCIA DE COLECTORES PLANOS DE ENERGÍA SOLAR PARA CALENTAMIENTO DE AIRE FORZADO

La vida útil de un colector solar depende de la calidad de los materiales, del diseño de la estructura y de su eficiencia (8). La eficiencia de un colector es la relación entre la energía sensible que entrega al aire y la energía solar disponible. Un colector de menor eficiencia ( $n_1$ ), pero más resistente que otro de eficiencia mayor ( $n_2$ ), puede compensar el rendimiento más bajo si su durabilidad ( $d_1$ ) se extiende en una proporción  $n_2/n_1$  mayor que la durabilidad ( $d_2$ ) del otro colector o sea:

$$d_1 > \frac{n_2}{n_1} \times d_2$$

Una parte importante de los colectores planos es su superficie absorbadora, que es esencialmente plana, pero que puede ser perforada, corrugada, provista de aletas o rugosa.

La superficie absorbe Energía Solar, se calienta y luego transfiere el calor al aire. Los colectores planos, en su difusa, lo que permite calentar el aire incluso en días nublados, cuando toda la radiación incidente es difusa (8).

**Tabla 4.3 Eficiencia de diversos tipos de colectores planos.**

Tipo de Colector plano	Eficiencia
Colector plano con superficie absorbadora descubierta	12%, con superficie sin pintura
Colector plano con superficie absorbadora cubierta por una lámina transparente.	30% a 50%
Colector plano con superficie absorbadora suspendida.	50% a 70%
Colector almacenador de Energía solar con cubierta transparente.	55% a 60%

Referencia (9)

#### 4.4.2 POTENCIA DE CALENTAMIENTO

La potencia que hay que transferir al aire por el sistema de calentamiento  $N_a$ , expresada en Watts, se determina por el incremento de temperatura,  $\Delta T$  en  $^{\circ}\text{C}$ , del flujo de aire,  $Q$ , en  $\text{m}^3/\text{s}$  de la masa específica del aire,  $P_a$ , en  $\text{Kg. M}^3$  y de la entalpía específica del aire,  $C_a$  en  $\text{J/Kg } ^{\circ}\text{C}$  por medio de la ecuación 4.23.

$$N_a = Q \times P_a \times C_a \times \Delta T \quad (\text{EC 4.23})$$

Como la masa específica y la entalpía específica del aire se pueden considerar constantes e iguales a  $1.2 \text{ Kg/m}^3$  y  $1005 \text{ J/Kg } ^{\circ}\text{C}$  respectivamente dentro de la banda

de temperaturas utilizadas en los procesos de secado a bajas temperaturas, la potencia que hay que transferir al aire por un sistema de calentamiento se puede determinar, de manera simplificada, por la ecuación 4.24.

$$N_a = 1206 \times Q \times AT \quad (\text{EC. 4.24})$$

Tomando en cuenta la eficiencia del colector  $N_c$ , la potencia de calentamiento del colector  $N_{ac}$ , se obtiene por medio de la ecuación 4.25.

$$N_{ac} = \frac{N_a}{n_c} \quad (\text{EC. 4.25})$$

Para obtener datos de eficiencia de colectores solares planos ver tabla 4.3.

#### 4.4.3 SUPERFICIE DEL COLECTOR SOLAR

Para determinar el área de un colector solar plano para un sistema de secado a bajas temperaturas, se puede realizar directamente cuando se conoce la eficiencia media de dichos colectores. En el caso concreto del secado de granos, generalmente se necesita aumentos medios de la 1 a 3°C. Además es preciso cuantificar la energía necesaria que el colector solar debe de entregar para calentar el aire (E) depende del flujo de aire (Q), de la entalpia específica del aire (c), del incremento de temperatura del aire (T) y del volumen específica del aire ( $V_e$ ):

$$E = \frac{QCT}{V_e} \quad (\text{EC. 4.26})$$

Así el cálculo de la superficie del colector (A), si se conoce la eficiencia media del colector (E) y la radiación solar media incidente en la superficie inclinada de este (I), se puede realizar mediante la ecuación 4.27

$$A = \frac{E}{I} \quad (\text{EC. 4.27})$$

El valor de la radiación solar media incidente en la superficie inclinada del colector (I) depende principalmente de la latitud y de la altura de la zona, la época del año y el ángulo de inclinación del colector con la dirección de los rayos solares.

Si se conoce la radiación solar media incidente en la zona de trabajo del colector y el tiempo de exposición (Tp) o tiempo de captación de energía solar, la ecuación 4.26 se puede sustituir por la ecuación 4.28.

$$E_c = N_{ac} \times T_p \quad (\text{Ec. 4.28})$$

Donde:  $E_c$  = Energía del colector (J)

$N_{ac}$  = Potencia del colector (J/S)

$T_p$  = Tiempo de captación (S)

Por lo tanto la ecuación 4.22 se modifica de la forma siguiente:

$$A = \frac{E_c}{I} \quad (\text{Ec. 4.29})$$

#### 4.4.3 ORIENTACION Y ANGULO DE INCLINACION DEL COLECTOR SOLAR PLANO.

El colector solar superficie plana debe estar orientado con su eje longitudinal en dirección este-oeste, y su inclinación depende de la época del año y de la latitud de la instalación. La inclinación óptima diaria de un colector solar ( $\alpha$ ) se puede determinar en función del ángulo de declinación diaria del sol ( $\delta$ ) y de la latitud ( $\phi$ ).

(Ec. 4.30)  $\alpha = \phi - \delta$  (para el hemisferio norte)

(Ec. 4.31)  $\alpha = \delta - \phi$  (para el hemisferio sur)

Los ángulos de declinación diaria del sol en todos los meses del año aparecen en el cuadro 4.11.

Respecto a la latitud de la zona, se presume un valor positivo para el hemisferio norte y un valor negativo para el hemisferio sur.

El cálculo de inclinación es óptimo de un colector para el secado de granos se puede simplificar puesto que la instalación se ocupa en determinados meses del año solamente. Así se calcula la inclinación óptima aproximada del colector mediante la ecuación 4.30 o 4.31 y tomando como base el valor de la declinación media mensual (cuadro 4.12 en los meses del período de secado).

Sin embargo para los países cuya ubicación geográfica es próxima al ecuador terrestre, el ángulo de inclinación del colector, según la práctica debe ser igual a la latitud del dicho lugar. (ref. 9)

CUADRO 4.11

Angulos de declinacion ( ) diaria del sol.

Día	M E S											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Octub.	Nov.	Dic.
01	-23°05'	-17°24'	-07°37'	04°30'	15°03'	22°02'	23°07'	18°02'	08°19'	-03°09'	-14°24'	-21°47'
02	-23°00'	-17°07'	-07°14'	04°54'	15°21'	22°10'	23°03'	17°47'	07°57'	-03°32'	-14°43'	-21°56'
03	-22°55'	-16°50'	-06°51'	05°17'	15°39'	22°18'	22°58'	17°32'	07°35'	-03°55'	-15°02'	-22°05'
04	-22°49'	-16°33'	-06°28'	05°40'	15°26'	22°25'	22°53'	17°16'	07°13'	04°19'	-15°21'	-22°14'
05	-22°43'	-16°15'	-06°05'	06°02'	16°14'	22°32'	22°48'	17°00'	06°51'	-04°42'	-15°39'	-22°21'
06	-22°37'	-15°57'	-05°42'	06°25'	16°31'	22°39'	22°42'	16°44'	06°29'	-05°05'	-15°57'	-22°29'
07	-22°30'	-15°38'	-05°19'	06°48'	16°47'	22°45'	22°36'	16°27'	06°06'	-05°28'	-16°15'	-22°36'
08	-22°23'	-15°20'	-04°55'	07°10'	17°04'	22°50'	22°29'	16°10'	05°44'	-05°51'	-16°33'	-22°42'
09	-22°15'	-15°01'	-04°32'	07°33'	17°20'	22°55'	22°22'	15°53'	05°21'	-06°14'	-16°50'	-22°49'
10	-22°07'	-14°42'	-04°08'	07°55'	17°36'	23°00'	22°15'	15°36'	04°59'	-06°36'	-17°07'	-22°54'
11	-21°58'	-14°22'	-03°45'	08°17'	17°51'	23°05'	22°07'	15°18'	04°36'	-06°59'	-17°24'	-22°59'
12	-21°49'	-14°03'	-03°21'	08°39'	18°07'	23°06'	21°59'	15°00'	04°03'	-07°22'	-17°40'	-23°04'
13	-21°39'	-13°43'	-02°58'	09°01'	18°22'	23°12'	21°51'	14°42'	03°50'	-07°44'	-17°56'	-23°09'
14	-21°29'	-13°23'	-02°34'	09°22'	18°36'	23°16'	21°42'	14°24'	03°27'	-08°07'	-18°12'	-23°12'

CONTINUACION DEL CUADRO ANTERIOR

Dia	M E S											
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sept.	Octub.	Nov.	Dic.
15	-21°19'	-13°03'	-02°10'	09°44'	18°51'	23°18'	21°32'	14°06'	03°04'	-08°29'	-18°28'	-23°18'
16	-21°08'	-12°42'	-01°47'	10°05'	19°05'	23°21'	21°23'	13°46'	02°41'	-08°51'	-18°43'	-23°19'
17	-20°57'	-12°22'	-01°23'	10°27'	19°18'	23°23'	21°13'	13°27'	02°18'	-09°13'	-18°58'	-23°21'
18	-20°45'	-12°01'	-00°59'	10°48'	19°32'	23°24'	21°03'	13°08'	01°54'	-09°35'	-19°12'	-23°23'
19	-20°33'	-11°40'	-00°35'	11°08'	19°45'	23°25'	20°52'	12°48'	01°31'	-09°57'	-19°26'	-23°25'
20	-20°21'	-11°18'	-00°12'	11°29'	19°58'	23°26'	20°41'	12°29'	01°08'	-10°18'	-19°40'	-23°26'
21	-20°08'	-10°57'	-00°12'	11°50'	20°10'	23°26'	20°29'	12°09'	00°45'	-10°40'	-19°54'	-23°26'
22	-19°55'	-10°36'	00°36'	12°10'	20°22'	23°26'	20°18'	11°49'	00°21'	-11°01'	-20°07'	-23°26'
23	-19°42'	-10°13'	00°59'	12°30'	20°34'	23°26'	20°08'	11°29'	-00°02'	-11°22'	-20°19'	-23°26'
24	-19°28'	-09°52'	01°23'	12°50'	20°45'	23°25'	19°53'	11°08'	-00°26'	-11°43'	-20°32'	-23°25'
25	-19°13'	-09°29'	01°47'	13°10'	20°56'	23°24'	19°41'	10°48'	-00°49'	-12°04'	-20°04'	-23°24'
26	-18°59'	-09°07'	02°10'	13°29'	21°07'	23°22'	19°27'	10°27'	-01°12'	-12°25'	-20°55'	-23°22'
27	-18°44'	-08°46'	02°34'	13°48'	21°17'	23°20'	19°14'	10°06'	-01°36'	-12°45'	-21°07'	-23°20'
28	-18°29'	-08°22'	02°57'	14°07'	21°27'	23°17'	19°00'	09°45'	-01°59'	-13°05'	-21°17'	-23°17'
29	-18°13'	-08°00'	03°21'	14°26'	21°36'	23°14'	18°46'	09°24'	-02°22'	-13°25'	-22°28'	-23°14'
30	-17°57'	-	03°44'	14°45'	21°45'	23°11'	18°32'	09°02'	-02°46'	-13°45'	-21°38'	-23°10'
31	-17°41'	-	04°07'	-	21°54'	-	18°17'	08°41'	-	-14°05'	-	-23°06'

Fuente: SOUZA NUNES et al. (1979)

Referencia ( 12 )

CUADRO 4. 12

*Angulos de declinacion,medias mensuales calculadas.*

Mes	Angulos
Enero	-21°08'
Febrero	-13°13'
Marzo	-1°47'
Abril	9°55'
Mayo	19°05'
Junio	23°20'
Julio	21°23'
Agosto	13°46'
Septiembre	2°53'
Octubre	-8°51'
Noviembre	-18°36'
Diciembre	-23°19'

#### 4.4.4 ANALISIS DEL MODELO MATEMATICO PARA EL COLECTOR SOLAR.

Los colectores solares son dispositivos para el aprovechamiento de la energía solar, el cual convierte la energía solar en energía calorífica, los colectores solares de placa plana para calentadores de aire es el punto de partida para la determinación del modelo matemático.

Este análisis tiene por objeto determinar la temperatura del aire saliendo del colector (T); para ello se aplica un balance de energía en el colector de la siguiente manera:

El producto de la radiación solar instantánea global y el área de colección solar por el producto efectivo de la transmitancia - absorbencia de la cubierta - placa, es igual al flujo de calor absorbido por el fluido de trabajo más el flujo de calor transferido desde la superficie de absorción hacia los alrededores más el flujo de energía almacenada en el sistema de colección, que matemáticamente se expresa por:

$$G A_p (\tau\alpha) e = Q_u + Q_{Perd} + de/dt \quad (\text{Ec. 4.32})$$

Con cada uno de los términos en orden de definición.

Los parámetros de entrada del modelo matemático a desarrollar, que corresponden tanto a características geométricas y propiedades físicas de los materiales de construcción del precalentador de aire, están contenidos en la tabla 4.4.

Las variables de control del sistema del colector solar son las siguientes:

- a. Temperatura ambiente ( $T_a$ )
- b. Velocidad del viento exterior ( $V$ )
- c. Radiación solar instantánea ( $G$ )
- d. Fecha o día de prueba ( $n$ )
- e. Hora de prueba.

En este modelo de predicción teórico de comportamiento del sistema, no se considera la influencia que las variables nubosidad y brillo solar tienen sobre el mismo.

Los efectos de dispersión y absorción de la radiación de la atmósfera son variables con el tiempo, como son las condiciones atmosféricas y los cambios de masa de aire. Estos hechos se emplean para definir en estándar de “cielo claro”. (14)

El término a la izquierda de la ecuación 4.32 representa la radiación solar instantánea total incidiendo sobre la superficie de absorción, la cual se calcula de acuerdo con las siguientes ecuaciones matemáticas: (14)

Hs es negativo para las horas de la tarde y positivo para las horas de la mañana.  
(14)

$$\delta = 23.54 \text{ Sen } [ 360/365 (284 + n)] \quad (\text{Ec. 4.34})$$

Luego se aplica el factor geométrico (Rb), que es la relación de la radiación solar sobre una superficie inclinada a la radiación solar sobre una superficie horizontal.  
(14)

$$Rb = \frac{\text{Cos } (L-\beta) \text{ Cos } \delta \text{ Cos } Hs + \text{Sen } (1-\beta) \text{ Sen } \delta}{\text{Cos } L \text{ Cos } \delta \text{ Cos } Hs + \text{Sen } L \text{ Sen } \delta}$$

Luego:  $Rb = G_{on}/G_o$  (Ec. 4.36)

Donde:  $G_{on}$  es la radiación solar sobre una superficie inclinada ( $Kw/m^2$ ). Por el método de la transmitancia modificada se obtiene, la transmitancia para radiación directa ( $\sigma_b$ ), que se define por las ecuaciones: (14)

$$\sigma_b = G_{bn} \quad T_b = G_{bn}/G_o \quad (\text{Ec. 4.37})$$

Donde:

$G_{bn}$ : Radiación normal directa para cielo claro ( $Kw/m^2$ )

$\sigma_b$  : Se calcula mediante la siguiente ecuación.

$$b = A_0 + A_1 e^{(-K \cos \theta)} \quad (\text{Ec. 4.38})$$

Donde:

A<sub>0</sub>, A<sub>1</sub> y K son constantes para atmósferas estándar y se determinan a partir de las expresiones:

$$A * o = 0.4237 - 0.00821 (6-A)^2 \quad (\text{Ec. 4.39})$$

$$A * 1 = 0.5055 + 0.00595 (6.5-A)^2 \quad (\text{Ec. 4.40})$$

$$K * = 0.2711 + 0.01858 (2.5-A)^2 \quad (\text{Ec. 4.41})$$

Donde: A es la altitud del observador en kilómetros.

Los factores de corrección que se aplican a las expresiones A\*<sub>0</sub>, A\*<sub>1</sub> y K\* para adecuarlos a los distintos tipos de climas, se definen a continuación:

$$r_o = A_o/A^*1; \quad r_1 = A_1/A^*1; \quad r_x = K/K^* \quad (\text{Ec. 4.42})$$

Los factores de corrección para El Salvador, que posee un clima tropical, son: r<sub>0</sub>=0.95, r<sub>1</sub>=0.98 y r<sub>x</sub> = 1.02.

El coeficiente de transmisión para la radiación solar difusa se calcula de la siguiente ecuación: (14)

$$\sigma_d = 0.2710 - 0.2939 \sigma_b \quad (\text{Ec. 4.43})$$

El ángulo de altitud solar (θ<sub>l</sub>) se calcula a partir de: (14)

$$\text{Cos } \theta_x = \text{Sen } L \text{ Sen } \delta + \text{Cos } \delta \text{ Cos } L \text{ Cos } H_s \quad (\text{Ec. 4.44})$$

El coeficiente de transmisión para la radiación solar difusa se calcula de la siguiente ecuación: (14)

$$\sigma_d = 0.2710 - 0.2939 \sigma_b \quad (\text{Ec. 4.43})$$

El ángulo de altitud solar ( $\theta_T$ ) se calcula a partir de: (14)

$$\cos \theta_x = \text{Sen } L \text{ Sen } \delta + \text{Cos } \delta \text{ Cos } L \text{ Cos } H_s \quad (\text{Ec. 4.44})$$

La suma de la radiación directa y la radiación difusa sobre la superficie proporciona la radiación total, que se expresa por medio de.

$$G = G_o R_b \sigma_b + G_o R_b \sigma_b \quad (\text{Ec. 4.45})$$

En la misma ecuación el término que representa el almacenaje de energía en el sistema ( $dec/dt$ ), es en este caso nulo. (14)

El término representa las pérdidas de energía térmica, desde el colector al ambiente, se expresa mediante la siguiente ecuación: (13)

$$Q_{\text{perd}} = A_\beta + U_1 (T_\beta - T_a)$$

Donde:  $T_p$  : temperatura media de la superficie de absorción ( $^{\circ}\text{K}$ ).

$U_1$ : Representa el coeficiente total de pérdida del colector ( $\text{W/m}^2\text{-}^{\circ}\text{K}$ ). Las pérdidas

$$t_p = N + f$$

$$\frac{\sigma (T_p + T_a)(T_p^2 + T_a^2)}{(E_p + 0.00591 N hw)^{-1} + \frac{2N + f - 1 + 0.133 E_p}{E_c} - N} \quad (\text{Ec. 4.48})$$

En donde:

$\sigma$  = Constante de Stefan Boltzman

$N$  = Número de cubiertas.

$F = (1 + 0.089 hw - 0.1166 hwE) (1 + 0.07866 N)$

$c' = 520 (1 - 0.000051 B^2)$ , para  $0^\circ < \beta < 70^\circ$ .

Para  $70^\circ < \beta$  usar  $B = 70^\circ$

$e' = 0.43 (1 - 100/T_\beta)$

$hw$ : Coeficiente de transferencia convectivo por corrientes de viento ( $W/m^2 - ^\circ K$ )

$hw = 5.7 + 3.8 V$  ( $W/m^2 - ^\circ K$ ). (Ec. 4.49)

El coeficiente de pérdidas de fondo representa la resistencia a la transferencia material de aislamiento del fondo y se determina mediante la siguiente ecuación:

(13)

$$U_b = \frac{1}{X / K} = \frac{K_{\text{madera}}}{X} \quad (\text{Ec. 4.50})$$

Las pérdidas laterales deberán ser referidas al área de placa de la superficie de

absorción. De esta manera, las pérdidas laterales pueden ser expresadas por :

(13)

$$U_1 = K \text{ madera } (A_2) / X (A_1) \quad (\text{Ec.4.51})$$

El flujo de calor absorbido por el fluido de trabajo ( calor útil  $Q_u$ ), que ha sido transferido desde la placa absorbedora, se determina por:

(13)

$$Q_u = A_1 Fr [ S - V_1 ( T_{fa} - T_a ) ] \quad (\text{EC. 4.52})$$

Donde:

$T_{fa}$  = Temperatura del fluido de trabajo a la entrada del colector (  $^{\circ}\text{K}$  )

$S$  = Flujo de radiación solar (  $\text{KW}/\text{m}^2$  )

$$S = G ( t\alpha ) \quad (\text{Ec. 4.53})$$

$Fr$  = Factor de remoción de calor , definido por (13)

$$Fr = m Cp / A_1 V_1 [ 1 - e^{-(A_1 V_1 F / m Cp)} ] \quad (\text{Ec. 4.54})$$

Donde:  $m$ : Flujo de masa de aire seco (  $\text{Kg}/\text{s}$  )

$Cp$ : Calor específico del aire seco (  $\text{J}/\text{Kg} - ^{\circ}\text{K}$  )

$F$  : Factor de eficiencia del colector

El cálculo del factor de eficiencia del colector se determina de la siguiente expresión: (15)

$$F = 1 / 1 + [ U_1 / [ h_1 / \text{Sen } \varnothing / 2 + 1 / [ 1/h_2 + 1/h_1 ] ] ] \quad (\text{Ec. 4.55})$$

En la figura 4.11 se muestra el esquema del colector, par facilitar el cálculo del factor eficiencia. (13).

Donde:

$h_1$ : Coeficiente de transferencia de calor por convección de la placa a la cubierta ( $w/m^2 \text{ } ^\circ k$ )

$h_2$  : Coeficiente de transferencia de calor por convección del fondo a la placa ( $w/m^2 \text{ } ^\circ K$ )

$h_r$  : Coeficiente de transferencia de calor por radiación de la placa a la cubierta ( $w/m^2 \text{ } ^\circ k$ )

$\varnothing$  : Angulo del canal

Los coeficientes de transferencia de calor por convección se determinan de las siguientes expresiones: (14)

$$h = \text{Nu } K_{\text{aire}}/L^3 \quad (\text{Ec. 4.56})$$

Donde:

$K_{\text{aire}}$ : Conductividad térmica del aire ( $w/m - \text{ } ^\circ K$ )

$Un$  Número de Nussel , definido por (16)

$$Un = 1.44 [ 1- 1708/Ra \text{ Cos}\beta ] [ 1- (\text{Sen } 1.8\beta)^{1.6} 1708/ Ra \text{ Cos}\beta ] + [ (Ra \text{ Cos}\beta)^{1/3}/5830 -1] \quad (\text{Ec.4.57}).$$

Donde:

Ra: Número de Raleigh =  $\zeta \beta \cdot \Delta T L^3 Pr / \Gamma^2$  (Ec. 4.58)

$\beta$  :  $0^\circ \leq \beta \leq 75^\circ$

Pr : Número de Prandtl ( de tablas). Ver anexo I

$\beta$  : Coeficiente de expansión térmica del medio ( $1/^\circ\text{K}$ )

$\Delta T$  : Diferencia de temperaturas entre placas

$\Gamma$  : Viscosidad cinemática del medio

Para establecer las propiedades del fluido de trabajo, es necesario primero establecer la temperatura del interespacio entre placa y fondo; aquí se asume que:

$$T_f = 0.6 T_p \quad (\text{Ec. 4.59})$$

Donde:

$T_f$ : Temperatura del interespacio entre placas ( $^\circ\text{K}$ )

El coeficiente de transferencia de calor por radiación de la placa a la cubierta se determina de las siguientes expresiones: (14)

$$h_r = \sigma (T_p^2 + T_c^2) (T_p + T_c) / 1/E_p + 1/E_c - 1 \quad (\text{Ec. 4.60})$$

Donde :

$T_c$  : Temperatura de cubierta ( $^\circ\text{k}$ )

Según un balance de energía entre la placa y la cubierta, se obtiene:

$$T_c = T_p - U_t (T_p - T_a) / h_1 + h_1$$

Para determinar la temperatura de placa y la temperatura de cubierta se utiliza, necesariamente, un método iterativo que consiste en lo siguiente:

1. Se asumen valores dados para la temperatura de placa y temperatura de cubierta.
2. Con estos valores se evalúan todos los coeficientes de transferencia de calor del sistema.
3. Se reevalúan la temperatura de cubierta por medio de la ecuación 4.61 y de la placa por medio de la ecuación 4.62.
4. Estos resultados se comparan con la asunción inicial y de no ser iguales se retoman los valores calculados para repetir el método.

Energía para colectores solares planos en operación en convección natural, los cálculos realizados han supuesto un mapeo para diferentes flujos de masa de aire. Estos servirán como referencia para que en base a la temperatura de salida del aire del colector, identificar el flujo de masa correspondiente.

5. Una vez el valor de la temperatura de placa no varía según el método descrito anteriormente se determina la temperatura del aire saliendo del colector solar plano.

Para determinar la temperatura de la placa se utiliza la ecuación siguiente:

$$T_p = T_a + [Q_u / A_p] / U_1 Fr \quad (1 - Fr) \quad (\text{Ec. 4.62})$$

Donde:

$$Q_u = A_p [ S - U_1 (T_p - T_a) ]$$

La ecuación que determina la temperatura del aire saliendo del colector solar plano esta dada por:

$$T_1 = T_a + G \{ (t \infty) [1 - e^{-(A_p V_1 F_1 / m C_p)}] \} \quad (\text{Ec. 4.64})$$

## 4.5 DISEÑO DEL SILO

### 4.5.1 CARGAS IMPUESTAS POR EL GRANO ALMACENADO. (NORMAS CANADIENSES PARA CONSTRUCCIONES RURALES)

Definiciones:

1. Depósito poco profundo: profundidad del grano (H) igual o menor que el diámetro equivalente (D) o sea :  $H/B \text{ tg} (\varnothing/2 + 45^\circ)$

B= anchura  $\varnothing$ = ángulo de reposo del grano descargado. Por ejemplo, en el caso del trigo  $\varnothing$ =ángulo de reposo del grano descargado. Por ejemplo, en el caso del trigo ( $\varnothing=28^\circ$ ), si  $H=1.66 B$ , utilice las fórmulas que se dan más adelante para los proyectos de depósitos poco profundos.

2. Depósito profundo: profundidad del grano (H) mayor que el diámetro equivalente (D), o bien mayor que la segunda definición anterior.
3. Diámetro equivalente (D): el grano es semifluido, las cargas tanto verticales como laterales, son una función de la profundidad. En el diseño de algunos depósitos, explicado más adelante, la densidad del fluido equivalente (DFE), es directamente proporcional a la carga y la profundidad, supuesta la linealidad.

Según la teoría de Rankine:

Presión lateral (L) = DFE x H<sup>2</sup>/2, en que DFE =  $\text{rtg}^2 (45^\circ - \phi/2)$

r = densidad de la materia

$\phi$  = ángulo de rozamiento interno

Para determinar la DFE, tómesese el ángulo de reposo del grano descargado.

A. Depósitos de poca profundidad.

1. Carga lateral aplicada a los muros verticales:  $V \quad L = \text{DFE} \times H$
2. Cargas verticales aplicadas a los muros verticales:  $V = \mu \times L$ .  $\mu$  = coeficiente de rozamiento del grano contra el muro.
3. Cargas verticales sobre suelos horizontales:  $V = \text{DFE} \times H$ . Para mayor seguridad :  $V = \text{densidad en masa} \times H$ .
4. Valores para proyectos, basados en la densidad del fluido equivalente (DFE lleno del todo: maíz desgranado 30 kg/m<sup>3</sup>; trigo 27.7 kg/m<sup>3</sup>  
Efecto de sobrecarga: si la sobrecarga es máxima, aumentense un 25% las cifras anteriores.

Efecto de sobrecarga: si la sobrecarga es máxima, aumentense un 25% por ciento las cifras anteriores.

Nota: estas cifras han sido verificadas en amplios estudios sobre la carga y la presión. Concuerdan con la fórmula de Rankine que tienen como ángulo de rozamiento interno el de reposo del grano descargado. Véase más adelante el desacuerdo con los datos obtenidos, según la teoría de Coulomb.

5. Muros inclinados o curvados hacia dentro: tomando las presiones

basadas en la DFE, el proyecto tiene mayor margen de seguridad.

Aplíquese la teoría de la “cuña” de Coulomb.

Nota: en el supuesto de que el depósito esté lleno hasta el nivel normal y el rozamiento entre el grano y la pared sea cero, la teoría de Coulomb queda reducida a la Rankine.

6. Valores para los proyectos, según la teoría de Coulomb: el ángulo de rozamiento interno determinado mediante estudios referentes a la carga no es igual al ángulo de reposo del grano descargado que comúnmente toma en el método de la DFE.

Angulo de rozamiento interno: maíz desgranado  $22^\circ$  ; trigo  $31^\circ$

## B. Depósitos Profundos

Fórmula de Janssen:

1. Carga lateral aplicada a los muros verticales:  $L = WD/4\mu (1 - e^{-4k\mu H/D})$

$L$  = presión lateral,  $\text{Kg/m}^2$

$W$  = densidad del grano  $\text{Kg/m}^3$

$D$  = diámetro del depósito o diámetro equivalente, metros.

$K$  = la relación entre la presión interna lateral y la presión interna vertical

$$= (1 - \text{sen } \varnothing) / (1 + \text{cos } \varnothing)$$

$\varnothing$  = ángulo de reposo

$\mu$  = coeficiente de rozamiento entre el grano y el muro.

$H$  = altura de llenado, metros.

$V = \mu L$  = carga vertical aplicada al muro

2. Carga vertical aplicada a los muros verticales:  $V = \mu \times L$ . Nota: la carga vertical y la carga horizontal no pueden ser nunca máximos al mismo tiempo.
3. Carga vertical aplicada a los suelos horizontales:  $F = L/K$

c. Fondos de tolva

1. La teoría de Coulomb no se cumple en el caso de depósitos de poca profundidad con paredes y/o suelos inclinados.
2. En el caso de depósitos profundos, con cualquier altura del grano, las fuerzas sobre la superficie de la tolva son:
  - a) Presión normal  $L \sin^2 \theta + L/K \cos^2 \theta$ , en que cero (0) es el ángulo entre la superficie de la tolva y la horizontal.
  - b) Según los informes, esta fórmula es excesivamente prudente en el caso de depósitos profundos.
  - c) Fuerza de rozamiento paralela a la superficie = presión normal  $\times \mu$
  - d) Esfuerzo de tracción vertical resultante de que el extremo inferior de una cara de la tolva aplica reacciones finales a la otra cara.
  - e) Tensión circunferencial en la tolva, o esfuerzo de tracción horizontal resultante de que una cara de la tolva aplica reacciones finales a las otras caras.

- . D. Cargas verticales aplicadas a los muros que tienen travesaños horizontales descubiertos.

Carga aplicada al muro =  $F + V$

$F$  = carga vertical sobre los travesaños.

$V = \mu \times L$  = carga vertical aplicada a la pared al determinar  $L$ , omítanse las zonas “sombreadas” por los travesaños.

- E. Efectos Térmicos. Coeficiente de dilatación térmica lineal para maíz con 9,3 % de humedad = 0.0000187 cm/cm.

Los cambios de temperatura del aire ambiente provocan cambios dimensionales en el depósito y cambios de altura o volumen menores en la materia almacenada.

El calentamiento del depósito por el sol, seguido de contracción de la materia almacenada y subsiguiente enfriamiento, puede traducirse en presiones pasivas.

Como los cambios dimensionales son relativamente pequeños, la elasticidad de una masa de grano (24 a 70 kg/cm<sup>2</sup>), permite la deformación para reducir estas tensiones aparentemente elevadas.

Según informes, la deformación de la masa de grano aumenta notablemente la DFE y cambia las configuraciones de los esfuerzos en el grano. La repetición de los ciclos puede provocar el derrumbamiento.

- F. Efectos de la humedad. En los silos comerciales y en los granos rurales, si el grano se deposita con un contenido de humedad que no implica riesgo y no es de prever ninguna ulterior desecación, los cambios de la humedad,

no son importantes para el diseño de dichos recipientes.

Las presiones ejercidas en los muros son seis veces mayores si el contenido de humedad del grano seco aumenta un 4%. Si este aumento es del 10%, las presiones duplican.

- G. Efecto de la descarga. Ciertos investigadores han comunicado que se producen sobrecargas de diversas magnitudes durante la descarga de grano.

En el momento presente, parece ser que no se dispone de valores o métodos utilizables por los proyectistas.

- H. Propiedades físicas de los granos almacenados. Véanse los coeficientes de rozamiento de los granos (cuadro 4.13) calculadas de éstos (cuadro 4.14).

CUADRO 4.13

- COEFICIENTES DE ROZAMIENTO ( $\mu$ ) DE GRANOS EN DIVERSOS CONTENEDORES DE HUMEDAD EN SUPERFICIES DE ALGUNOS MATERIALES

Producto	Contenido de humedad (porcentaje)	Superficies										
		Hormigón			Madera				Plástico		Metal	
		Acabado liso con plástico	Acabado con lana de acero	Acabado tratado con madera	Roble		Pino de Oregon		Teflón	Polietileno	Acero bañ. en carbono (lamina en frío)	Chapa galvanizada
			Fibra paralela	Fibra perpendicular	Fibra paralela	Fibra perpendicular						
Avena .....	10.6	0.276	0.396	0.434	0.202	0.231	0.268	0.294	0.130	0.204	0.197	0.273
	13.0	0.343	0.443	0.435	0.244	0.251	0.289	0.354	0.139	0.219	0.256	0.240
	11.0	0.326	0.514	0.423	0.232	0.248	0.343	0.358	0.126	0.278	0.214	0.180
	16.0	0.292	0.459	0.456	0.314	0.307	0.371	0.366	0.110	0.312	0.204	0.405
Esferas (Teflón) .....	17.3	0.497	0.652	0.639	0.459	0.479	0.480	0.500	0.135	0.502	0.443	0.315
	--	0.322	0.398	0.375	0.300	0.323	0.330	0.354	0.243	0.280	0.213	0.248
	11.2	0.356	0.516	0.506	0.235	0.264	0.307	0.347	0.170	0.269	0.204	0.095
	13.0	0.460	0.520	0.516	0.247	0.291	0.315	0.382	0.156	0.351	0.286	0.142
Trigo .....	15.0	0.503	0.547	0.510	0.353	0.368	0.468	0.457	0.116	0.389	0.269	0.272
	15.7	0.563	0.677	0.689	0.411	0.464	0.482	0.501	0.119	0.448	0.514	0.352
	7.1	0.246	0.390	0.391	0.239	0.337	0.290	0.309	0.160	0.246	0.191	0.206
Soya .....	8.1	0.318	0.554	0.515	0.294	0.336	0.323	0.366	0.174	0.316	0.192	0.205
	9.8	0.308	0.467	0.367	0.281	0.308	0.333	0.314	0.155	0.288	0.202	0.182
	12.2	0.363	0.552	0.515	0.279	0.360	0.353	0.411	0.147	0.410	0.230	0.199
	10.7	0.232	0.557	0.503	0.234	0.285	0.269	0.322	0.169	0.232	0.197	0.198
Cebada .....	12.3	0.248	0.547	0.522	0.214	0.277	0.275	0.306	0.147	0.275	0.247	0.174
	14.3	0.236	0.568	0.508	0.205	0.277	0.297	0.323	0.131	0.278	0.288	0.204
	16.4	0.331	0.619	0.552	0.304	0.330	0.374	0.412	0.105	0.354	0.214	0.342
	14.0	0.516					0.435	0.500				0.402
Arroz cáscara .....		0.611					0.506	0.542				0.449
	7.5	0.268	0.405	0.456	0.238	0.245	0.271	0.288	0.170	0.219	0.255	0.195
Maíz desgranado .....	0.0	0.247	0.589	0.615	0.282	0.314	0.311	0.314	0.176	0.270	0.201	0.241
	12.2	0.311	0.677	0.647	0.261	0.291	0.330	0.333	0.160	0.303	0.201	0.246
	13.9	0.345	0.635	0.540	0.294	0.360	0.365	0.380	0.123	0.391	0.238	0.372

Referencia ( 7 ).

CUADRO 4.14

Densidad de los granos, según cálculos.

	Densidad a granel
Alfalfa .....	770
Cebada .....	615
Frijoles:	
de Lima, secos .....	719
con vaina .....	411
verdes .....	285
otros, secos .....	770
Sorgo de escobas (proso) .....	565-641
Alforfón .....	615-663
Ricno .....	590
Trébol .....	770
Semilla de algodón .....	411
Caupies .....	770
Semilla de lino .....	718
Sorgos de grano .....	718 y 641
Cacahuete, con vaina:	
tipo Virginia .....	282
rastrero, sudoriental .....	359
español .....	285
Cañamón .....	565
Nueces de caria .....	641
Mijo húngaro .....	615 y 641
Sorgo Kafir .....	718 y 641
Miraguano .....	449-514
Lentejas .....	770
Maiz:	
en mazorcas, deschaladas .....	449
desgranado .....	718
azucarado verde .....	449
Mijo .....	615-641
Mostaza .....	744-770
Avena .....	411
Dactilo ramoso .....	
Perilla .....	475-514
Maiz para rosetas:	
en mazorcas .....	449
desgranado .....	718
Adormidera .....	590
Semilla de colza .....	641 y 770
Arroz, sin descascarillar .....	577
Centeno .....	718
Sésamo (ajonjolí) .....	590
Sorgo .....	641
Soja .....	770
Espelta (trigo p.) .....	514
Hierba del Sudán .....	514
Girasol .....	308 y 411
Fico de los prados .....	577
<i>Mucuna pruriens</i> (habichuelas terciopelo), sin vaina .....	770
Veza .....	770
Nueces de nogal .....	641
Trigo .....	770

Referencia ( 7 ).

## **4.6 ECUACIONES APROXIMADAS PARA EL CALCULO DEL TIEMPO DE SECADO.**

En el diseño de secadores una variable importante es el tiempo para secar el material en las condiciones existentes en el aparato, puesto que de él depende el tamaño necesario para obtener la velocidad de transmisión de calor, como la velocidad de transferencia de materia adecuadas, las cuales dan la capacidad del secadero.

Por otro lado, el cálculo del tiempo total necesario para la desecación implica calcular los tiempos de desecación a intensidad constante y a intensidad decreciente. Tomando constante y a intensidad decreciente; tomando en cuenta además bajo que condiciones externas (humedad, temperatura, ventilación del aire). Se realiza la operación de secado, es decir, si las condiciones externas de secado son constantes o variables (humedad y temperatura del aire). El presente trabajo, se limita al estudio del tiempo de secado en condiciones constantes.

### **4.6.1 CALCULO DEL TIEMPO DE SECADO EN CONDICIONES CONSTANTES.**

Para el secado en condiciones externas constantes se puede determinar el tiempo de secado a partir de las curvas de velocidad. Frecuentemente la única forma de construir esta curva es obtener datos experimentales con el material que se va a secar, lo cual implica a sus vez, un conocimiento directo del tiempo de secado. Las curvas de velocidad de secado para una serie de condiciones generalmente se modifican cuando se operan en otras condiciones y en este caso resulta conveniente calcular el tiempo a partir de la curva de secado. Para realizar esto, se parte de la

definición de la velocidad de secado (suponiendo que la densidad del sólido  $P_s$ , es constante) con relación: (15)

$$R = W_s/D \left( - ds /dt \right) \text{ (ec. 4.65)}$$

Donde:

$R$  = Ordenada de la curva de velocidad de secado, conocida como velocidad

$Kg$  de líquido evaporado por hora por metro cuadrado de superficie sólida.

$W_s$  = peso o masa del sólido seco,  $Kg$

$\Delta$  = Area total del secado,  $m^2$

$x$  = Abscisa de la curva, representa el contenido de humedad libre del sólido  $Kg$  de humedad libre pro  $Kg$  de sólido seco.

$t$  = tiempo de secado, hr.

Puesto que la curva de velocidad de secado da una relación entre  $R$  y  $X$  se puede integrar la Ecuación 4.65 entre las humedades libres inicial y final,  $X_1$  y  $X_2$  respectivamente, para obtener el tiempo de secado.

$$t = \int_0^t dt = W_s/D \int_{x_2}^{x_1} dx/R \quad \text{(Ec. 4.66)}$$

Esta ecuación se puede integrar gráficamente a partir de la curva de velocidad de secado, o analíticamente, si se disponen de ecuaciones que expresen  $R$  en función de  $X$ .

Para el secado en condiciones constantes, la ecuación 4.66 se puede integrar directamente en dos casos: en el período de velocidad constante y en el período de velocidad decreciente cuando la línea representativa es recta.

#### 4.6.2 CALCULO DEL TIEMPO EN EL PERIODO DE VELOCIDAD CONSTANTE.

Durante el período de velocidad constante  $R$ , es constante y se denota por  $R_c$ , caracterizándose por la evaporación desde la superficie de agua libre sobre la superficie del sólido.

Cuando el calor para la evaporación del período de velocidad constante es suministrada por gases calientes, se establece un equilibrio dinámico, entre el flujo de transmisión de calor al material y la rapidez con que se elimina el vapor de la superficie. Este equilibrio entre las velocidades o flujos de calentamiento y de transmisión de materia se expresa como sigue (16):

$$-R_c A = W_s \frac{dx}{dt} = h_y A \frac{DT}{\lambda} = K_g A D_p$$

donde:,  $R_c A = -W_s \frac{dx}{dt}$ : velocidad de secado  $K_{g_{H_2O}} / h$

$h_y$  = coeficiente total de transmisión de calor  $k \text{ cal/hr m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$

$A$  = área de transmisión de calor o evaporación,  $\text{m}^2$ .

$DT$  =  $(T_a - T_e)$ , siendo  $T_a$ , temperatura del aire,  $^\circ\text{C}$  y  $T_s$ , temperatura de la superficie de evaporación,  $^\circ\text{C}$ .

$\lambda$  = calor latente de vaporización a la temperatura  $T_s$ ,  $\text{Kcal /Kg}$ .

$K_g$  = coeficiente de transferencia de materia  $\text{kg/ hr-m}^2\text{-atm}$ .

$D_p$  =  $(p_s - p_a)$ , siendo  $p_s$ , presión de vapor del agua  $\text{atm}$ ,  $\text{atm}$  y  $p_a$  presión parcial del vapor de agua en el aire,  $\text{atm}$ .

Cuando  $h_y$ , es el coeficiente de transmisión del calor sólo por convección,  $T_s$  en las condiciones de equilibrio es la temperatura de ampolla humedad del aire y  $p_s$  es la presión parcial del vapor de agua a esta temperatura.

Cuando la superficie está a la temperatura de ampolla húmeda, el vapor de  $D_p$  en mm de Hg, es casi exactamente la mitad de la presión de ampolla húmeda en °C (13).

Se evidencia por la ecuación 4.67 que la magnitud de la velocidad constante depende de tres factores: 1) el coeficiente de transmisión de calor o de transferencia de masa, 2) la superficie expuesta al medio empleado para la desecación y 3) la diferencia entre las temperaturas o las humedades de la corriente de aire y la superficie de humedad del sólido.

Todos estos factores son variables externas como se indicó antes, el mecanismo interno de la circulación del líquido no afecta a la velocidad constante.

La expresión recomendada para el período de velocidad constante en la desecación desde superficies planas con la corriente de aire paralela a la superficie de evaporación, cuando no hay efecto de radiación, ni conducción, la da la siguiente expresión para la transmisión de calor (16)

$$-R_c A = W_s \frac{dx}{dt} = (0.0176 Ga^{0.8} A \lambda) (T_a - T_{BH})$$

Donde:

$T_{BH}$  = Temperatura de ampolla húmeda del aire que seca , °C.

En el dominio de número de Reynolds desde alrededor de 25 hasta 10,000 la ecuación que Mc Adams recomienda para calcular  $hc$  promedio por unidad de superficie, para esferas calentadas o enfriadas por aire. (17)

$$hcD_o/kf = 0.37 (V_{oo} \rho_{oo} D_o / \mu f)^{0.6} \quad (\text{Ec. 4.69})$$

Para número de Reynolds entre 1.0 y 25, puede usarse la ecuación:

$$hc = Cp V_{oo} \rho_{oo} [7.920/Re_D + 1.728/Re_D^{0.5}] \quad (\text{Ec. 4.70})$$

Donde:  $Kf$ : conductividad térmica del aire a temperatura media de película  $W/m^{\circ}K$

$V_{oo}$ : velocidad de la corriente libre, mls

$\rho_{oo}$ : Densidad de la corriente libre,  $kg/m^3$

$D_o$  : Diámetro exterior , m

$\mu f$  : viscosidad absoluta de la corriente libre, Pa s

$Cp$ : calor específico a presión constante  $J/kg \cdot ^{\circ}k$

$Re_D$ : número de reynolds.

Así, la ecuación 4.66 que conduce al tiempo de secado, se transformará para el período de velocidad constante en :

$$tc = Ws / A \quad dx/Rc = \quad Ws (X_1 - X_2) / ARc \quad (\text{Ec. 4.71})$$

Donde:

$t_c$ : tiempo de secado en el período de velocidad constante, hr.

$R_c$ : velocidad de secado en el período constante,  $\text{kg/hr-m}^2$ , la cual se calculará mediante la ecuación 4.67 y sustituyendo el coeficiente de transmisión de calor apropiado.

#### **4.6.3 CALCULO DEL TIEMPO DE SECADO EN EL PERIODO DE VELOCIDAD DECRECIENTE.**

La forma de la curva de velocidad decreciente es difícil de predecir. La forma dependerá, primeramente de la estructura del sólido que se va a secar del contenido crítico de humedad, y también de la velocidad de secado durante el período de velocidad constante. La velocidad del aire, que influye tan poderosamente en la velocidad constante.

La velocidad del aire, que influye tan poderosamente en la velocidad constante de secado, se vuelve menos importante a medida que la velocidad de secado disminuye. Este último período empieza cuando termina el de velocidad constante al llegar el material al contenido crítico de humedad. Si este es menor que el contenido final requerido, el período de velocidad constante constituirá todo el proceso de secado. Por otro lado, si el contenido inicial de humedad es menor que el contenido crítico, como es el caso de algunos materiales de secado lento, todo el proceso de secado estará comprendido en el período de velocidad creciente. En el caso más general, éste período se divide en dos zonas:

- 1) La zona de desecación superficial no saturado y 2) la zona cual rige la circulación interna del líquido.

En la zona de secado superficial no saturado, que se sigue inmediatamente después del punto crítico, la velocidad de secado varía linealmente con el contenido de humedad del sólido.

Los factores que influyen en la velocidad de secado durante el período de velocidad constante, producen efectos análogos sobre la velocidad de secado en esta zona, ya que el mecanismo de secado es esencialmente el mismo.

Ya que esta zona  $R = ax + b$ , siendo “a” y “b” constantes, diferenciando se obtiene  $dR = a dx$ , sustituyendo  $dx = dR/a$  en la ecuación 4.66 se obtiene el tiempo de secado necesario para esta zona,

$$td_1 = \frac{W_s}{A} \int_{x_2}^{x_1} dx/dR = \frac{W_s}{aA} \int_{R_2}^{R_1} dR/R = \frac{W_s}{aA} \ln R_1/R_2 \quad (\text{Ec. 4.7.2})$$

Siendo,  $td_1$ : el tiempo de secado en el primer período de velocidad decreciente, hr;  
 $R_1$  y  $R_2$  las ordenadas correspondientes a la humedad inicial y final, kg/hr-m<sup>2</sup>. La constante “a” es la pendiente de la curva y puede escribirse como:

$$a = \frac{R_c - R'}{X_c - X'}$$

Donde:  $R_c$ : velocidad en el primer punto crítico

$R'$  : velocidad en el segundo punto crítico, donde se rompe la linealidad entre R y X

$X_c$ : humedad libre en el primer punto crítico

$X'$ : humedad libre en el segundo punto crítico.

En algunos casos, una sola recta que pasa por el origen representa adecuadamente el período de velocidad decreciente. Si esta es la situación del punto crítico ( $X_c, R_c$ ) está localizada sobre la línea. Cuando se puede hacer esta aproximación teniendo en cuenta que  $b, R_c$  y  $X_c$ , desaparecen, que  $a = R_c/X_c$  que  $R_c/R_2 = X_c / X_2$ , se tiene:

$$t_d = W_s X_c a R_c \ln (X_c/X_2) \quad (\text{Ec. 4.73})$$

Siendo,  $t_d$  el tiempo en el período decreciente y  $X_2$  el contenido de humedad final del proceso. En el segundo período de velocidad decreciente, la velocidad de secado depende de la circulación del líquido dentro del sólido. Para algunos materiales la circulación del sólido rige todo el período de velocidad decreciente.

$$dx/dt = - \pi D_v / 4 S^2 (X_t - X_e) \quad (\text{Ec. 4.74})$$

La ecuación 4.74 establece cuando rige la difusión durante largos tiempos, la velocidad de secado es directamente proporcional al contenido libre de humedad y la difusividad del líquido y que el período de desecación varía con el cuadrado del espesor. Sin embargo, la ecuación sólo se verifica cuando  $(X_t - X_e) / (X_{t_1} - X_e) < 0.6$ .

Cuando este es mayor que 0.6 la velocidad de secado en función del contenido de humedad da una curva que cóncava hacia arriba.

El tiempo de secado para el período de velocidad decreciente ( cuando rige la difusión), se obtiene por integración de la Ecuación 4.74, la cual da:

$$t_d = 4S^2/\pi^2 Dv \ln \frac{X_t - X_e}{X_{t_1} - X_e} \quad (\text{Ec. 4.75})$$

#### 4.6.4 CURVAS DE VELOCIDAD DE SECADO.

Es conveniente para poder estimar esta rapidez, a partir del concepto “velocidad de secado”, como:

$$R = W_s/A \, dx/dt \quad (\text{Ec. 4.76})$$

Donde:  $W_s$ : peso de granos totalmente secos.

$A$ : área de transferencia de calor y masa

$dx/dt$ : razón de cambio de la humedad libre en el tiempo.

Derivando respecto, al tiempo, se obtiene:

$$dx/dt = -K' B' e^{-k' t} \quad (\text{Ec. 4.77})$$

$$R = W_s/A \, K' B' e^{-k' t} \quad (\text{Ec. 4.78})$$

Donde los valores de  $W_s$  y  $A$  dependen del volumen de granos que se esté secando.

El peso del sólido seco se encuentra partiendo de la definición de humedad base seca.

$$\begin{aligned} X_s &= \text{Peso del agua contenida en el grano} / \text{Peso de materia seca} \\ &= W_{H_2O} / W_s \end{aligned}$$

donde:  $W_{H_2O} = W_t - W_s$  ( peso total menos peso seco). Sustituyendo en Ec. 4.79 y despejando  $W_s$  se obtiene :  $W_s = W_t / X_s + 1$  (Ec. 4.80)

Suponiendo que todos los granos se encuentran en iguales condiciones de contacto con el aire, en toda su área exterior y por otro lado, que el aire no cambia sus características conforme atraviesa el lecho de granos (en lechos de espesor considerable y granos con muy alto contenido de humedad, esta aproximación puede resultar errónea). El área de transferencia se encuentra como el producto del área exterior de un grano por el número de granos en un volumen dado.

El número total de granos se encuentra multiplicando el número de granos de un lecho, con el máximo de granos posibles, que tenga con espesor el diámetro medio del grano, por el número máximo de granos posibles correspondiente a la altura del lecho de trabajo.

Siendo circular la sección transversal del secador, un cuadrado, con área idéntica a la circular, que tenga  $nD_o$  por lado donde  $n'$  es el número de granos de diámetro  $D_o$  plantea que:

$$n D_o \times n D_o = A \text{ secador}$$

$$\text{Entonces: } n^2 = A \text{ secador} / D_o^2$$

Sustituyendo los valores, se encuentra un valor para  $n'$  aproximado.

El número total de granos en el lecho de trabajo (N) es:

$$N = n^2 h / D_o \quad (\text{Ec. 4.81})$$

Siendo  $h'$  la altura del lecho de trabajo.

Luego, el área de transferencia A, es  $A = (A \text{ grano}) \times (N)$  (Ec. 4.82)

El área de un grano considerado esférico es  $0.283 \text{ cm}^2$ .

Suponiendo un peso ( $W_t$ ) de referencia, el cual corresponde al peso de una muestra 1, y deberá ser constante para muestras del mismo espesor, se obtiene los pesos para todos y cada una de los demás muestras. Los valores así obtenidos se sustituyen luego en la Ec. 4.78, para obtener la expresión matemática de la “velocidad de secado”.

El diseño de secadores, también es útil la relación de la velocidad de secado  $V_r$ . La humedad libre en base seca.

Partiendo del conocimiento de que :

$$X = B' e^{-kt} \quad \text{se tiene: } e^{-k't} = X/B'$$

Sustituyendo esta última expresión en la ecuación 4.78 se tiene,

$$R = W_s/A \quad K' X \quad (\text{Ec. 4.83})$$

#### **4.6.5 DETERMINACION DE LOS COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA.**

La ecuación 4.84 recomendada pro McAdams para determinar el coeficiente de convección en la transmisión de calor, cuando una multitud de partículas se calientan dentro de una corriente de gases calientes es:

$$hc \, Do / Kf = 0.37 (V_{oo} \rho_{oo} \, Do / \mu f)^{0.6} \quad (\text{Ec. 4.84})$$

Las propiedades del aire, según temperaturas de trabajo y asumiendo una presión atmosférica constante, para todos los casos de temperatura son:

T	Kf	$\rho_{00}$	Mp
(°C)	W/m - °k	Kgm/m <sup>3</sup>	kgm/m - seg.
40	0.0273	1.1292	1.98 x 10 <sup>-5</sup>
50	0.0279	1.0975	1.94 x 10 <sup>-5</sup>
60	0.0286	1.0658	1.90 x 10 <sup>-5</sup>

(Ref 17)

El caudal de aire de secado para todas las muestras es constante, por lo que también la velocidad lo es, para un diámetro de recipiente de secado D, el diámetro medio de grano es Do. Sustituyendo estos valores y los de la tabla anterior en la ecuación 4.84, se obtiene el coeficiente de transferencia hc.

Sherwood y Newman, expresan la difusión en esferas por la ecuación:

$$X_t - X_e / X_{t_1} - X_e = 0.608 e^{-9.87\beta} \quad (\text{Ec. 4.85})$$

donde se han despreciado los demás términos de la serie. Despejando

$$X_t = 0.608 (X_{t_1} - X_e) e^{-9.87\beta} + X_e.$$

Al comparar con la Ec.  $X_t = \beta' e^{-kt} + X_e$ , puede entonces ser igualadas los exponentes de e, es decir,  $9.87 \beta = K' t$  (Ec.4.87), sustituyendo  $\beta$  en Ec. 4.87:

$9.87 Dv \cdot T / r^2 = K' t$ , despejando Dv, se tiene

$$Dv = K' r^2 / 9.87$$

Siendo  $r_m = D_c/2$

Luego la difusividad  $D_v$  es:

$$D_v = K' D_o^2 \quad (9.87)(4)$$

$$D_v = K' D_o^2 / 39.48 \quad (\text{Ec. 4.88})$$

#### **4.7) MEMORIA DE CALCULO**

Para efectos de diseño se realizará el cálculo según las necesidades de un terreno, con un área de 4 ½ manzanas propiedad de María Petrona Guardado ubicado en Cantón Dolores, Apulo, Ilopango, Departamento de San Salvador.

#### **PARAMETROS DE DISEÑO**

- 1) Area cultivada: 4Mz.
- 2) Tipo de grano cultivado: Maíz H5.
- 3) Epoca de siembra: Mayo.
- 4) Epoca de cosecha: Noviembre.
- 5) Humedad Relativa para almacenaje recomendada: 10% - 13% (1).
- 6) Humedad Relativa Inicial del grano Maduro 28% (2).
- 7) Humedad Relativa promedio del ambiente del Mes de Noviembre 71% Ver tabla 3.12.
- 8) Temperatura promedio de bulbo seco para la ciudad de San Salvador en el mes de Noviembre: 22.4°C, Ver tabla 3.11.
- 9) Datos del Maíz H5: Color de grano Blanco, Rendimiento, 35 QQ/Mz.
- 10) Cantidad de granos a secar: Sembrando 4Mz de Maíz H5 con rendimiento de 90 QQ/Mz, se obtiene: 360 QQ de Maíz H5.
- 11) Asumiendo una eficiencia del colector solar de 40% para un colector solar plano con superficie absorvedora cubierta por una lámina transparente. (Ver Tabla 4.3)

## I) DETERMINACION DEL CALENTAMIENTO DEL AIRE

↳ Condiciones medias de la región son:

Temperatura: 22.4°C

Humedad Relativa: 71%

↳ Humedad final que se persigue: 12%

↳ El ventilador aumenta en 1°C la tempera

↳ Tendremos con una temperatura de 22.4°C y Humedad de 71%, la humedad de equilibrio de: 14.3% del cuadro 2.1 de la figura 4.1.

↳ Con el aumento que proporciona el ventilador en la temperatura esta aumentará a: 23.4°C, por lo que la humedad relativa cambia según el diagrama psicrometrico y de equilibrio y (figura 2.1 ver anexo) es igual a 69%, dando una humedad de equilibrio de: 13.98% (interpolando). (Cuadro 2.1 de la figura 4.1).

↳ Si aumentamos en 2.6°C la temperatura esta aumentará a 26°C, por lo que la humedad relativa cambia según el diagrama psicrometrico y es igual a 60%, obteniéndose una humedad de equilibrio de 12.3% (de cuadros 2.1 de la fig. 4.1).  
Que es una buena aproximación a la humedad final que se persigue.

↳ Como resultado el colector solar deberá aumentar la temperatura del aire en 2.6°C. Para obtener la humedad de equilibrio deseada de 12°C

$$20 \text{ QQ} = 1 \text{ Ton} \quad \Rightarrow \quad 140 \text{ QQ} = 7.0 \text{ Ton.}$$

Las dimensiones del silo para secar maíz a baja temperaturas con capacidad de 7.0 Ton. y con relación diámetro: altura más próxima 5.3 tiene dimensiones de: (ver tabla 4.1).

- ↪ Diámetro del silo (m) = 2.3 m
- ↪ Altura de capa de granos 2.25 m

### III) CALCULO DEL FLUJO, PRESION ESTATICA Y POTENCIA DEL VENTILADOR.

- ↪ El flujo de aire que se recomienda para el secado a bajas temperaturas por capas es de  $1.25 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s m}^3$  de capacidad estática del silo secador. (3)

Utilizando la Ec. 4.3 obtenemos el flujo nominal.

$$Q_n = F_e \times C_e$$

Conversión de Ton a  $\text{m}^3$

$$C_e = \frac{\text{Capacidad Estática del silo (Ton)}}{\text{Masa Especifica del grano (ton/m}^3\text{)}}$$

Donde:

- Masa especifica del maíz =  $0.75 \text{ ton/m}^3$  (1)
- Capacidad estática del silo = ton

$$C_e = \frac{7.0 \text{ ton}}{0.75 \text{ ton/m}^3}$$

$$C_e = 9.33 \text{ m}^3 \quad \text{y} \quad f_e = 1.25 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s m}^3$$

Por lo tanto:

$$Q_n = f_e \times C_e$$

$$Q_n = (1.25 \times 10^{-2}) \quad (9.33)$$

$$Q_n = 0.117 \text{ m}^3/\text{s}$$

↳ La presión estática, con un flujo específico de  $1.25 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$  por  $\text{m}^3$  y una capa de granos de 2.25m (se obtiene del cuadro 4.10) es de:

$P_e$  = Presión estática

$$P_e = 0.088 \text{ Kpa}$$

↳ Así, aceptado que 1.25 es el coeficiente de seguridad (3) del flujo de aire, por lo que el ventilador debe cumplir con las especificaciones.

$Q$  = Flujo del ventilador Real

F.S = Factor de seguridad

$P_e$  = Presión Estática

El flujo real del ventilador se obtiene de la Ec. 4.4.

$$Q = Q_n \times F_s$$

$$Q = (0.117 \text{ m}^3/\text{s}) (1.25)$$

$$Q = 0.146 \text{ m}^3/\text{s}$$

↳ Por lo tanto el ventilador deberá cumplir con las especificaciones siguientes:

- Flujo de Aire  $0.146 \text{ m}^3/\text{s}$

- Presión Estática  $0.088 \text{ Kpa}$

#### IV) CALCULO DE LA POTENCIA DE CALENTAMIENTO

Para este calculo se utilizará la Ec. 4.24

$$N_a = 1206 \times Q \times \Delta T$$

Donde:

$$Q = 0.146 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\Delta T = 2.6^\circ\text{C}$$

$$N_a = (1206) (0.146) (2.6)$$

$$N_a = 457.8 \text{ Wtts.}$$

$N_a = 0.4578 \text{ Kw} \Rightarrow$  Que es la potencia que hay que transferir al aire por el sistema de calentamiento.

↪ Asumiendo para nuestro diseño una eficiencia del 40% (3) y utilizando la Ecuación 4.25 se obtiene la potencia necesaria del colector será:

$$N_{ac} = \frac{N_a}{n_c}$$

$$N_a = \text{Potencia de calentamiento} = 0.4578 \text{ KW}$$

$$N_c = \text{Eficiencia del colector} = 40\% (0.4)$$

$$N_{ac} = \frac{0.4578}{0.4}$$

$$N_{ac} = 1.14449 \text{ Kw}$$

## V) CALCULO DE LA SUPERFICIE DEL COLECTOR SOLAR

- ↳ Durante la época del año en que se utiliza el sistema, la radiación media diaria es de  $794 \text{ w/m}^2$ , para una superficie inclinada con una disponibilidad de sol de 10 horas (Ver anexo II) y el Color Solar tendrá que promover un calentamiento promedio del aire de  $2.6^\circ\text{C}$ .
- ↳ La potencia de calentamiento del colector es de  $N_{ac} = 1.1445 \text{ Kw}$ , por lo que la cantidad de Energía Solar que tendrá que llegar a la superficie del colector para producir el calentamiento diario que se desea; se puede determinar por la Ec. 4.26.

$$E = \frac{Q_c T}{V_e} = N_{ac} \times t_p$$

Donde:  $N_{ac}$ : Potencia del colector  
 $t_p$ : Tiempo de captación.

$$T_p = 8 \text{ hrs} = 8 \text{ h} \times \frac{3600 \text{ S}}{1 \text{ h}} =$$

$$t_p = 28800 \text{ S}$$

$$N_{ac} = 1.14449 \text{ Kw} =$$

$$N_{ac} = 1.14449 \text{ Kj/s}$$

$$E = 1.14449 \text{ Kj/s} \times 28800$$

$$E = 32961.312 \text{ KJ}$$

- ↳ Como la radiación media diaria es de  $794 \text{ w/m}^2 = 794 \text{ J/s/m}^2$  para 48 horas de sol.

8 horas = 28800 Seg.

Por lo que  $I = 794 \text{ J/s/m}^2 \times 28800 \text{ Seg.}$

$$II = 22867200 \text{ J/s} \Rightarrow I = 22867.2 \text{ KJ/m}^2$$

↪ El área del colector se obtendrá mediante la ecuación 4.27.

$$A = \frac{E}{I}$$

I

Donde  $E = 3229611.312 \text{ KJ}$

$$I = 22867.2 \text{ KJ/m}^2$$

$$A = \frac{3229611.312}{22867.2}$$

$$22867.2$$

$$A = 1.44 \text{ m}^2$$

Por tanto el área del colector solar necesaria para promover un calentamiento de  $2.6^\circ\text{C}$  es de  $1.44 \text{ m}^2$

↪ Si se utiliza lámina de vidrio de 3mm de espesor.

## **VI) METODO ALTERNATIVO PARA CALCULAR EL AREA DEL COLECTOR**

Un método alternativo para calculo de el área necesaria para el colector, es al que describiremos a continuación.

Básicamente es el replantamiento de la Ec. 4.32.

$$G \Delta P (T \alpha)e = Q_u + Q_{\text{perd}} + d_{\text{ec}}/d_t$$

En donde:  $d_{\text{ec}}/d_t$ ; que representa el almacenaje de energía con respecto al tiempo es cero.

:  $(T \alpha)e$ : que representa el producto efectivo de la transmitancia-absorbancia de la placa-cubierta es igual a:  $1.02 T\alpha$ .

Partiendo de que se conoce una eficiencia según el tipo de colector propuesto; tenemos que el área de colección será:

$$\Delta_p = \frac{Q_u}{G(1.02 T\alpha)n}$$

En donde el término nuevo es "N" que representa la eficiencia del colector en porcentaje del colector en cuestión.

Con los parámetros de diseño expuestos anteriormente tenemos:

$$\Delta_p = \frac{457 \text{ watt}}{794 \text{ watt} [(1.02) (0.9) (0.91)]0.4 \text{ m}^2}$$

$$\Delta_p = 1.74 \text{ m}^2$$

Este resultado es mayor que el anterior, por seguridad nos inclinamos por este valor.

$Q_u$ : Calor a promover por el colector.

$G$ : Radiación instantánea.

$\alpha$ : Absorbencia placa

$T$ : Transmitancia cubierta.

## VIII) CALCULO DE LA PERDIDA DE PRESION EN DUCTOS Y DIAMETRO DE DUCTOS.

↳ Para efectos de cálculo ver figura 6.1

↳ Si elegimos una caída de presión de 0.10' H<sub>2</sub>O por cada 100 pies de trayectoria tenemos.

$$Q = 0.146 \text{ m}^3/\text{s} = 309.37 \text{ p}^3/\text{min}$$

Con los valores de pérdida y caudal encontramos el diámetro de los ductos utilizando la tabla de la figura 4.6.

Diámetro de ducto = 10"

↳ Caída de presión en el sistema de ductos:

- Sumamos las longitudes de la trayectoria de ducto = 25m = 82 pies.
- Longitudes equivalentes de los accesorios
  - Zapato conector tipo "I" (Ver figura 4.9) = 5 pies son 3 zapatos por lo tanto =  $5\text{p} \times 3 = 15 \text{ pies}$ .
  - Codo 90° segmentado (Ver figura 4.8) = 10 pies (Tipo "E") son 5 codos por lo tanto =  $10\text{p} \times 5 = 50 \text{ pies}$ .
  - Codo 45° segmentado (Ver figura 4.8) (tipo "D") = 5 pies.

- Considerando el colector como un ducto rectangular de longitud = 2 mts 6.56 pies.

Longitud Total = (log de trayectoria + long. de accesorios.

$$L_t = 82 \text{ pies} + 15 \text{ pies} + 10 \text{ pies} + 5 \text{ pies} + 6.56 \text{ pie.}$$

$$L_t = 158.6 \text{ pies}$$

Entonces la caída de presión es:

$$158.6 \text{ pies} \times \frac{0.10'' \text{ H}_2\text{O}}{100 \text{ pies}} = 0.1586'' \text{ H}_2\text{O}$$

Haciendo la conversión:  $\frac{1 \text{ pa} \times 0.1586'' \text{ H}_2\text{O}}{4.015 \times 10^{-3} \text{ H}_2\text{O}} = 39.5 \text{ Pa} = 0.0395 \text{ Kpa.}$

Comercialmente la presión estática se maneja en pulg. de H<sub>2</sub>O por lo que el ventilador deberá cumplir con una presión de succión y una de descarga en la succión será la resistencia al flujo por el sistema de ductora y en la descarga la resistencia debida al producto a secar.

$$P_e \text{ succión} = 0.1586'' \text{ H}_2\text{O}$$

$$P_e \text{ descarga} = 0.088 \text{ Kpa} = 0.353'' \text{ H}_2\text{O}$$

Así la presión estática del ventilador será:

$$P_{ev} = 0.1586 + 0.3533'' \text{ H}_2\text{O}$$

$$P_{ev} = 0.5119'' \text{ H}_2\text{O} = 0.1275 \text{ Kpa}$$

$$Q = 0.146 \text{ m}^3/\text{s}$$

### Calculo de Cargas en el Silo

Datos:

↪ Diámetro del silo: 2.3m

↪ Altura de granos: 2.25m

↪ Densidad del grano (Ver cuadro 4.14):  $718 \text{ kg/m}^3$

↪ Angulo de Rozamiento Interno ( $\Theta$ ) (ver cap. 4.6):  $22^\circ$

↪ Coeficiente de rozamiento del grano contra el muro: ( $\mu$ ) (Ver cuadro 4.13) :  
0.246.

↪ Contenido de humedad del grano: 12%

### Para depósito poco profundo

↪ Carga lateral aplicada a los muros verticales (L)

$$I = DFE \times H$$

$$\text{Donde: } DFE = r \text{tg}^2 (45^\circ - \Theta/2)$$

r = densidad de grano

H = altura de granos

$$L = DFE \times H$$

$$DFE = (718 \text{ Kg/m}^3) (\text{tang}^2 (45 - 22/2))$$

$$DFE = 326.66 \text{ Kg/m}^3$$

$$L = (326.66 \text{ Kg/m}^3) \times (2.25\text{m})$$

$$L = 735 \text{ Kg/m}^2$$

Carga verticales aplicadas a los muros verticales

$$V = \mu \times L$$

Donde:  $\mu$  = coeficiente de rozamiento del grano contra el muro

$$V = (0.246) (735 \text{ Kg/m}^2)$$

$$V = 180.8 \text{ Kg/m}^2$$

Cargas verticales sobre suelos horizontales: ( $V_1$ )

$$V_1 = DFE \times H$$

$$V_1 = 326.66 \times 2.25\text{M}$$

$$v_1 = 734.98 \text{ Kg/m}^2$$

## REFERENCIAS DEL CAPITULO.

- 1) Secado de Granos: Naturales, Solar y a bajas temperaturas.

FAO, Imp. Gran Brasil, 1985.

- 2) ASAE- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAS ENGINEERS.

Agricultura engeneers book, 1981, Michigan.

- 3) DESECACION Y ALMACENAMIENTO DE GRANOS.

p.e BERRY

DE. ACRIBA Zaragoza, 1973, España.

- 4) Buffalo Force Company.

Fan Engineering, Seventh edition, published by Buffalo Force Company, New York, 1975.

- 5) ASHRAE, Guide and Data Book. 1985.

- 6) Modern Refrigeration and Air Conditioning.

ALTHOUSE, TURNQUIST, BRACCIANO, The Good Heart-Willcox Company, Inc. Illinois, 1975.

- 7) Manipulación y Almacenamiento de Granos Alimenticios en las zonas tropicales.  
D.W., Hall, Roma, 1971.  
ED. ONU, para la agricultura y la alimentación.
- 8) Chang, DT, CUNHG, DS, A. HIDGES, T.O.  
Grain dryer Selection Model. ASAE.  
Michigan, 1979.
- 9) Kreith F, Principios de Transmisión de calor.  
Sao Paulo, Ed. Edgard Blucher Ltda., 1975.
- 10) Claudio Mataix, Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas.  
Ed. Harper A. Row., 1975
- 11) Almanaque Salvadoreño.  
Ministerio de Agricultura y Ganadería.  
Centro de Recursos Naturales.  
Servicio de Meteorología e Hidrología. E. S. C. A.
- 12) Souza Nunes  
Energía Solar, et , 1979.

- 13) Solar Engenneering and Thermsal Process.  
Duffie J.A. and Beckman W.A.  
John Willeyd an Sons, N. Y. 1980.
  
- 14) Diseño de una Planta Piloto para Inv. Experimentales de Sistemas de Aprovechamiento de Energía Solar y de un Sistema de Termosifon para calentamiento de agua.  
Trabajo de Graduación, Esc. de Ing. Mecánica. UES. 1990.
  
- 15) Instituto Salvadoreño de Recursos Naturales. Anuario Forestal (1980-1981).
  
- 16) Fundamentals of Fluid Mechanics and Heart Tranfer.  
F, Kreinth / J. Kreider.  
MC. Graw-Hill, 1978
  
- 17) Reunión Anual del Programa Cooperativo, C.A. para granos 1971.
  
- 18) Solar Heating and Cooling.  
Jackson Hand  
Popular Science Books, 1986. USA.

## BIBLIOGRAFIA

- 1) Curso Nacional de Alimento y Conservación de Granos., ED ANAC ITCA. QUITO GUAYAQUIL 1976, Pags. 1-32.
- 2) P.E. BERRY, DESECACION Y ALMACENAMIENTO DE GRANOS, ED ACRIBA ZARAGOZA (ESPAÑA) 1973, Pags, 185-232.
- 3) Almanaque Salvadoreño 1990.  
Ministerio de Agricultura y Ganadería. Centro de Recursos Naturales Pags. 50-60.
- 4) Diseño, Construcción y Pruebas de un Deshidratador Solar de Productos Agrícolas.  
Trabajo de Graduación  
↳ Luis Pérez Minero  
↳ Humberto Baños Serrano  
↳ Sergio Antonio Ramos  
Facultad de Ingeniería Mecánica. UES, 1992.
- 5) Solar Heating and Colling  
Jackson Hand  
Popular Science Books. 1986. USA
- 6) Desecación y Almacenamiento de granos  
BERRY  
DE. ACRIBA, ZARAGOZA, ESPAÑA, 1973.
- 7) Manipulación y Almacenamiento de Granos Alimenticios en la Zonas Tropicales.  
Hall - ED. ONU para la agricultura y la alimentación  
Roma, 1971.

- 8) Curso Nacional de Almacenamiento y Conservación de Granos.  
Quito y Guayaquil, 1976  
ED. ENAC, IICA
  
- 9) Claudio Mataix.  
Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas  
DE. HARPER Y ROW, 1975.
  
- 10) Kreith, Frank  
Principios de Transferencia de Calor, 1ª. Edición.  
ED. Herrera Hermanos Sucesores, S.A.  
México, 1970.
  
- 11) Diseño, Construcción y Pruebas de un Deshidratador Solar de Productos  
Agropecuarios.  
Bolaños, J. Pérez M., O. Ramírez G., S. Ramos  
Escuela de Ingeniería Mecánica.  
UES, 1992

## RECOMENDACIONES

- Construir un colector para el calentamiento de aire y poder así evaluar su comportamiento térmico.
- Construir un equipo de laboratorio para medir caídas de presión en lechos granulares ante un flujo de aire.
- Impulsar el desarrollo de proyectos prácticos para aprovechar la energía solar como parte integral de la educación superior.
- Estimular el intercambio de información con universidades u otros entes para discutir los resultados prácticos en la utilización de la energía solar.
- Estimular proyectos de investigación reflejen el ahorro y optimización de recursos al usar la energía solar como un medio complementario alternativo.

**ANEXO 1.**

## ENCUESTA

1) Nombre del entrevistado:

2) Lugar:

Departamento:

Municipio:

3) Que granos cultiva en este lugar?

Maíz

Sorgo

Arroz

Frijol

Otros: \_\_\_\_\_

4) Qué granos cultiva en mayor cantidad, desde cuanto y por qué no siembra otros?

5) Qué cantidad cultiva y que destino tiene?

6) Para este grano, cuál es el procedimiento que sigue desde la siembra hasta el almacenamiento del producto?

7) A qué plagas está expuesto su cultivo?

8) Durante la etapa de secado cuáles son los mayores problemas con los que se enfrenta?

Lluvia

Viento

Animales

Transporte

Pocos asoleaderos

Otros \_\_\_\_\_

9) Cómo disminuye los problemas del secado?

10) Cuántos granos se pierde aproximadamente por los problemas de secado?

11) Cuánto es la cantidad de terreno que utiliza para el secado?

12) Si el secado no se lleva acabo en el terreno actual; podría hacer algún tipo de cultivo en este terreno?

**ANEXO 2.**

ESPECIFICACIONES TECNICAS PROYECTO  
"DISEÑO DE SECADOR SOLAR DE GRANOS"

A. COLECTOR DE PLACA PLANA

a.1 Cubierta.

La cubierta será de vidrio flotado color gris con clasificación vidrio claro de 3 ó 4 mm de espesor, con efecto estético transparente con un porcentaje de transmisibilidad del 90% y de bajo contenido de hierro, con dimensiones acorde a planos y cumpliendo con normas de la PPG THE RIGHT GLASS CO.

a.2 Superficie de Colección.

De lámina de aluminio de 1/64" (0.4mm) de espesor con una absorbencia entre 0.9 y 0.92; pintada con pintura negra mate con una emisividad = 0.96 y una absorbencia de 0.95, de dimensiones de acuerdo a planos.

a.3 Aislante Térmico.

Aislante de fibra de vidrio de 1/2" (13mm) de espesor con una conductividad térmica "K" de 0.038 w/m °C; del tipo placa prefabricada y con barrero a prueba de Vapor de Agua.

a.4 Estructura.

La estructura será de madera de pino Amarillo, con espesor de paredes perimetrales de 1/2" (13mm); espesor para el fondo de 3/4" (19mm); con conductividad térmica "K" de 0.147 w/m °C. Su acabado externo será con 3 capas de varniz tipo marino y con resistencia a la ralladura para garantizar la poca absorción de agua lluvia. Los elementos estructurales de soporte serán del mismo tipo de madera especificada en este apartado y con dimensiones de según planos.

## B. SISTEMA DE VENTILACION MECANICA

### b.1 Ventilador

Deberá portar el sella AMCA que lo valida para el comportamiento con aire y presión estática requerida, con sistema de transmisión de potencia mecánica dimensionada para un mínimo del 150% de las HP de la potencia requerida.

El cuerpo principal de lámina de hierro con las aristas y rebordes redondeados para deflectar eficazmente el efluente de aire y lograr mayor resistencia estructural y mecánica.

Conjunto construido con ensamble tal que la remoción de pocos fijadores permita la remoción total de la unidad de potencia mecánica y el rodete, con el propósito de facilitar la ejecución de las labores de servicios y limpieza.

El rodete del ventilador, estática y dinámicamente balanceado para asegurar la generación mínima de vibración en funcionamiento, del tipo centrífugo, de diseño y fabricación con aletas curvadas con inclinación hacia atrás, con venturi de admisión capaz de garantizar máximo rendimiento.

Las aletas, el cono de admisión y la placa posterior de montaje y fijación fabricados de aluminio y fijados entre sí en forma fácil y segura, además deberá estar provisto de un malla contra pájaros y roedores.

De preferencia con base de montaje sujeta al cuerpo principal suministrada de fábrica y de materiales compatibles con aisladores de Neopreno en puntos claves para minimizar vibraciones de alta frecuencia; el ventilador tendrá que desarrollar 310 cfm contra una presión estática de 0.52" de Agua.

El motor será del tipo para trabajo pesado en régimen continuo, montado sobre cojinetes de bola permanentemente lubricados; con un mínimo de vida útil de 200,000 horas de funcionamiento, a la velocidad máxima indicada, moviendo la carga mecánica impuesta, para ser conectado a un servicio

de 120/208 vca - 1 fase - 60 ciclos.

Deberá estar equipada de : un medio de protección y desconexión inmediata alojado en gabinete metálico NEMA 3R con piloto visual local o remoto de la indicación. "EN FUNCIONAMIENTO" estratégicamente localizados.

La conexión eléctrica se hará en tubo de pvc de 1/2" (13mm) para instalación subterránea con calibres de conductor y fusible de acuerdo a los planos.

## b.2 Ductos y Soportes

Los ductos de ventilación deberán construirse de lámina lisa de acero galvanizado con cubierta de Zinc, fabricado bajo norma ASTM A525-67 para Lámina de acero galvanizado por inmersión en caliente.

En proceso de fabricación de los ductos se utilizarán los siguientes calibres de láminas, basado en ductos de ventilación que trabajarán con la presión estática de 1" (25mm) de columna de Agua.

hasta 12" cal. 26  
de 13" a 30" cal. 24

Los ductos soportados por medio de estructura secundaria de hierro angular de 1x1x1/16 y cincha de lámina cal. 22 fijada al cuerpo de los ductos con tornillo autorroscante para lámina de  $\varnothing$  3/16" x 1/2", y fijada al durmiente angular por medio del conjunto tornillo tuerca y arandela de  $\varnothing$  1/4" x 3/4", los durmientes deberán estar pintados con pintura anticorrosiva para evitar degradación por efecto de la intemperie.

Los conectores tanto en la entrada como en la descarga del ventilador deberán estar provistos de juntas flexibles de lona o canvas de un solo cuerpo con flange para atornillar a los ductos y ventilador de 2" (50mm) de ancho y dimensiones según conexión de campo.

### C. SILO SECADOR

El cuerpo principal será de láminas galvanizada cal. 18 con uniones por medio de remache de fierro galvanizado de diámetro nominal 7/16" (11.1mm) con refuerzos en forma de anillo abarcando el perímetro del cuerpo con pletina de fierro de medidas 1/8" (3.18mm) de espesor y 1 1/2" (38mm) de ancho.

El cuerpo deberá tener aberturas en la parte superior para desalojar el aire desecante con dimensiones y forma especificada en planos, también deberá estar provisto de aberturas para carga y descarga de granos a desecar; las aberturas superiores deberán estar provistas de malla metálica contra insectos, roedores y pájaros; con dimensión del tejido de 2x2 mm.

Todos los cortes y perforaciones ejecutadas en la lámina que puedan dar lugar a corrosión por la pérdida del baño galvánico deberán tratarse con pintura galvanizadora "Galvanite" o similar para proteger el metal; se aceptará pintura anticorrosiva aplicada con la previa limpieza de los materiales para garantizar la buena adherencia en el metal.

**ANEXO 3.**

PARTIDA No.	DESCRIPCION	CANTIDAD	UNIDAD	PRECIOS UNITARIOS DESGLOSADOS			PRECIO UNITARIO	SUB- TOTAL	TOTAL PARTIDA
				COSTO DIRECTO		COSTO INDIRECTO			
				MATERIALES	MANO DE OBRA				
00.00	COLECTOR SOLAR DE PLACA PLANA								
0.01	MADERA DE PINO AMARILLO 1/2"x5" ANCHO	7	ml	10.50	2.10	3.40	16.00	112.00	2,141.70
02	MADERA DE PINO AMARILLO 1/2"x2" ANCHO	7	ml	6.30	0.90	2.16	9.36	65.52	
03	MADERA DE PINO AMARILLO 3/4"x11" ANCHO	7	ml	15.45	3.10	5.00	23.55	163.45	
04	MADERA DE PINO AMARILLO 2"x2"	3	ml	13.25	2.70	16.00	31.95	95.85	
05	VIDRIO ORIS FLOTADO DE 4MM DE 1.37x1.37	1	c/u	450.00	40.50	132.40	62.00	62.00	
06	FIBRA DE VIDRIO DE 1/2" DE ESPESOR POR 48" ANCHO	2	ml	72.50	7.97	21.72	102.19	204.38	
07	ANGULO DE ALUMINIO DE 1/2"x2"	6	ml	13.40	20.93	9.26	43.59	261.54	
08	EMPAQUE DE HULE 3MM ESPESOR POR 13MM ANCHO	12	mt	23.50	5.40	28.90	57.80	693.60	
09	LAMINA DE ALUMINIO DE 1/64" ESPESOR 1.32x1.32M	1	c/u	273.50	24.61	80.48	378.59	278.59	
10	CLAVO DE HIERRO DE 1 1/2" DE LARGO	2	Lbs	5.75	0.63	1.70	8.08	16.16	
11	TORNILLO AUTOROSCANTE TIPO GOLOSO DE $\phi$ 1/8"x2"	70	c/u	0.34	0.10	0.11	0.55	38.50	
12	SEDOSO METALICO DE TAMAÑO 1MMx1MM	10	Yda	9.30	1.10	2,808.00	13.20	132.00	
13	PINTURA NEGRO MATE	0.25	Gln.	69.20	5.53	1.40	76.13	19.03	
0.1.00	PINTURA NEGRO MATE								
0.1.01	DUCTO DE LAMINA GALVANIZADA CALIBRE 26 $\phi$ 10"	12	ml	79.00	7.11	23.35	109.56	1,314.72	5,966.72
02	FUELLE FLEXIBLE ANTIVIBRACION $\phi$ 10"x3" ANCHO	12	ml	35.00	7.00	11.34	53.34	106.68	
03	VENTILADOR CENTRIFUGO 300 CTM Y 0.5" H20	1	c/u	2,375.00	261.00	709.00	33.45	33.45	
04	SOPORTERIA Y FIJACION	1	s.g	430.00	516.00	255.40	1,201.40	1,201.40	
0.2.00	SILO SECADOR								
01	LADRILLO DE BARRO ROJO, 270x70x120MM	750	c/u	0.80	0.15	0.26	1.21	907.50	14,769.27
02	BOLSA DE CEMENTO TIPO PONTLAND DE 100LBS	15	c/u	37.50	4.10	11.23	52.83	792.45	
03	PIEDRA CUARTA	2	M3	200.00	18.00	58.86	276.86	553.72	
04	LAMINA GALVANIZADA COL 18 3x1 YDA	18	c/u	421.00	46.31	126.17	593.48	10,682.60	
05	LAMINA GALVANIZADA COL 24 3x1 YDA	4	c/u	195.00	21.45	58.45	274.90	1,099.60	
06	PERNO GALVANIZADO $\phi$ 3/16x1" LARGO	230	c/u	0.47	0.10	0.15	0.72	165.60	
07	EMPAQUE DE HULE 3MM ESPESOR POR 1/2" ANCHO	1	ml	23.50	2.30	7.00	32.80	32.80	
08	REMACHE Ho. GAL. $\phi$ 1/16x3/4"	500	c/u	0.70	0.15	0.22	1.07	535.00	



Sección A-A



Detalle A escala 1:25



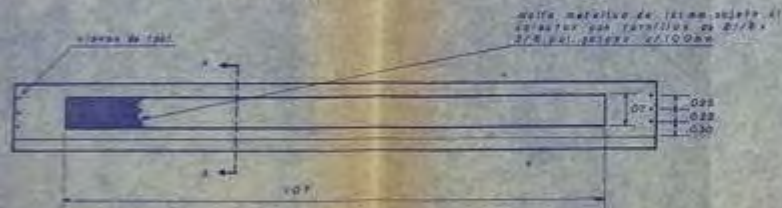
Lateral



Fronte

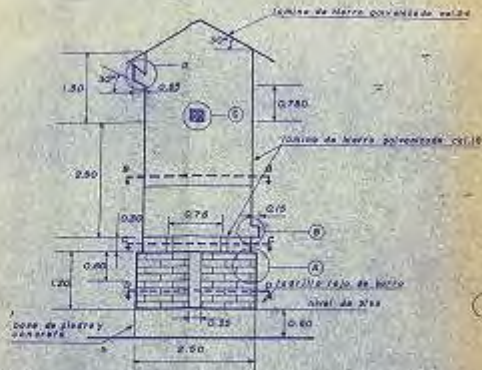
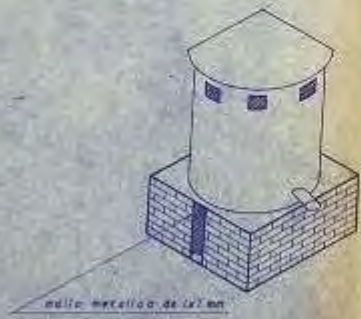


Escala 1:5

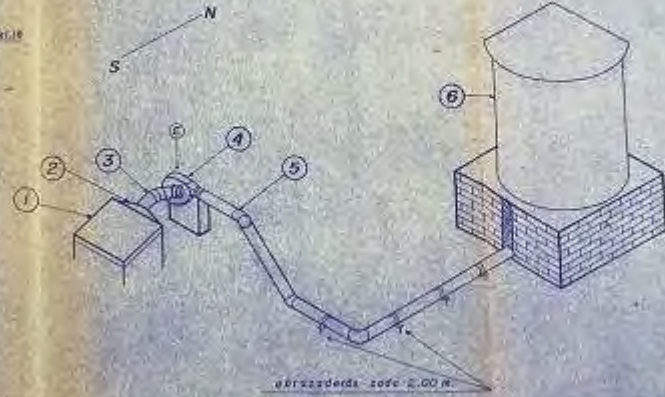


Sección A-A escala 1:25





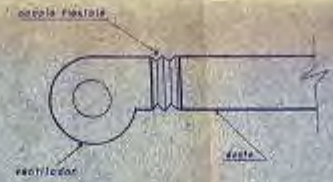
Sección A-A escala 1:50



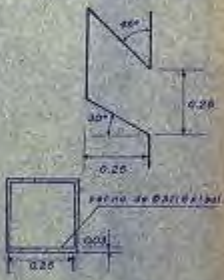
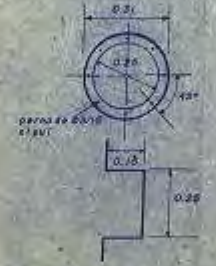
Detalle A esc 1:20



Detalle C esc 1:50



Detalle E sin escala  
acople ducto ventilador



CLAVE	DESCRIPCION
1	Colector Solar
2	Zapato Conector
3	Aislador de Vibracion
4	Ventilador
5	Codo
6	Silo Secador

FECHA: 17-12-97	ALUMNOS: Jorge E. Centeno Mauricio Machado	ESCALA: Indicada
UDon Bosco		INDICADA: 1/2
Diseño de un Secador Solar para Granos		