

1974
#4161
1.000,00

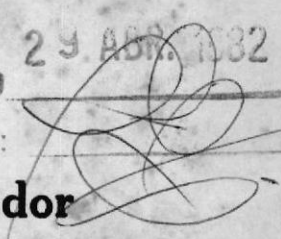
27

T
660.28426
P651

Verso
20-05-82

ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

INVENTARIADO 29 ABR 1982
USABLE: 

**“Diseño y Construcción de un Secador
Experimental de Granos Utilizando
Energía Solar”**

D-4161

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:
INGENIERO MECANICO

Presentada por:
FLORENCIO PINELA C.



GUAYAQUIL – ECUADOR
1981

Logo of ESPOL (Escuela Superior Politecnica del Litoral) with the year 1969 and the acronym CIB. A barcode is present with the alphanumeric code *D-4161* printed below it.

AGRADECIMIENTO



BIBLIOTECA

AL ING. MARCO PAZMINO
Director de Tesis, por
su ayuda y colaboración
para la realización de
este trabajo:



BIBLIOTECA

DEDICATORIA

BIBLIOTECA



A MIS PADRES

A MIS HERMANOS

A MI ESPOSA

A MI HIJO



BIBLIOTECA

Marco Pazmino

ING. MARCO PAZMINO

Director de Tesis



BIBLIOTECA




BIBLIOTECA

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta Tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ES CUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL).


.....
Florencio Pinela Contreras



BIBLIOTECA

INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN	1
CAPITULO I	2
- <i>Introducción</i>	2
I-1 <i>Sistemas posibles de secado</i>	11
I-2 <i>Secado de granos por combustión</i>	11
I-3 <i>Secadores solares de granos</i>	13
CAPITULO II	25
- <i>Factibilidad del secado solar de granos</i>	25
II-1 <i>Radiación solar utilizable en la costa del Ecuador.</i>	26
II-2 <i>Panorama de consumo en el Ecuador</i>	26
II-3 <i>Importancia del secado para la conservación</i>	27
II-4 <i>La alternativa solar</i>	28
II-5 <i>Conclusiones</i>	29
CAPITULO III	30
- <i>Fundamentos Teóricos</i>	30
III-1 <i>Equilibrio</i>	32
III-2 <i>Clases de humedad.</i>	33
III-3 <i>Período de secado</i>	34
III-4 <i>Ecuaciones teóricas para los períodos de secado.</i>	38
CAPITULO IV	41
- <i>Diseño y Construcción de un prototipo experimental</i>	41
IV-1 <i>Productos a secar: Arroz y Maíz</i>	41
IV 1-1 <i>Procedimiento</i>	41
IV 1-2 <i>Aparatos</i>	41
IV 1-3 <i>Mediciones</i>	50

	Pág.
IV 1-4 Resultados	61
IV 1-5 Obtención de la curva de secado	65
IV-2 Determinación del área de colección	65
IV 2-1 Pérdidas térmicas en la cabina de secado.	65
IV 2-2 Energía útil	71
IV 2-3 Energía requerida para el secado	73
IV 2-4 Período de secado; influencia del espesor.	77
IV 2-5 Flujo de aire	77
IV 2-6 Eficiencia del colector solar	79
IV-3 Determinación de la potencia del ventilador (extractor).	81
CAPITULO V	84
- Conclusiones y Recomendaciones	84
- Anexos	87
- Bibliografía	94

RESUMEN

Este proyecto tiene como finalidad principal aunque no única, la de la conservación de los alimentos.

Como se sabe, existen muchos productos que solo se dan en uno o dos temporadas al año; la factibilidad de transporte, peso de producto, pérdidas de calidad, etc., son factores que justifican la finalidad del proyecto.

El proyecto contempla el diseño y la construcción de un prototipo experimental para determinar parámetros tales como: tiempo de secado, energía requerida para el secado, área de colección, eficiencia del colector solar, etc.

CAPITULO I

INTRODUCCION

De los muchos problemas que existen en nuestro país, uno de ellos es y seguirá siendo por muchos años un problema latente, es el de la alimentación; siendo parte importante en la cadena productora de alimentos la necesidad de secar el grano para poderlo almacenar sin peligro de daños hasta que se necesite para su consumo.

Los deficientes procesos de secado y almacenamiento de granos existentes cuestan al país fortunas cuantiosas. Por ejemplo: En el invierno de 1.980 se perdió aproximadamente el 7% de la producción de arroz, lo que equivale a decir 1085.4 TM.

Según datos obtenidos del departamento de estudios económicos, reponer esta pérdida con arroz de importación cuesta mucho más. Aceptando existen pérdidas semejantes en otros granos de también primera necesidad, como el frejol, el trigo, el maíz, etc. Las cifras por sí justifican cualquier esfuerzo por minimizar tan enormes pérdidas.

En el Ecuador se dispone de varias técnicas primitivas pero muy efectivas, económicas y de fácil implementación, para el secado de granos, como la de esparcirlos sobre superficies de cemento para secarlos por asolamiento, o almacenarlos en lugares más o menos ventilados que por procesos de convección natural secan el grano eventualmente. Lo malo es que en general estas técnicas no pueden aplicarse en climas húmedos, y como en estos la productividad de la tierra es mayor,

MINISTERIO DE AGRICULTURA Y GANADERIA
PROGRAMA NACIONAL DEL ARROZ; CONTROL DE PILADORAS Y MOLINOS
SUPERFICIE SEMBRADA, COSECHADA, RENDIMIENTO, PRODUCCION Y CONSUMO DE ARROZ EN LA REPUBLICA DEL ECUADOR

ANO	HAS. SUP. SEMBRADA	HAS. SUP. COSECHADA	RENDIMIENTO KG/HA	PRODUC. ARROZ CASCARA T. M.	PRODUC. ARROZ PILADO T. M.	CONSUMO ANUAL QUINTALES ARROZ PILADO
1964	106.282	106.282	2.258	239.990	136.794	1'958.000
1965	101.729	101.729	2.610	265.545	151.361	2'000.000
1966	101.166	86.133	3.230	278.196	158.572	2'032.000
1967	108.561	74.737	3.211	239.980	136.782	2'080.000
1968	110.649	42.658	3.244	138.380	78.877	2'152.800
1969	103.106	103.106	2.661	274.341	156.374	2'202.148
1970	82.513	76.000	3.028	230.090	138.054	2'247.218
1971	75.766	70.516	2.803	197.665	118.599	2'325.140
1972	87.782	79.782	2.399	191.425	114.855	2'405.732
1973	86.775	82.775	2.802	231.898	139.139	2'489.118
1974	124.417	101.092	992	302.482	181.489	2'572.593
1975	146.240	135.400	2.791	377.905	226.743	3'024.912
1976	135.090	126.340	2.705	344.398	206.639	3'180.000
1977	115.000	103.000	3.100	319.300	191.580	3'450.000
1978	86.000	81.100	2.775	225.053	135.032	3'745.478
1979	115.765	110.327	2.882	317.943	164.939	4'067.400

FUENTE Y ELABORACION: DEPARTAMENTO DE ESTUDIOS ECONOMICOS (P.N.A.)

se concluye que es indispensable desarrollar sistemas de almacenamiento y secado, más sofisticados pero más eficaces, si se quiere salvar el grano que ahora se daña.

¿Qué es el secado de granos?

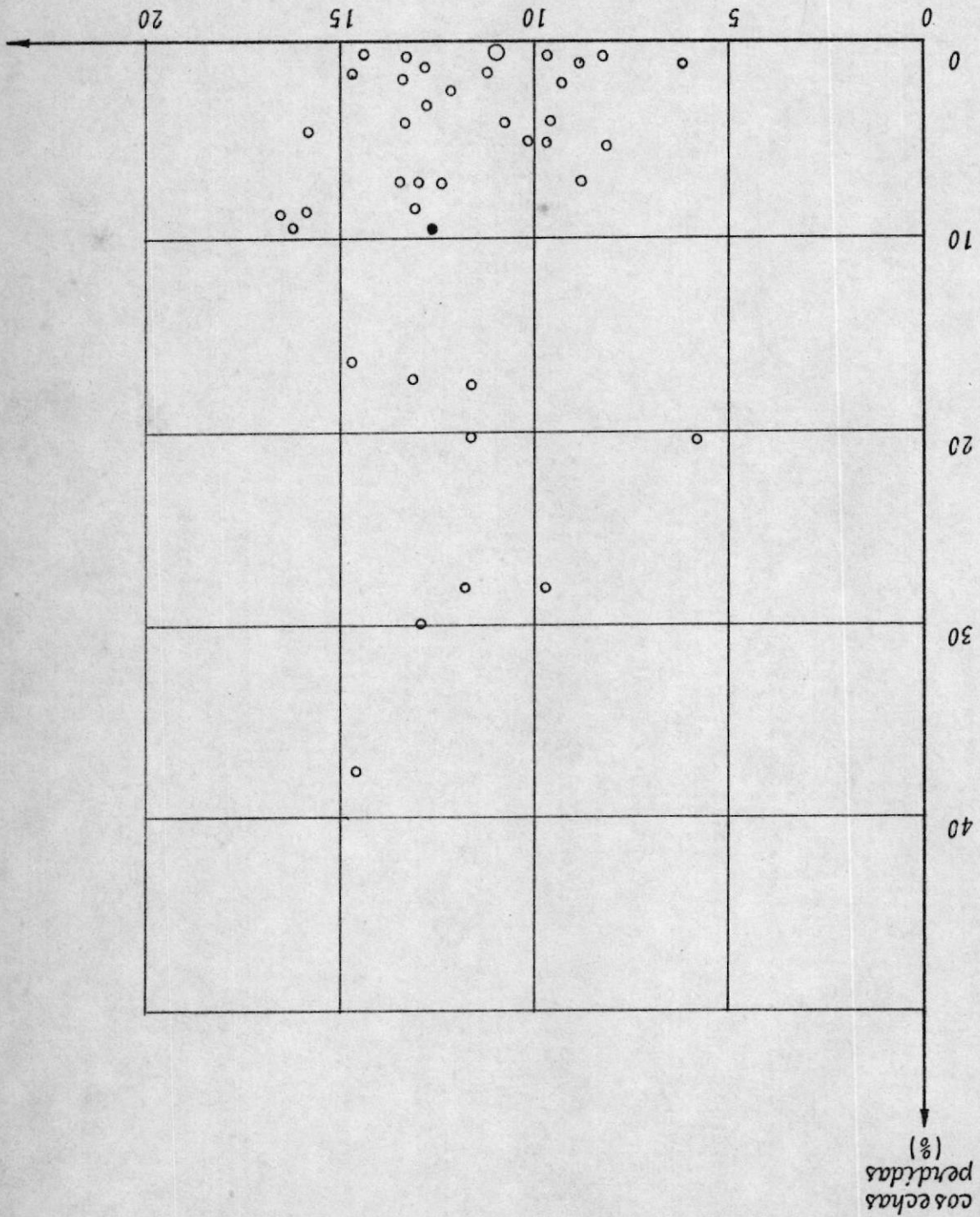
Se piensa en general que el problema de humedad excesiva en el grano se resuelve simplemente con secadores. Es importante destacar que el problema no es uno de secado solamente, sino también de manejo y fundamentalmente de almacenamiento adecuado. La información disponible no es especialmente confiable, pero tomando una muestra significativa puede ilustrarse la situación gráficamente, como se muestra en figura 1.1.

Aquí se presentan las pérdidas en almacenamiento, supuestamente después de que el grano se secó adecuadamente, del maíz blanco en cuatro Estados de la República de México con distintos climas y productividades durante 1974. Las pérdidas surgieron del ataque de hongos, insectos, etc. Estas se grafican con respecto a la humedad encontrada en el grano almacenado, como media aritmética.

Se utilizó un solo símbolo en la gráfica una vez que se pudo determinar que no existía correlación alguna con respecto a las regiones muestreadas o al origen del daño. Así, podría esperarse una clara correlación ascendente del porcentaje de pérdidas con respecto a la humedad. Esta correlación, es claro, no existe aquí.

La figura 1.2 puede dar mayor información al respecto. Se muestra ahora la distribución de frecuencia de la gráfica anterior. Notece una mayor ocurrencia de daño en humedades espe

FIGURA 1.1 - Pérdidas de maíz blanco almacenado, como consecuencia de una humedad contenida excesiva, en el grano.
 (Fuente: Boletín de la S.A.G.)
 humedad en el grano (%)



número de
ocurrencias

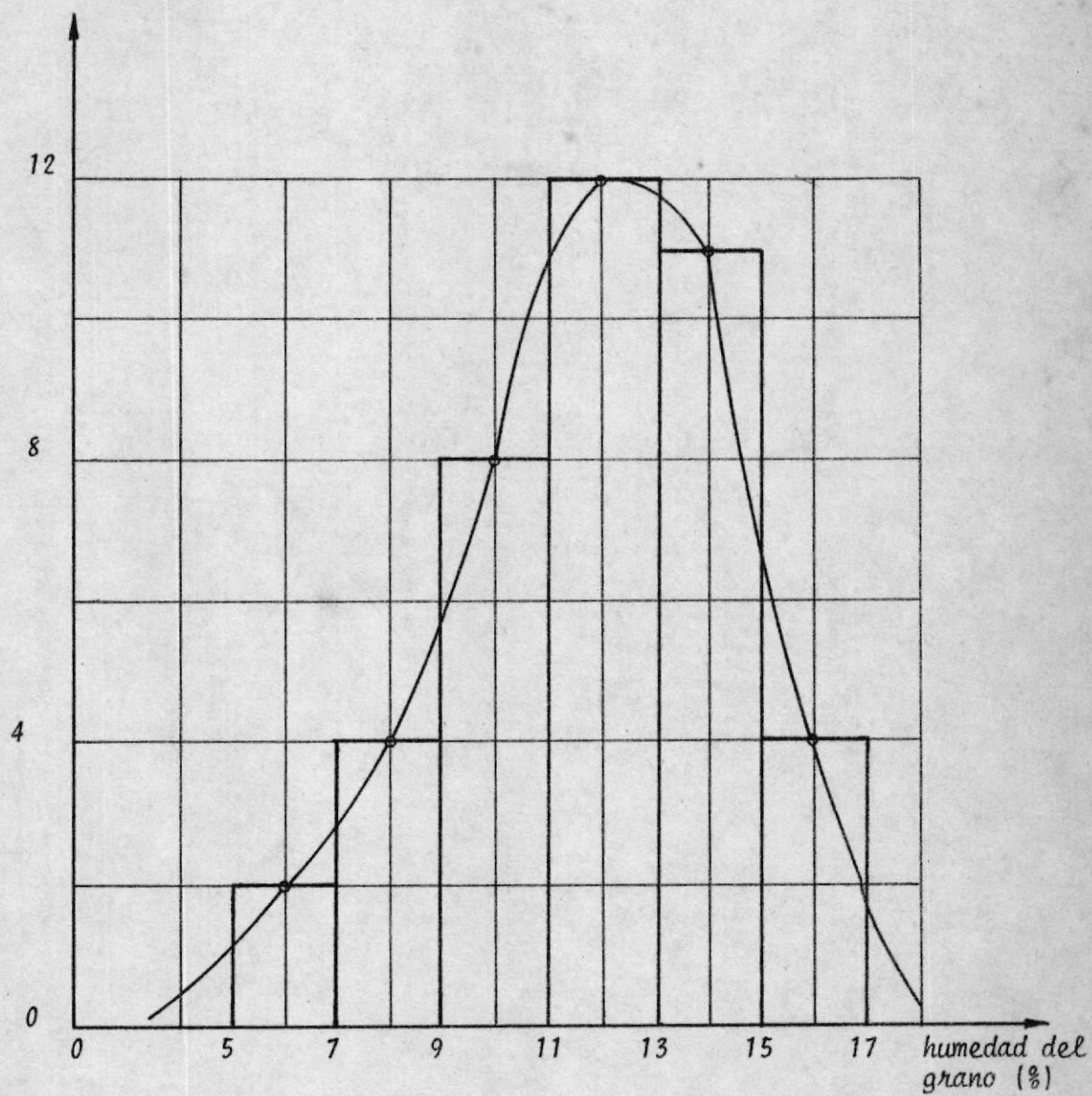


FIGURA 1.2 .- Distribución de frecuencia de la ocurrencia de daño al maíz blanco almacenado, como función de su contenido de humedad.

(Fuente : Boletín S.A.G.)

cificadas de entre 11 y 13% casi en el límite del 13.5% consi
derado por muchos como aquel cuyo contenido de agua es sufi-
cientemente pequeño como para no permitir los daños que en
realidad ocurrieron. La interpretación lógica de esta informa-
ción permite una o ambas de las siguientes conclusiones:

PRIMERA: Como las humedades son medias, se implica que en va-
rias ocasiones el grano alcanzó contenidos de humedad superio-
res a los acusados. Luego se redujeron estas humedades sacan-
do el grano del almacén, secándolo y volviéndolo a almacenar,
cada vez que el límite aceptable se excedía. Esta operación
implica un gran movimiento del grano por transporte mecánico,
por apaleo o por otros medios igualmente dañinos.

SEGUNDA POSIBLE CONCLUSION: El grano permaneció almacenado un
período largo, seguramente de muchos meses. En los almacenes
convencionales, se encuentra que una imperfecta ventilación fa-
cilita la creación de focos localizados de alta humedad debi-
do a procesos biológicos del grano o de microorganismos ac-
tuando sobre éste. Este fenómeno es tan complicado como dañi-
no.

Se desprende de esto que los daños causados al grano no
son solamente del proceso de secado deficientes o insuficien-
tes, sino de un mal planteamiento del problema de almacena-
miento, que implica mala ventilación y altos niveles de mane-
jo del grano, que resultan en fisuras o fracturas de éste, las
que a su vez lo hacen más susceptibles al ataque de hongos e
insectos.

Otra pieza de información interesante se presenta en la
figura 1.3. El grano seco se mantiene seco en clima seco, pe-

FECHA	Humedades Relativas del Ambiente (Medias)	
	66%	90%
ENERO	9.2	--
FEBRERO	8.7	--
MARZO	9.5	--
ABRIL	10.0	9.0
MAYO	10.0	9.5
JUNIO	10.1	10.5
JULIO	10.4	10.7
AGOSTO	11.0	14.0*
SEPTIEMBRE	12.2	17.1*
OCTUBRE	13.4	15.5*
NOVIEMBRE	12.0	15.5*
DICIEMBRE	10.6	15.0

* Nota: Se excede el límite de seguridad comercial

Fig. 1.3 Contenido de humedad en maíz almacenado en costales de yute de 70 Kg., habiendo empezado el experimento con 8% de humedad en ambas partes.

Porcentajes determinados en muestras mensuales

(Fuente: M. Ramírez Genel)

ro adquiere altos e intolerables niveles de humedad en climas húmedos. Esta realidad, que pareciera axiomática, parece ser ignorada en los diseños convencionales de almacenes de grano. Los almacenes en climas húmedos carecen en general de previsión para reducir la humedad relativa del aire en contacto con el grano.

La figura 1.4 resume las experiencias adquiridas en cuanto a humedades relativas del aire en equilibrio con la humedad contenida por el grano. Nótese que, a consecuencia de esto basta reducir la humedad relativa del aire para hacer descender la humedad del grano. En efecto, de revisar la tabla psicrométrica, se encuentra que basta aumentar en 5°C la temperatura del bulbo seco del aire con 90% de humedad relativa, para bajar ésta hasta valores correspondientes a los de clima seco.

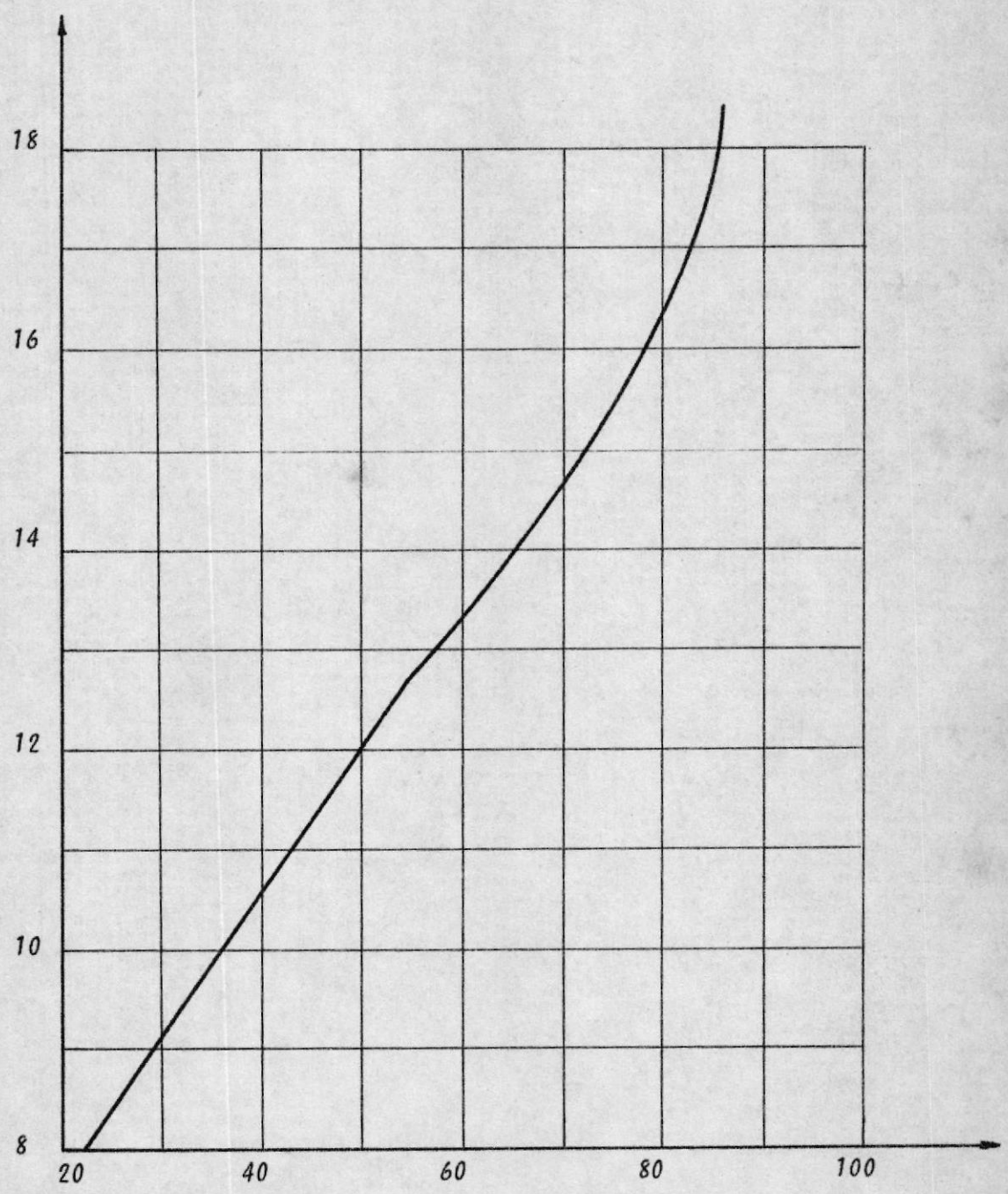
Ahora sí, podemos recoger estas dispares piezas de información para concluir como sigue:

PRIMERO: Para reducir las pérdidas de grano a un mínimo, no basta diseñar y operar secadores de grano eficientes. Es indispensable, para minimizar el manejo del grano, obtener almacenes que a su vez sean secadores y puedan mantener permanentemente el aire dentro con bajos niveles de humedad.

SEGUNDO: Para efectuar esta operación es fundamental estudiar los factores económicos, tanto del costo inicial de los equipos, como del proceso mismo. La localización de estos almacenes secadores limita la disponibilidad de fuentes convencionales de energía, o predispone un alto costo de éstas.

J

contenido
de humedad
del grano (%)



humedad
relativa
del aire

FIGURA 1.4 .- Curva de equilibrio entre la humedad relativa del aire y el contenido de humedad del grano. (Fuente: M. Ramírez genel.)

I-1 SISTEMAS POSIBLES DE SECADO

Por lo anterior, en climas húmedos puede descartarse por ahora la circulación de aire para el secado por convección natural, y se impone el uso de ventiladores motorizados ya sean eléctricos o de motor de combustión interna. Los sistemas de secado más conocidos en otros países y en algunas regiones del nuestro son: convección forzada de aire a temperatura ambiente y circulación forzada de aire precalentado por un quemador de combustible o por resistencias eléctricas.

Una nueva opción, probablemente no generalizada aún en ningún país, será la convección forzada de aire calentado por el sol.

La figura 1.5 pretende dar una idea cualitativa de la comparación entre estos tres sistemas alternativos. El signo de interrogación en la última columna significa que la dependencia con respecto a las condiciones atmosféricas es débil si se compara, la alternativa solar, con la convección forzada de aire ambiente, pero no es despreciable, como en el caso del secado por convección forzada de aire calentado por combustión.

I-2 SECADO DE GRANOS PRECALENTANDO AIRE CON GASES DE COMBUSTION.

Desde el punto de vista del salvamento de cosechas, podría darse una solución inmediata al secado de granos con procesos de combustión que precalienten aire para ser circulado a través del grano. Esta alternativa está técnicamente resuel

S I S T E M A	aire frío	aire + comb.	aire + solar
VENTAJAS			
Costo de combustible = 0	si	no	si
No hay peligro de incendio	si	no	si
Bajo costo inicial equipo	si	no	si
Requiere poca supervisión	si	no	si
Puede secar grano muy húmedo	no	si	si
Proceso indep. cond. atmós.	no	si	?
Corto tiempo de secado	no	si	si
Alta capacidad de secado por HP de ventilador.	no	si	si
DESVENTAJAS			
Alto costo inicial equipo	no	si	no
Costo de combustible	no	si	no
Peligro de incendio	no	si	no
Requiere constante supervisión	no	si	no
Depende de cond. atmosféricas	si	no	?
Largo tiempo de secado	si	no	no
Peligro de crecim. hongos, etc.	si	no	no
No es posible operar continuam.	si	no	si

Fig. 1.5 Comparación cualitativa de los dos sistemas básicos de secado de granos con circulación forzada de aire, con respecto al sistema de secado solar con aire forzado.

(Fuente: Departamento de Agricultura de los E.U.A)

ta. Sin embargo, cuesta dinero, probablemente más del que pueda justificarse, aún en estas condiciones, particularmente si quiere resolverse el problema de raíz, debe implementarse los secadores almacenes que se proponen.

En cuanto al solo secado, los costos de operación de éstos sistemas son muy elevados y serán aún más con la reciente alza del precio de los combustibles. Descontando costos iniciales de equipos y considerando como solo costos de operación los correspondientes a combustibles, como se ilustra en la figura 1.6 el secado cuesta aproximadamente S/. 35.-la tonelada. En esta gráfica se muestra el costo del secado para distintas humedades del grano, y para cantidades de grano de 50 y de 25 toneladas, representando por la línea punteada en cada caso. Los costos están sobre el eje vertical derecho. Puede notarse que el costo del combustible varía linealmente con el volumen secado. También ésta gráfica representa los tiempos de secado para 50 y 75 toneladas, que ilustra nuevamente el hecho de que conviene secar volúmenes grandes que pequeños, reforzando aún la propuesta del almacén secador, ya que los secadores de grano convencionales son muy inferiores en capacidad a los almacenes comúnmente utilizados en el país.

1-3 SECADORES SOLARES DE GRANOS

Ahora bien, ¿Qué ventajas proporciona el secado solar?. En la figura 1.7 se muestra el modelo de laboratorio de secado solar que se va a ensayar.

El equipo de deshidratación consta de las siguientes partes: cabina, bandeja, colectores de energía solar y ductos pa

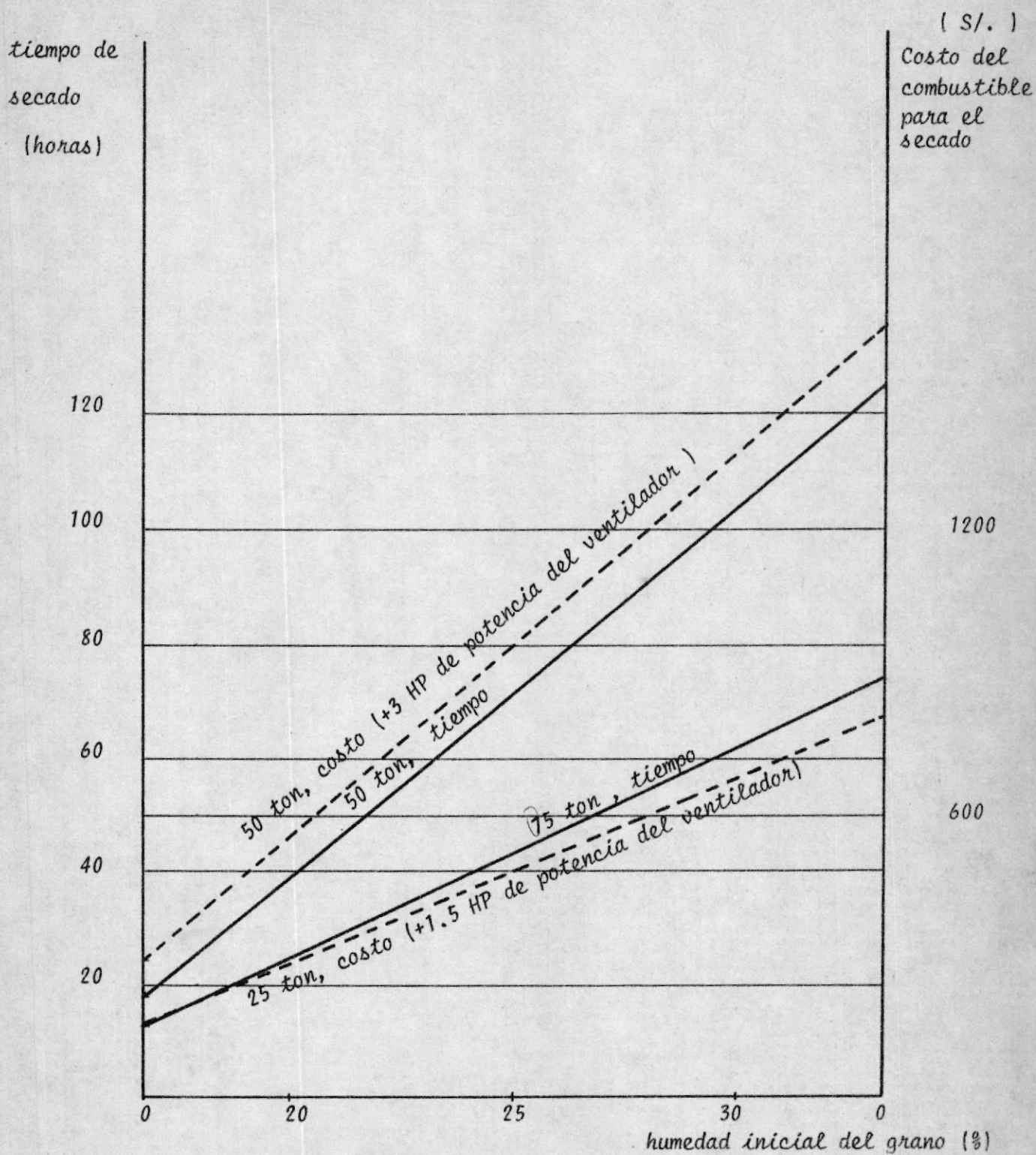


FIGURA 1.6 .- Costo del combustible para el secado de dos lotes de grano (50 y 25 toneladas) para distintas humedades iniciales y para la humedad final de 13.5% , y tiempo de secado para dos lotes de grano (50 y 75) toneladas, para humedades correspondientes. (Fuentes: Depto. Agric. E.U.A. y S.A.G., adaptada la información a costos de combustible, CEPE , precios 1981

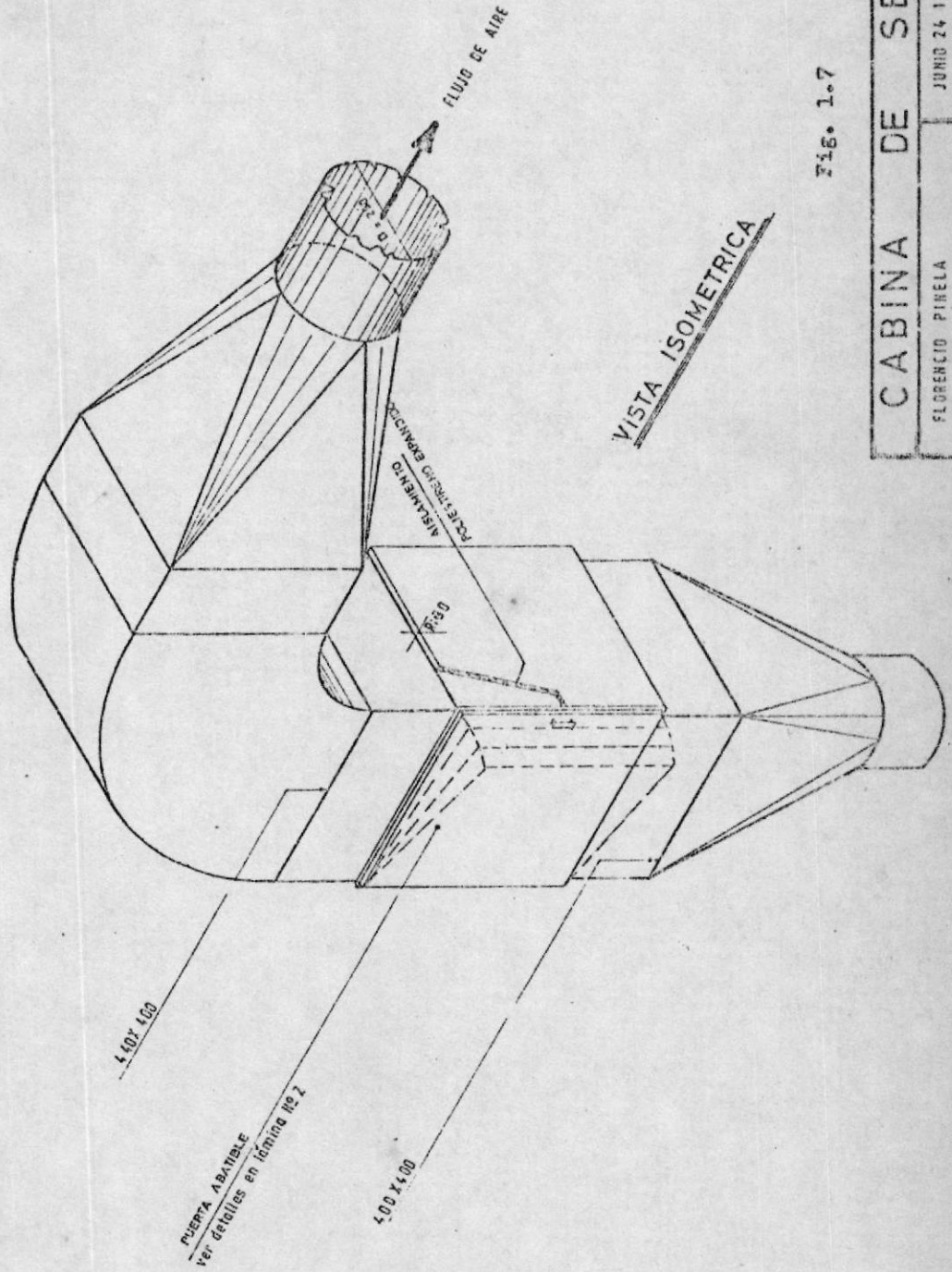


FIG. 1.7

CABINA DE SECADO

FLORENCIO PINELA

JUNIO 24 1960

MEDIDAS DADAS MILIMETROS

ra aire disecante.

CABINA: La cabina es el lugar en el cual se desarrolla el proceso de secado y debe ser aislada técnicamente y tiene las dimensiones indicadas en la figura 1.8, el aislamiento es de 2 cms. de espesor y se utilizará como material aislante poliestireno expandido.

BANDEJA: Es el receptor de la materia prima, está hecha de hierro galvanizado, cerrada en la parte inferior con tela metálica para permitir el paso del aire a través del grano.

COLECTORES SOLARES

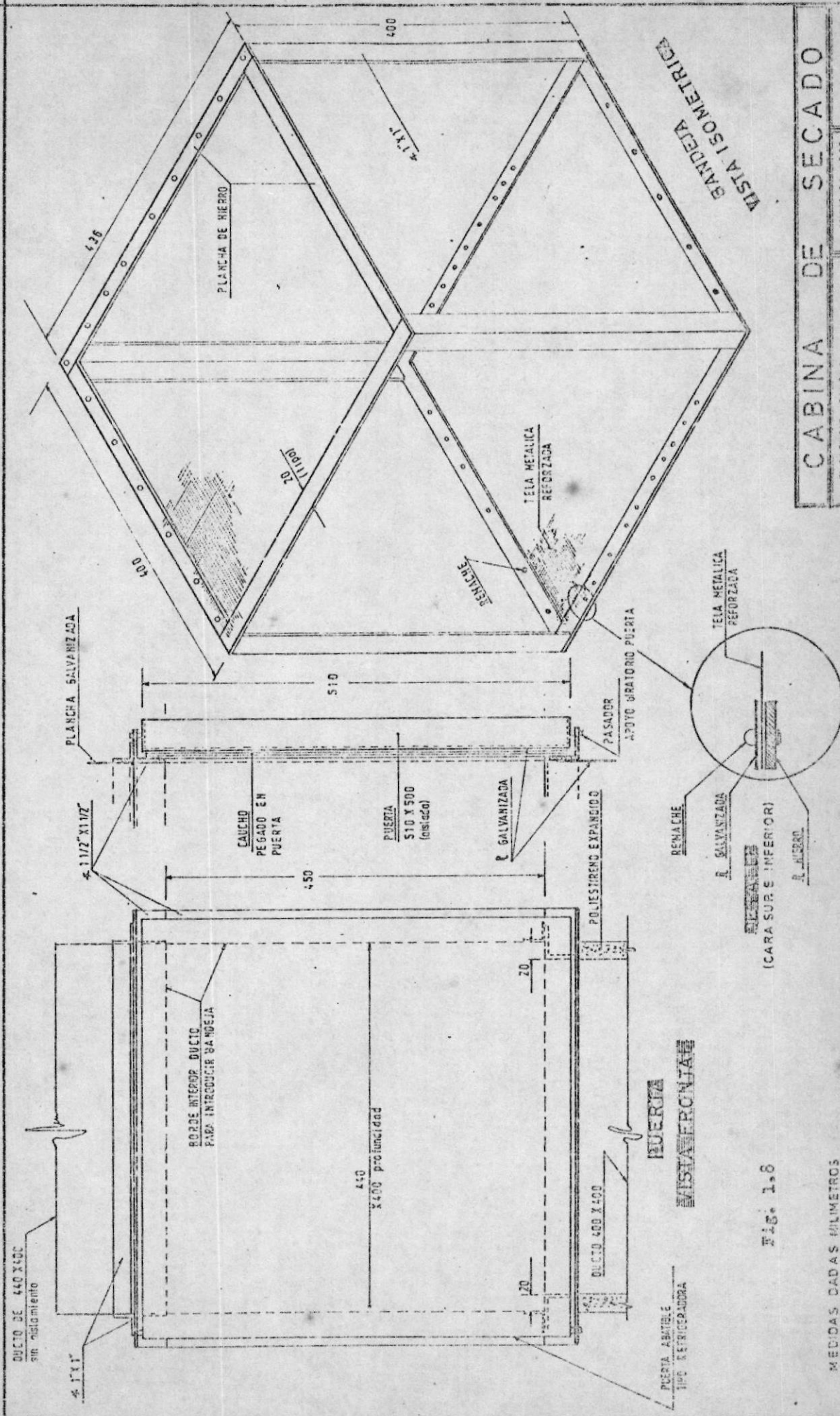
Son los que proporcionan la energía calorífica necesaria para el proceso de secado.

De la experiencia obtenida en experimentos anteriores,* la energía radiante incidente en la zona del Litoral, en 200 BTU/Hr pie² promedio, durante un período de 8 horas/días.

Las características del colector solar se pueden observar en la figura 1.9.

DUCTOS: Los ductos sirven para conducir el aire caliente desde los colectores hasta la cabina, el ducto de entrada de aire caliente a la cabina debe ser diseñado de tal forma que provea flujo estable, con distribución uniforme y total sobre el área de la bandeja. La parte superior de la cabina está unido al ducto que contiene en un extremo final el ventilador, que es el encargado del movimiento del aire.

* Tesis del Ingeniero Mecánico F. Santelli



CABINA DE SECADO

FLORENCIO PIVELA JUNIO 24 1960

BANDA ISOMETRICA

PLANCHA DE HIERRO

TELA METALICA REFORZADA

PLANCHA GALVANIZADA

CAUCHO PEGADO EN PUERTA

PUERTA 510 X 500 (insistido)

R GALVANIZADA

POLIESTIRENO EXPANSIDO

PASADOR APoyo ORATORIO PUERTA

TELA METALICA REFORZADA

BENACHE

R GALVANIZADA

R HIERRO

(CARA SUPERIOR)

BORDE INTERIOR DUCTO PARA INTRODUCIR BANDEJA

440 x 400 profundidad

DUCTO 400 X 400

PUERTA

ABITILE TIPO RETRORAJADA

DUCTO DE 440 X 400 sin aislamiento

41 x 11

438

400

400

400

20 (tipo)

510

450

20

20

400

411

Fig. 1.6

MEDIDAS DADAS MILIMETROS

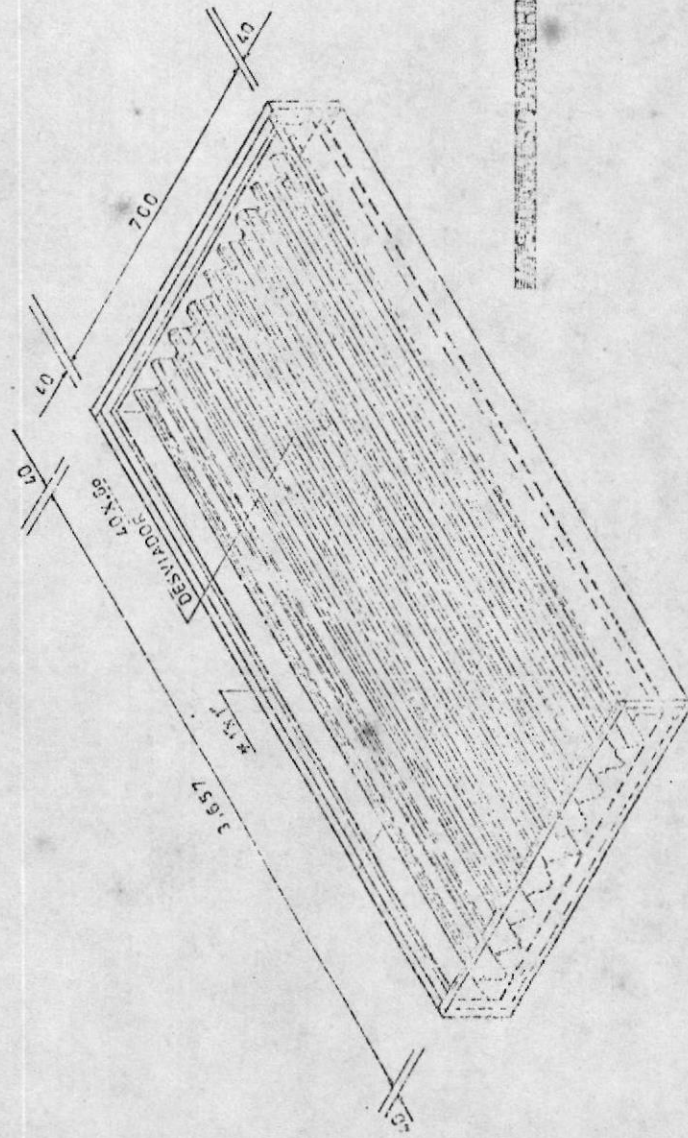


Fig. 1.9

COLECTOR SOLAR
 FLORENCIO PIRELA JUNIO 13 1960

MEDIDAS DADAS EN MILIMETROS

Todo lo mencionado en la parte 1.3 se refiere al diseño experimental, en el cual van a realizar las pruebas que a su vez nos darán información de los parámetros más importantes que gobiernan el proceso de secado.

De la experiencia obtenida por personas que investigan este campo, parecen sustanciar la hipótesis de que la energía solar está disponible para disminuir sustancialmente las pérdidas de almacenamiento o de granos por humedad implementando el almacén secador solar.

Las características de diseño de estos almacenes secadores de grano por energía solar están fuertemente gobernadas, más por consideraciones técnicas, por la disponibilidad de materiales y fuentes de energía en los sitios de utilización, así como por la disponibilidad de personal para su supervisión y operación. Este debe ser mínimo o nulo. Algunos posibles e j e m p l o s de d i s e ñ o s p u

ejemplos de diseños pueden ser los que siguen, desarrollados en la UNAM.

En la figura 1.10 se tiene un almacén convencional de granos, con entre piso reticulado de adobe o tabique para so portar mallas de yute o de petate, donde se almacena el grano a granel, en costales o en cualquier otra forma. Sobre el techo se ha colocado un captador solar de tipo antes descrito y puede comprobarse que la ganancia de calor de é s t o s cap t a d o r e s en cualquier parte del país, cuando el captador ocupe todo el techo, son suficientes para elevar la temperatura del aire en la cantidad aconsejable. El aire circula por con vección forzada en el calentador solar y luego pasa por duc t o s a través del extremo opuesto hasta el entrepiso donde as

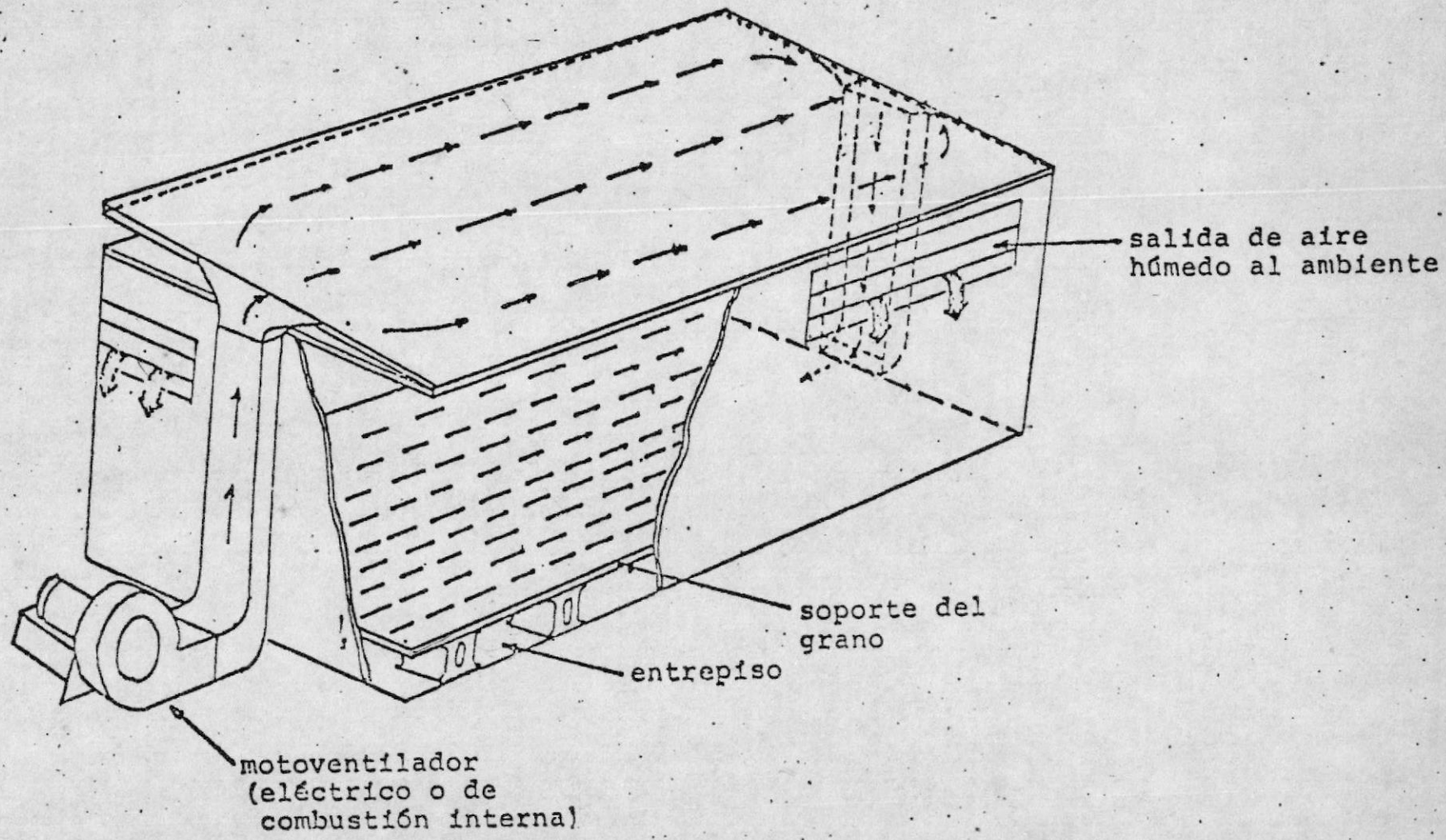


Figura 1.10 - Almacén de granos convencional adaptado para operar como almacén - secador solar.
 (fuente: Instituto de Ingeniería, UNAM).

ciende entre el grano secándolo. El aire, una vez húmedo pasa al exterior.

Para los casos donde la disponibilidad de energía eléctrica o de combustible para el ventilador sea cero se puede aplicar un diseño de convección natural como indica la figura 1.11

Sin duda, la alternativa solar al secado de grano abre enormes posibilidades a diseños revolucionarios de almacén secadores. Como ejemplo de esto, la figura 1.12 muestra este almacén secador, todo de plástico, que mantiene su forma debido a la presión estática del aire proporcionado por un ventilador axial. El aire se calienta al ponerse en contacto con el plástico negro del entretecho, para el entre piso como en las figuras anteriores y transporta la humedad del grano al exterior. Una ligera estructura de alambres podría usarse para mantener la forma cuando el ventilador no esté funcionando. Y hay, desde luego, muchas otras maneras de usar la energía solar en beneficio de la productividad agrícola.

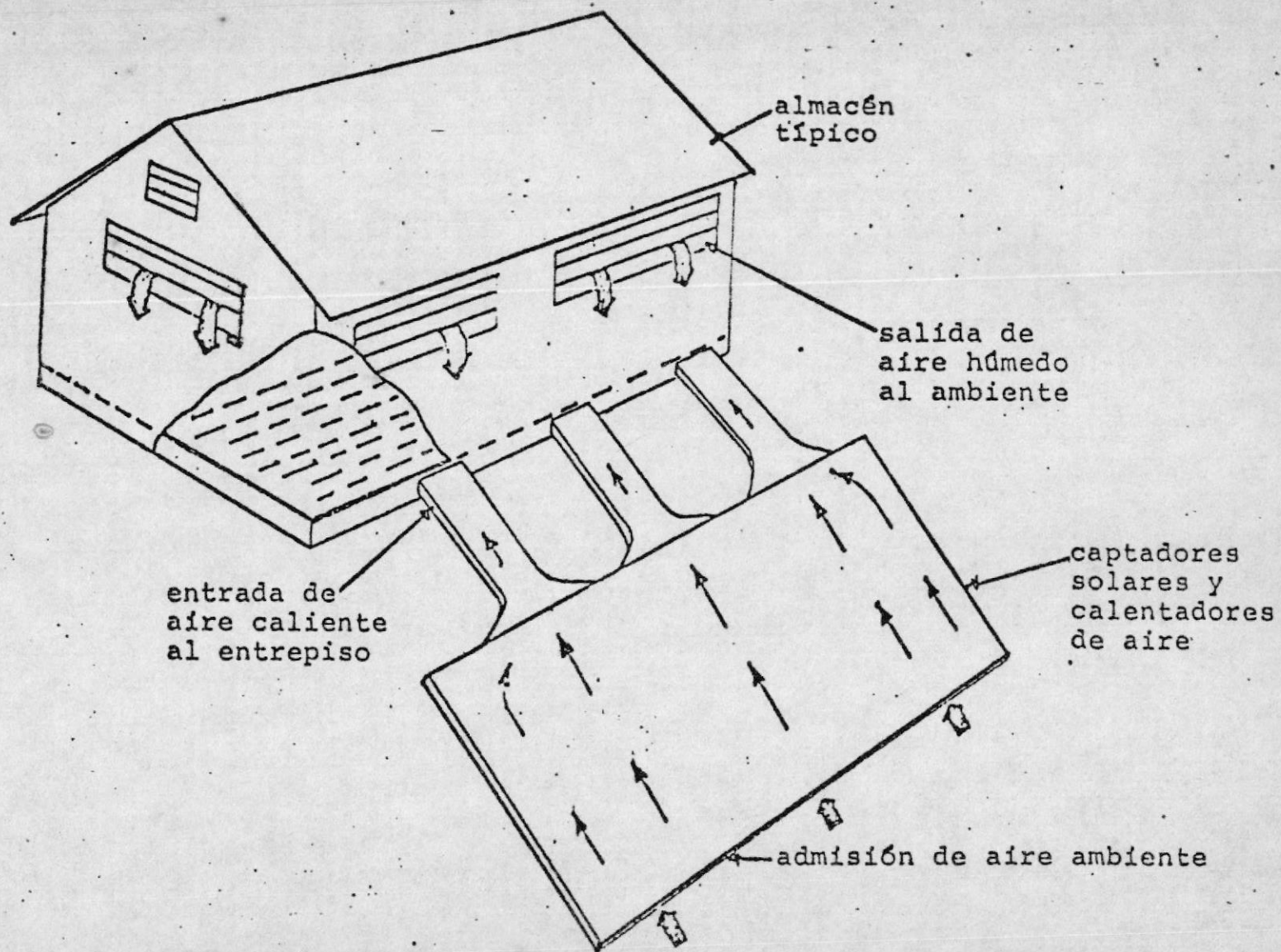


Figura 1.11 .- Calentador solar de aire para alimentar un almacén - secador convencional con convección natural (efecto de chimenea).
 (fuente: Instituto de Ingeniería. UNAM)

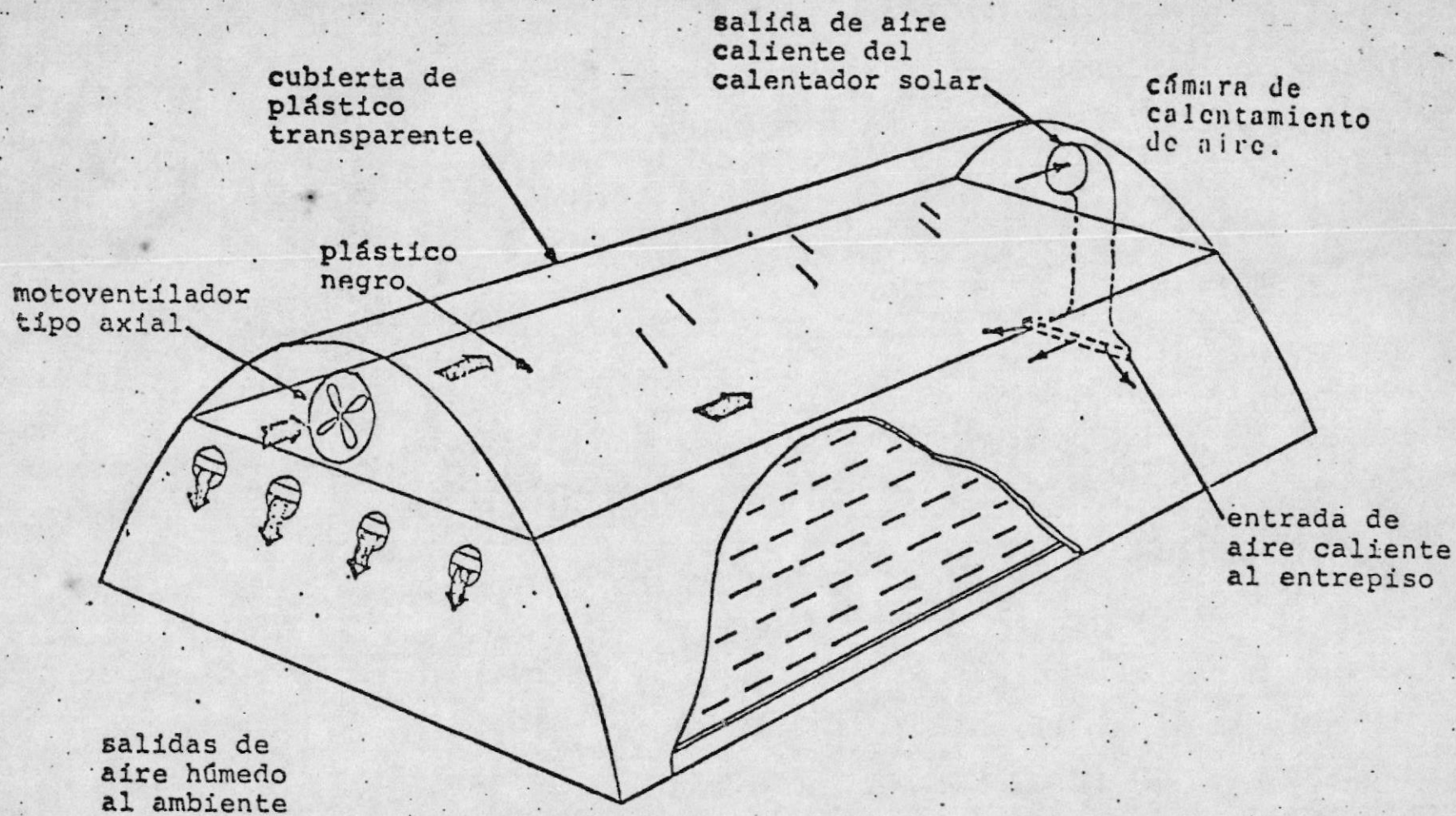


Figura 1.12 - Diseño original de almacén-secador de granos aprovechando la energía solar para la dehumidificación.

(fuente: Instituto de Ingeniería. UNAM).

CAPITULO II

FACTIBILIDAD DEL SECADO SOLAR DE GRANOS

Aún antes de que descubriéramos nuestro petróleo, antes de que se estructurara nuestro futuro inmediato alrededor de la exportación de energéticos primarios, ya intentábamos romper la creciente dependencia del extranjero en las ramas alimenticias. En el pasado cercano disfrutábamos del beneficio de la exportación de productos agrícolas, y aceptábamos orgullosamente nuestra tradición de agricultores. Al menos en ese rubro de la primera prioridad nacional éramos autosuficientes, independientes. Pero sucedió que haciendo planes a corto plazo no pudimos evitar que de exportadores pasáramos a ser importadores, dependientes del extranjero. Nuestra falta de habilidad para trabajar consistentemente para el futuro mediano amenaza con romper nuestra frágil estructura social y cancelar nuestras alternativas de desarrollo.

Una gran parte de la población nacional queda aún marginada de la vida moderna: sin casa, ni escuelas, ni alimento suficiente, ni mas futuro que el minuto siguiente.

Ecuador es ahora, y lo será por mucho tiempo, como la aplastante mayoría de los pueblos sub-desarrollados, importador de alimentos, notablemente de granos y semillas.

Cambiar esta situación es bastante difícil. Desaparece el petróleo al tiempo que las decisiones de importancia las dicta la agricultura. Todo país sin excepción, envidia las superabundantes reservas alimenticias, los rebozantes silos norteamericanos, llenos a reventar aún tras dos años de "ma

las cosechas". No solo está en juego la supervivencia de la población; peligran la vigencia del sistema, y será preciso un gran esfuerzo continuado a largo plazo, para preservar la egemonía nacional.

El reto de producir mucho más es ciertamente formidable, resulta más factible hacer mejor uso de la producción, que actualmente se pierde de la mata al consumidor.

Las técnicas revolucionarias del secado y conservación por medios solares, se comprobará enseguida, constituyen una de las esperanzas más realistas para aumentar la producción neta de granos y semillas.

II-1 RADIACION SOLAR UTILIZABLE EN LA COSTA DEL ECUADOR

Sobre la costa del Ecuador se puede aprovechar por radiación solar un promedio de 200 BTU/Hr pie²; durante ocho horas.

II-2 PANORAMA DEL CONSUMO EN EL ECUADOR

El problema del consumo de alimentos en Ecuador es posiblemente el más grave, el más mal estudiado y el mejor disimulado por las autoridades oficiales. Pero está bien representado por uno de los componentes más importantes de la dieta nacional, el arroz, influyente factor de conflicto o paz social. La producción nacional del orden de 153 mil toneladas por año de arroz.

El consumo promedio es del orden de 130.000 TM de arroz.

A medida que crece el nivel de ingresos, decrece la importancia del maíz y arroz como alimento y viceversa, la im-

portancia es máxima en las clases marginadas.

II-3 IMPORTANCIA DEL SECADO PARA LA CONSERVACION

El arroz y maíz, como todos los granos, al cosecharse, contiene una cierta cantidad del agua que permite continuar la actividad metabólica. Esta cantidad de agua, que llega a ser más del 30% en peso, pero que oscila normalmente del 20 al 25%, debe ser reducida sustancialmente, tanto para inhibir la actividad biológica (descomposición o germinación ex pontánea) como para proteger el grano del ataque de microorganismos, insectos y roedores.

Muchos expertos que trabajan en este problema, coinciden en afirmar que la reducción oportuna de la humedad con tenida en el grano hasta un 8 a 12%, inhibe casi totalmente las pérdidas del grano por los motivos anteriores sin dañar la capacidad ulterior de germinación de la semilla.

Los mismos expertos consideran que llevando a la práctica las técnicas adecuadas del secado y conservación, se obtendría un incremento de disponibilidad de la producción agrícola neta de un 15 a un 20%, conservadoramente, los sistemas de secado harían disponible no menos de 10.7 mil toneladas por año de arroz y 5.5 mil toneladas por año de maíz.

Las técnicas inadecuadas de producción son juzgadas responsables de la baja productividad. El problema de baja producción se agrava por la baja calidad del producto, desfavorable tanto al consumidor como al productor.

Estas consideraciones permiten estimar la importancia

que en la economía nacional tendría el SECADO OPORTUNO DE GRANOS. Una vez secado el grano, su conservación en almacenes y silos es sumamente sencilla. De hecho, de acuerdo con estudios verificados en México, puede mantenerse indefinidamente una humedad baja en el grano ($<13.5\%$) con humedades relativas ambientales más o menos altas (70%).

Actualmente se debe secar por métodos artificiales más del 50% de la producción nacional de granos y semillas. El costo medio de secado es de S/. 40,00 C/TM. Las razones por las que éste secado no se hace oportunamente, o simplemente no se hace, son incapacidad técnica, ineficiencia administrativa y deficiencia presupuestal.

II-4 LA ALTERNATIVA SOLAR

La complejidad de la deficiencia de secado clama por una solución técnica, económica y social auténtica. La mayor parte de la complejidad técnica reside en transformar el aire del ambiente en aire bueno para el secado, usualmente calentándolo unos 10 o 15°C sobre la temperatura ambiente, abatiendo así su humedad relativa a menos de la mitad de la ambiental. Luego, con ventiladores, este aire se circula por el grano, secándolo.

Los sistemas convencionales de secado calientan el aire por combustión de hidrocarburos y la tecnología asociada a estos sistemas es bien compleja. Se requiere combustible, que es ya un militante, y operarlo adecuadamente. No hay que olvidar los peligros de explosión e incendio por manejo indebido del combustible. Estas técnicas son complicadas, impracticables muchas veces, caras y sofisticadas más allá del alcance del cam

pesino.

II-5 CONCLUSIONES

Existe la certeza de que la deficiencia en el secado y la conservación de granos, particularmente del arroz y maíz, se traduce en pérdidas del orden de 10.7 mil toneladas por año de arroz. Estas pérdidas se presentan por igual en todas las zonas productoras. De los datos de radiación solar y humedad relativa del ambiente, se observa una relación inversa entre los niveles de radiación solar y la humedad relativa del ambiente. Dado que en todo caso los niveles de insolación son elevados, la utilización de la energía solar para el secado es técnica, económica y socialmente factible.

Las cifras correspondientes a las pérdidas de grano hacen obligatorio considerar seriamente el desarrollo de la técnica del secado solar.

CAPITULO III

FUNDAMENTOS TEORICOS

Cualquiera que sea el método de secado empleado, la deshidratación de un alimento consta de dos etapas primordiales:

- 1.- La introducción del calor al producto; y
- 2.- La extracción de humedad del producto.

Estas dos etapas no siempre son favorecidas por las mismas condiciones de operación; por ejemplo, se pueden comprimir los alimentos entre dos placas calientes, estas proporcionarían un contacto estrecho y mejoraría del transmisión del calor al interior del alimento desde arriba y desde abajo, pero el mismo contacto estrecho entre las placas obstaculizaría el escape de la humedad.

La extracción de humedad del producto o transferencia de agua, es el objetivo principal que se persigue, procurando obtener la velocidad máxima en el secado; de manera que se hace todo lo posible a fin de acelerar las velocidades de transmisión de calor y transferencia de masa. Las siguientes consideraciones son importantes en este respecto:

AREA DE SUPERFICIE

Generalmente se subdividen los alimentos a deshidratar en piezas pequeñas o capas delgadas, a fin de acelerar la transmisión de calor y transferencia de masa.

La subdivisión acelera el secado por dos razones:

- 1.- Un mayor área de superficie proporciona más superficie en contacto con el medio de calentamiento y más superficie desde la cual puede escapar la humedad.

2.- Las partículas más pequeñas o capas más delgadas reducen la distancia que el calor tiene que recorrer hasta llegar al centro del alimento, y reduce la distancia que la humedad en el centro del alimento tiene que recorrer a fin de llegar a la superficie y escaparse. En casi todos los tipos de secadores se procura aumentar al máximo la superficie del alimento que se está secando.

TEMPERATURA

Cuando mayor sea la diferencia de temperatura entre el medio de calentamiento y el producto, mayor será la velocidad de transmisión de calor al producto, la cual proporcionará la fuerza impulsora para la eliminación de humedad. Cuando el medio de calentamiento es aire (Como sucede en nuestro caso), la temperatura desempeña un segundo papel importante. A medida que el agua es expulsada del producto en forma de vapor de agua, tiene que ser alejada, ya que, de otra manera, la humedad crearía en la superficie del producto una atmósfera saturada, que disminuiría e incluso anularía la velocidad de la eliminación subsecuente de agua.

Cuando más caliente esté el aire, más humedad podrá absorber antes de saturarse. De este modo, el aire de temperatura elevada que se encuentra a proximidad del producto en proceso de deshidratación recogerá la humedad expulsada de ésta en mayor grado que el aire fresco (Aire del ambiente). Es evidente también que un mayor volumen de aire puede recoger más humedad que un menor volumen de aire. Vale anotar también que las temperaturas para secado tienen un valor óptimo de operación para cada producto, sobre éste valor de temperatura se presentan problemas tales como: Resquebrajamiento del grano, pérdida de calidad, apariencia, etc.

VELOCIDAD DEL AIRE

Como el aire es nuestro medio de secado, cuanto más seco esté mayor será la velocidad del proceso. El aire seco tiene el poder de absorber y retener la humedad. El aire húmedo está más cerca del punto de saturación y, por lo tanto, puede absorber y retener menos humedad adicional que si estuviera seco.

Pero la sequedad del aire, también determina hasta que punto se puede bajar el contenido de humedad del alimento a deshidratarse. Los productos deshidratados son higroscópicos esto significa que, cada producto tiene su propia humedad relativa de equilibrio, que es la humedad, que contiene a una temperatura determinada en la que ni entrega a la atmósfera ni recoge humedad de ésta. Bajo este nivel de humedad, el alimento puede secarse más todavía. Arriba de este nivel no puede secarse más, sino que al contrario, recoge humedad del ambiente.

III-1 EQUILIBRIO

La humedad contenida en un sólido húmedo ejerce presión de vapor que es función de la naturaleza de la humedad, del tipo de sólido y de la temperatura. Si aire con cierta humedad relativa, se pasa a través del sólido húmedo, éste perderá o ganará humedad (del aire) hasta que la presión de vapor de la humedad del sólido iguala a la presión parcial del agua del aire. Al ocurrir esto último, se dice que existe el equilibrio a las condiciones prevalecientes.

En cualquier producto se puede determinar esta humedad de equilibrio a diferentes temperaturas al exponer el producto secado a atmósfera con diferentes niveles de humedad en cam

panas de laboratorio. Después de varias horas de exposición, se pesa el producto. El nivel en que el producto ni pierde ni absorbe más humedad, es su humedad relativa de equilibrio. Si se representan los datos en forma gráfica, se obtienen isotermas de absorción de agua como los que se ven en la figura.

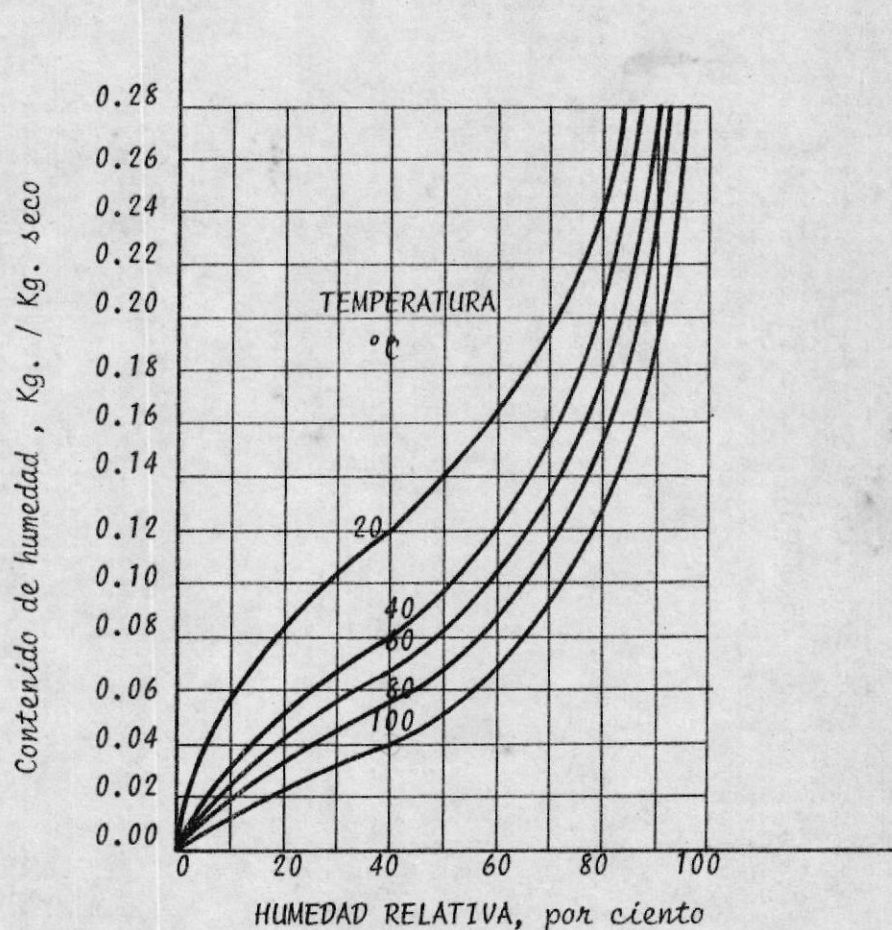


FIGURA 3.1.- Isotermas de absorción de agua en papas (fuente: L. Sherwood, T.K.)

Tales datos nos pueden decir que a 100°C y 40% de H. R., las papas llegan al nivel de equilibrio cuando su humedad está al 4%. Si deseamos secarlos hasta que tengan 2% de humedad con aire a 100°C, será preciso que el aire tenga una H.R. de 15% aproximadamente.

III-2 CLASES DE HUMEDAD

Un sólido puede contener humedad en una de dos formas:

a.- Un material higroscópico puede retener cierta cantidad de

agua cuya presión de vapor es menor que la del agua libre a la misma temperatura. A tal agua se le denomina humedad ligada. La humedad no ligada es el agua en exceso a la que el material puede retener como humedad ligada.

b.- La humedad no ligada ejerce una presión de vapor igual a la del agua libre a la misma temperatura.

Para cualquier material higroscópico hay una relación definida entre la presión de vapor de la humedad ligada y el contenido de humedad y la temperatura del sólido. Prácticamente el contenido de humedad ligada es una función de la humedad relativa.

La figura 3.2 ilustra el contenido de humedad del cuero curtido para suelas. Dicho cuero puede retener humedad ligada hasta cerca del 40% de su peso seco; la humedad que exceda esta cantidad es no ligada, si el cuero se expone al aire a la misma temperatura y a 50% H.R., su contenido de humedad de equilibrio será cerca de 0.16 Kg. agua/KGSS. El contenido de humedad en el cuero que exceda esta cantidad será el contenido libre de humedad, es decir la cantidad que sería extraída si el cuero fuera expuesto indefinidamente al mismo estado de aire.

Si la humedad relativa de un sólido húmedo es mayor que la humedad relativa del aire húmedo a la misma temperatura a la cual es expuesto, existirá una diferencia de presión de vapor que causará flujo de vapor del sólido al aire. Esta diferencia de potencial podrá también ser expresada en función de las diferencias de relación de humedad.

III-3 PERIODO DE SECADO

Cuando un sólido es secado experimentalmente se conoce

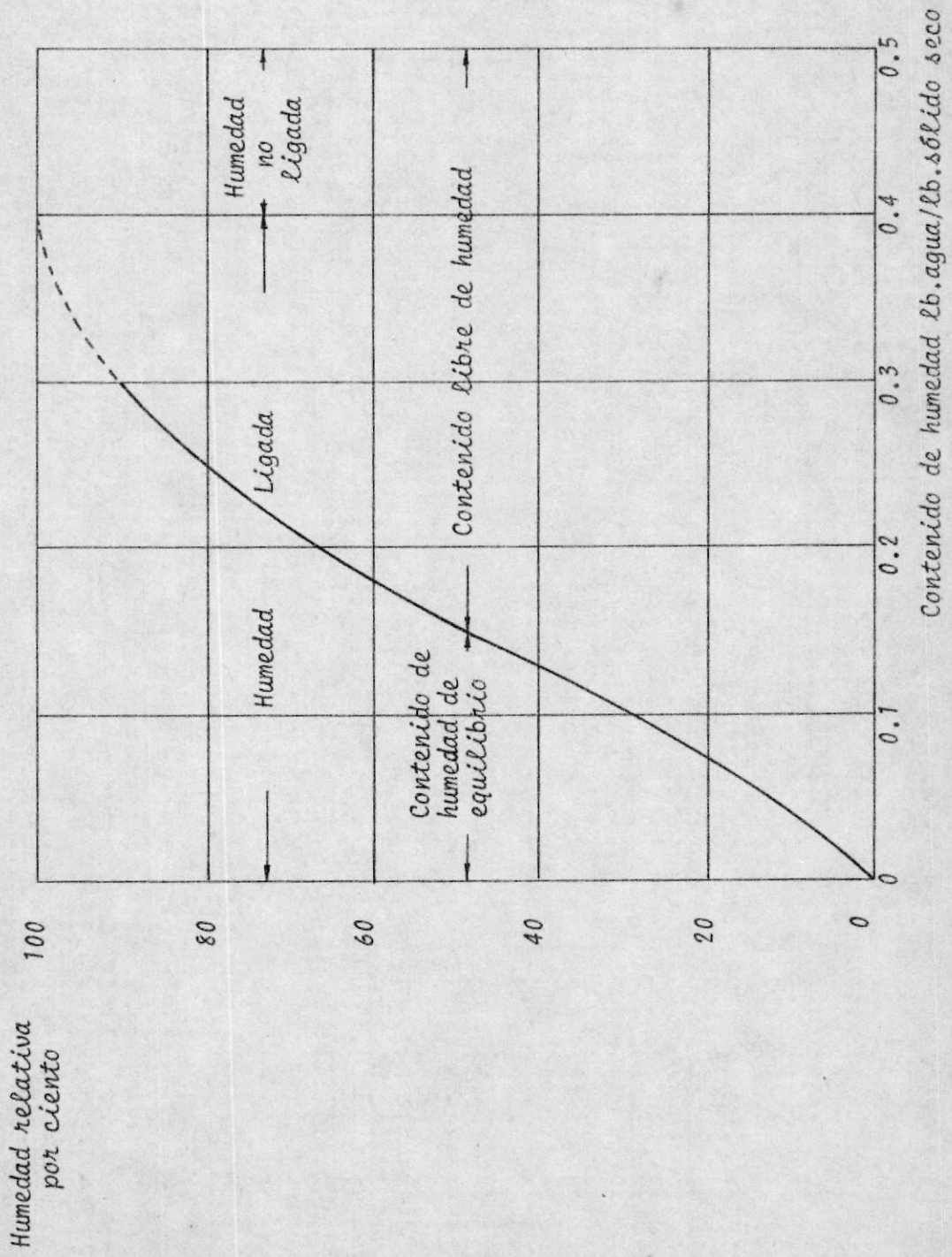


Fig. 3.2 Contenido de humedad del cuero curtido para suelas
(fuente: James L. Threlkeld.)

la variación de la humedad del grano con respecto al tiempo. Tomando pequeños incrementos de humedad y de tiempo, se puede calcular la velocidad de secado como sigue:

$$N = - \frac{L_s}{A} \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

Donde:

N = Velocidad de secado, Kg de agua evaporada/Hr.m²

L_s = Peso del sólido seco, Kg.

A = Area de secado, m² (Area de la superficie)

Δx = Incremento de la humedad, $\frac{\text{Kg de agua}}{\text{Kg. sólido seco}}$

Δt = Incremento de tiempo Hr.

* El signo negativo nos indica que la velocidad de secado va en dirección de la disminución de humedad.

La figura 3.3 muestra las gráficas tipo X Vs t de $NVS X$. La figura 3.3a nos ilustra acerca de los períodos que se pueden presentar en un proceso de secado, los cuales son los siguientes:

$A' - B, A - B$. Es un período de calentamiento del sólido y normalmente es tan corto que no se toma en cuenta en los análisis.

$B - C$ La humedad superficial del grano es transferida hacia el aire a un valor único de la velocidad por la cual se denomina período de velocidad constante. Al punto C se lo denomina crítico.

$C - D$ Primer período decreciente. En esta sección de la curva la humedad es tan reducida que van apareciendo zonas secas que se van agrandando

humedad del grano Kg. agua/Kg. S.S.

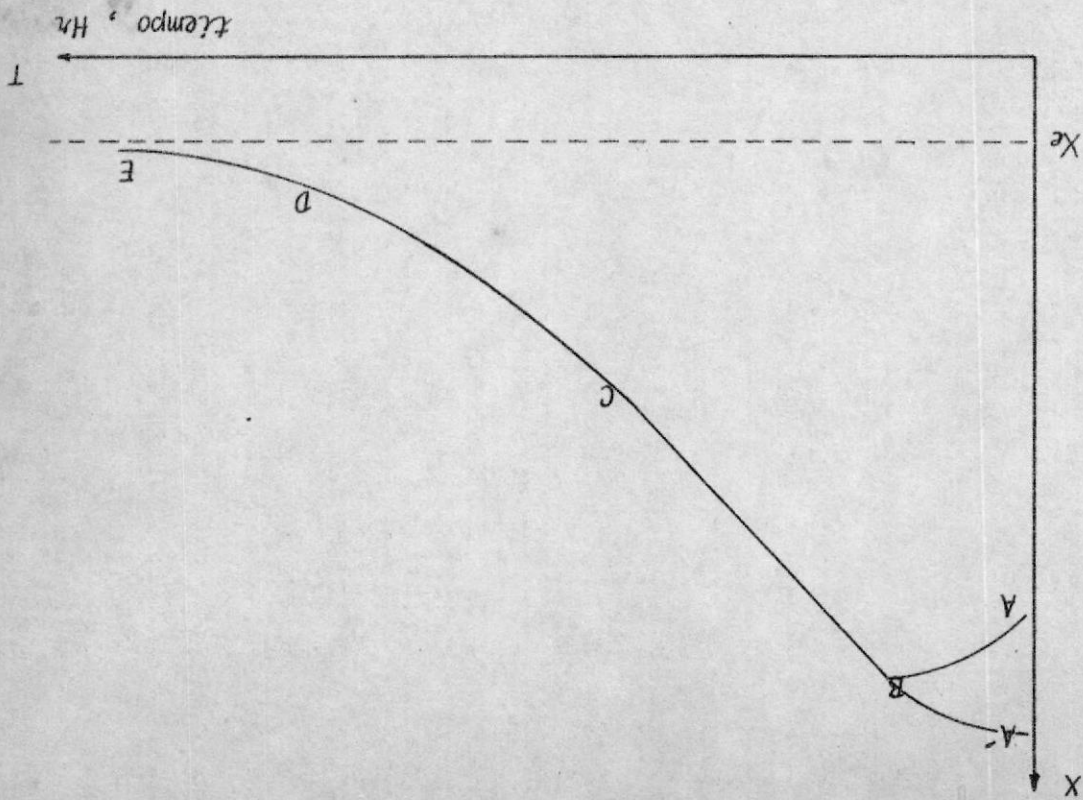


FIGURA 3.3(a) Variación de la humedad del grano con respecto al tiempo

velocidad de secado
Kg. agua gvp.
Hr. - m²

humedad del grano Kg. agua/Kg. S.S.

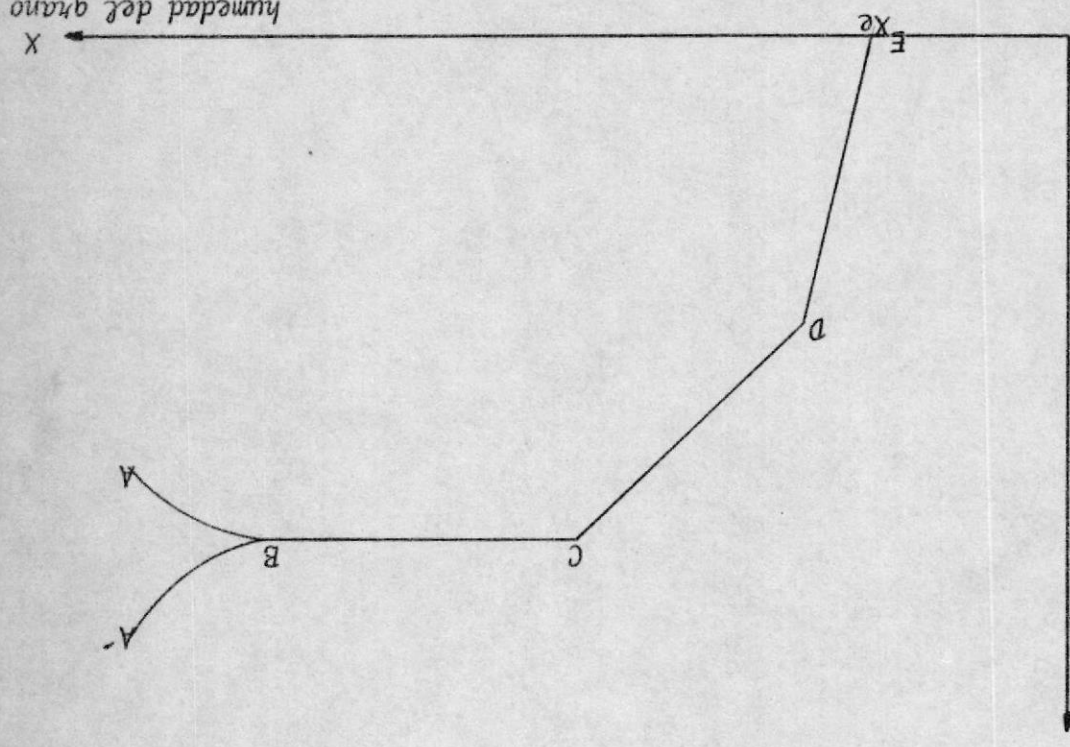


FIGURA 3.3 (b) Variación de la velocidad de secado con respecto a la humedad del grano

tal como este período finaliza.

D - E Segundo período decreciente. El secado es dirigido por los gradientes de concentración existentes entre las partes profundas y la superficie del grano.

III-4 ECUACIONES TEORICAS PARA LOS PERIODOS DE SECADO

Las ecuaciones aplicables al período de velocidad constante han demostrado su validez en relación a los datos experimentales, mientras que para los períodos decrecientes controlados por la difusión líquida a través del grano, el conocimiento es muy limitado. Las siguientes ecuaciones son útiles para cualquier tipo de flujo de aire.

* Período de velocidad constante:

La velocidad de secado es, según la ecuación (3.1)

$$N = - \frac{Ls dx}{A dt}$$

Rearreglando e integrando sobre el intervalo de tiempo, mientras el contenido de humedad cambia de X_1 a X_2 .

$$t = \int_0^t dt = \frac{Ls}{A} \int_{X_2}^{X_1} \frac{dx}{N} \quad (3.2)$$

ya que $X_1 = X_i$, $X_2 = X_c$ y $N = N_c$, entonces:

$$t = \frac{Ls (X_i - X_c)}{AN_c}$$

donde:

t = Tiempo de secado, Hr

X_i = Humedad inicial del grano, $\frac{\text{Kg. agua}}{\text{Kg. S. S.}}$

X_c = Humedad al inicio del período decreciente, $\frac{\text{Kg. agua}}{\text{Kg. S. S.}}$

* Período de velocidad decreciente.

CASO GENERAL

Para cualquier forma de curva, se puede obtener el área bajo la curva (Abc) resultante al graficar X como abscisa y $1/N$ como ordenada y calcular el tiempo de secado como:

$$t = \frac{Ls}{A} \text{ Abc} \quad (3.3)$$

CASO ESPECIAL

En el primer período decreciente se observa que N varía linealmente con X y aplicando (3.1)

$$t = \frac{Ls}{A} \int_{X_d}^{X_c} \frac{dx}{mx + b} = \frac{Ls}{mA} \ln \frac{mX_c + b}{mX_d + b}$$

donde:

$$N = mx + b$$

m = Pendiente de la recta

b = Constante

ya que:

$$m = \frac{N_c - N_d}{(X_c - X_d)}$$

Entonces:

$$t = \frac{Ls}{A} \frac{(X_c - X_d)}{(N_c - N_d)} \ln \frac{N_c}{N_d} \quad (3.5)$$

donde:

X_d = Humedad del grano al término de la recta, Kg. agua/Kg.S.S.

N_d = Velocidad de secado al término de la recta.

APROXIMACION: Frecuentemente, ante la escasez de datos, la curva puede suponerse como una recta entre los puntos C y E. En este caso:

$$N = m (X_5 - X_e) = \frac{N_c (X_5 - X_e)}{(X_c - X_e)}$$

y la ecuación (3.5) se transforma en:

$$t = \frac{Ls (X_c - X_e)}{ANc} \ln \frac{(X_c - X_e)}{(X_5 - X_e)} \quad (3.6)$$

donde:

$$X_5 = \text{Humedad final del grano, } \frac{\text{Kg. agua}}{\text{Kg. S.S.}}$$

$$X_e = \text{Humedad de equilibrio del grano Kg. agua/Kg S. S.}$$

DIFUSION LIQUIDA.- La ecuación de conducción de calor que Fourier puede describir el movimiento de la humedad. SHERWOOD re solvió la ecuación de difusión, obteniendo:

$$\frac{X_t - X_e}{X_c - X_e} = \frac{8}{\pi^2} \left[e^{-D_L t (\pi/2d)^2} + \frac{1}{9} e^{-9D_L t (\pi/2d)^2} + \frac{1}{25} e^{-25D_L t (\pi/2d)^2} + \dots \right]$$

Donde: (3.7)

$$X_t = \text{Humedad del grano al tiempo } t, \frac{\text{Kg. agua}}{\text{Kg. S.S.}}$$

$$D_L = \text{Coeficiente de difusión líquida, } \frac{\text{CM}^2}{\text{Hr.}}$$

d = Mitad del grueso de la capa sólida a través de la cual ocurre la difusión, en cm;

Para tiempos de secado largos la ecuación (3.7) se simplifica como:

$$\frac{X_t - X_e}{X_c - X_e} = \frac{8}{\pi^2} e^{-D_L t (\pi/2d)^2} \quad (3.8)$$

Despejando D_L :

$$D_L = \frac{\ln \frac{8/\pi^2}{X_t - X_e} - \ln \frac{X_c - X_e}{X_t - X_e}}{t (\pi/2d)^2} \quad (3.9)$$

Diferenciando la ecuación (3.7)

$$\frac{dx}{dt} = - \frac{\pi^2 D_L}{4 d^2} (X_t - X_e) \quad (3.10)$$

Para obtener el tiempo de secado, integramos (3.10)

$$t = \frac{4d^2}{D_L \pi^2} \ln \frac{X_c - X_e}{X_t - X_c} \quad (3.11)$$

CAPITULO IV

DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN PROTOTIPO EXPERIMENTALIV 1 PRODUCTOS A SECAR: Arróz y MaízIV 1.1 PROCEDIMIENTO

El arróz y el maíz fueron adquiridos en el lugar de la cosecha, con el fin de lograr que los resultados de las pruebas tengan validez total, ya que el objetivo es determinar parámetros, de tal forma que se acerquen lo más posible a la realidad, es decir, en el lugar mismo de origen.

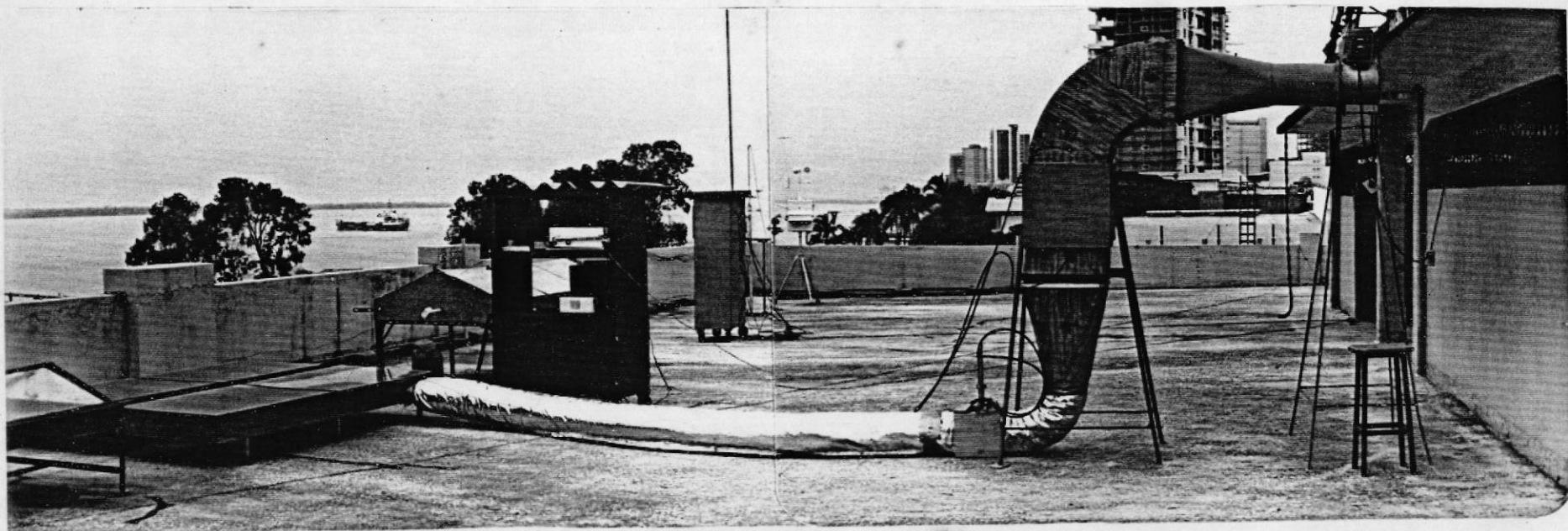
El arróz acabado de cosechar tiene una humedad que varía desde el 20% hasta el 28%.

El grano húmedo fue colocado sobre la malla de alambre que conforma la bandeja, en tres camas que variaban su espesor, desde dos hasta cuatro centímetros. Las bandejas tienen una capacidad de 0.77 Kg. de arróz por cada centímetro de espesor de cama y de 1.41 Kg de maíz por cada centímetro de espesor de cama.

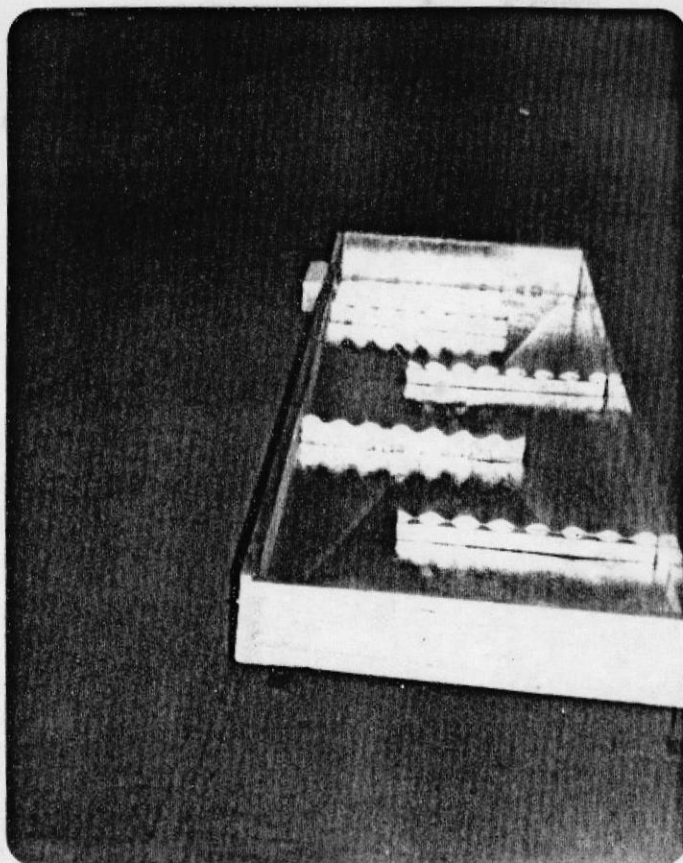
El aire sopla de abajo hacia arriba utilizando un extractor. El aire tomado del ambiente, es calentado por la radiación solar a su paso por el calentador, y después de su paso a través de las camas de grano es arrojado a la atmósfera.

IV 1.2 APARATOS

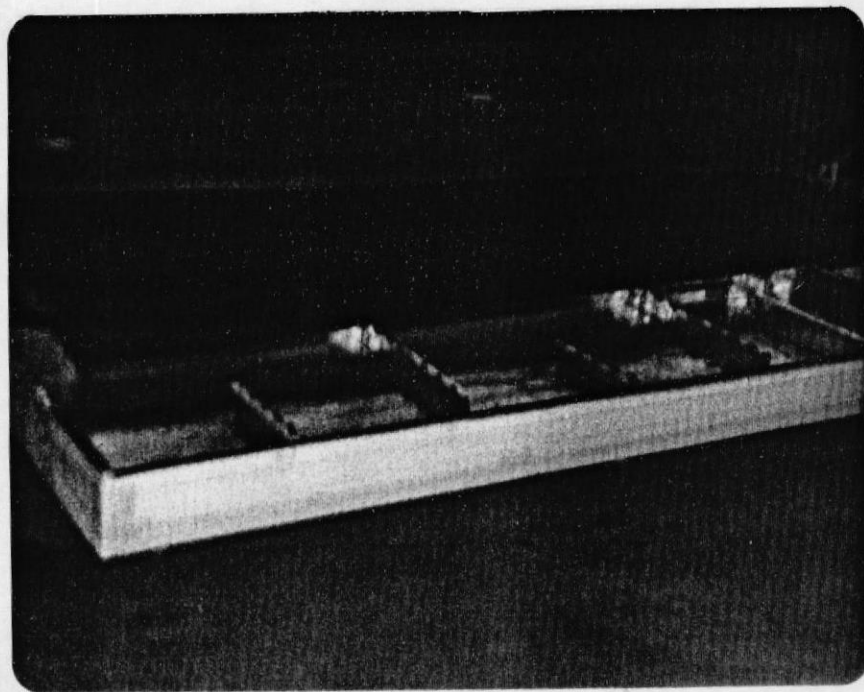
El secador está formado por:



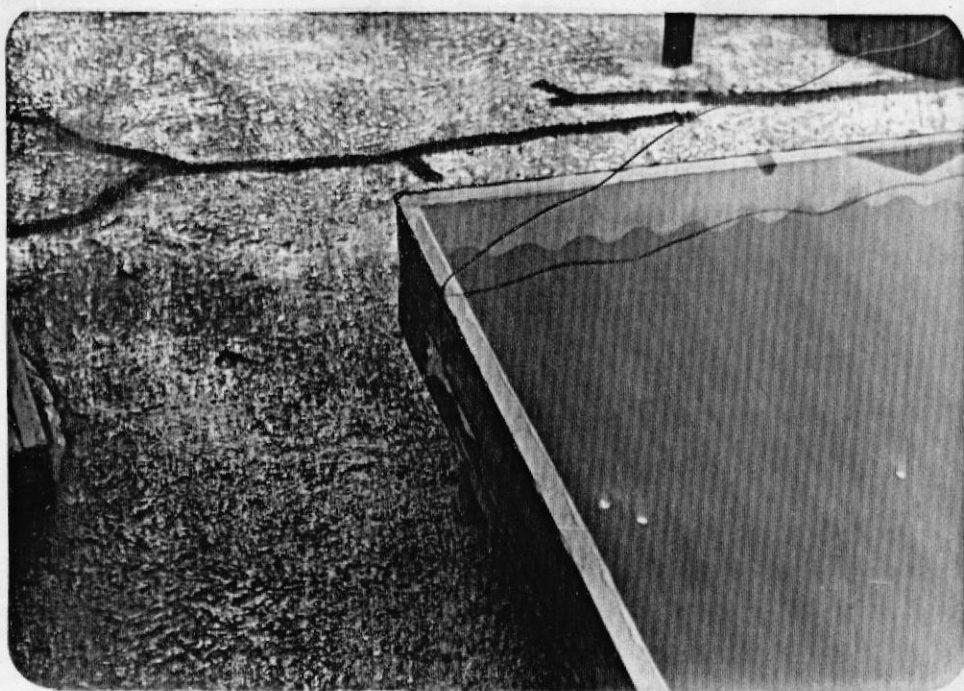
VISTA GENERAL DEL SISTEMA



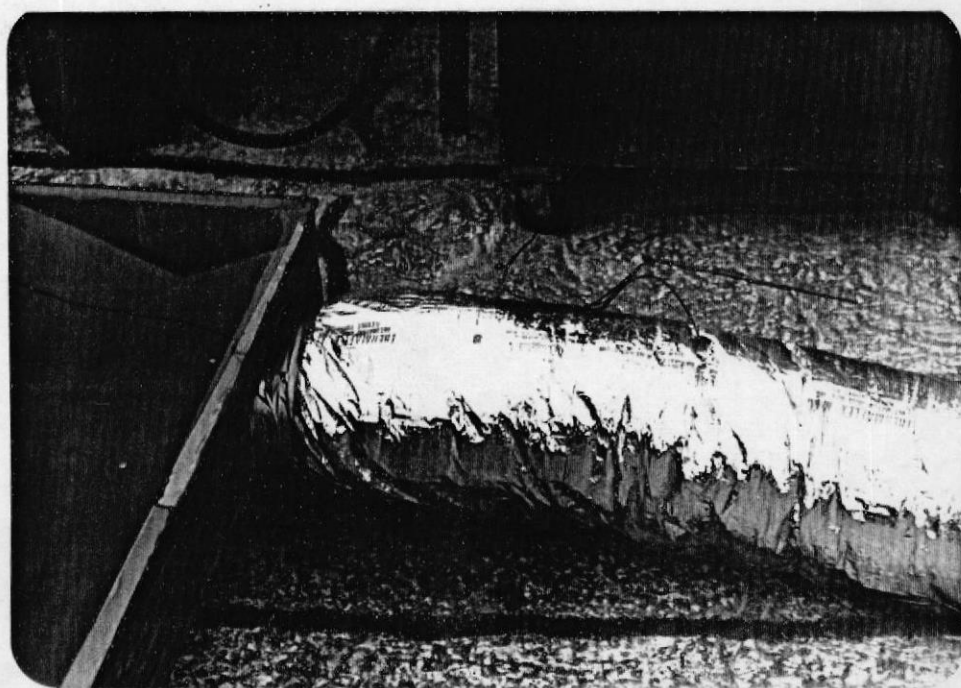
POSICION DE LOS DESVIADORES



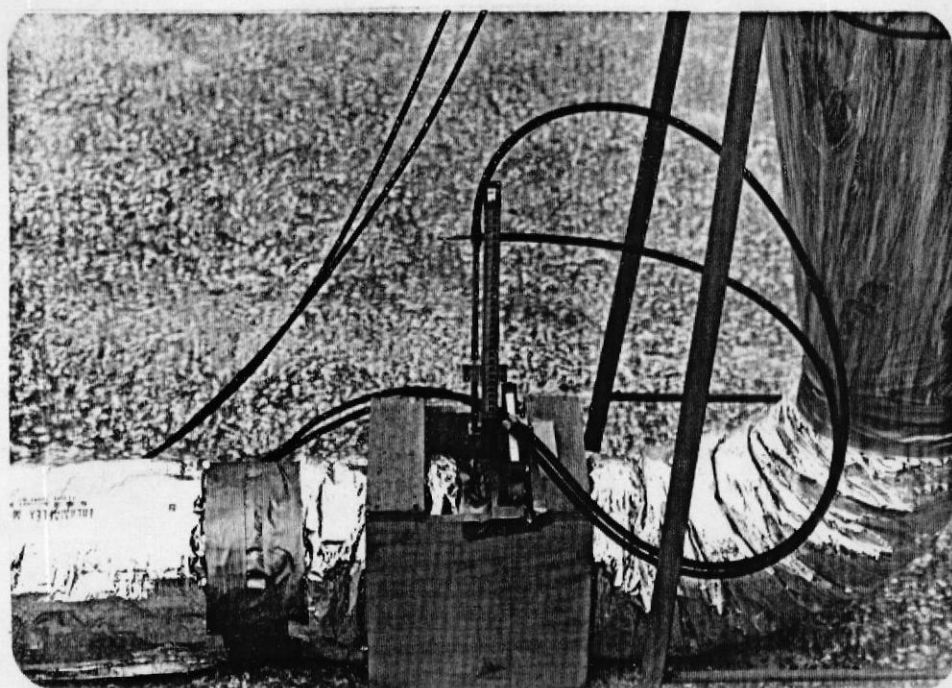
COLOCACION DE LA PLANCHA NEGRA



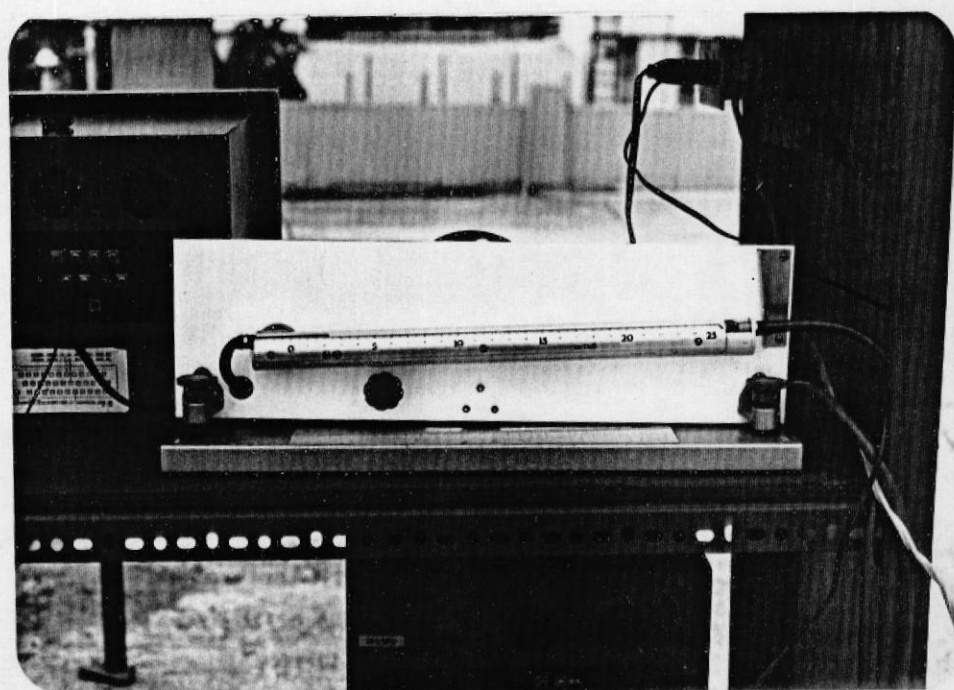
ENTRADA DE AIRE AL PRIMER COLECTOR



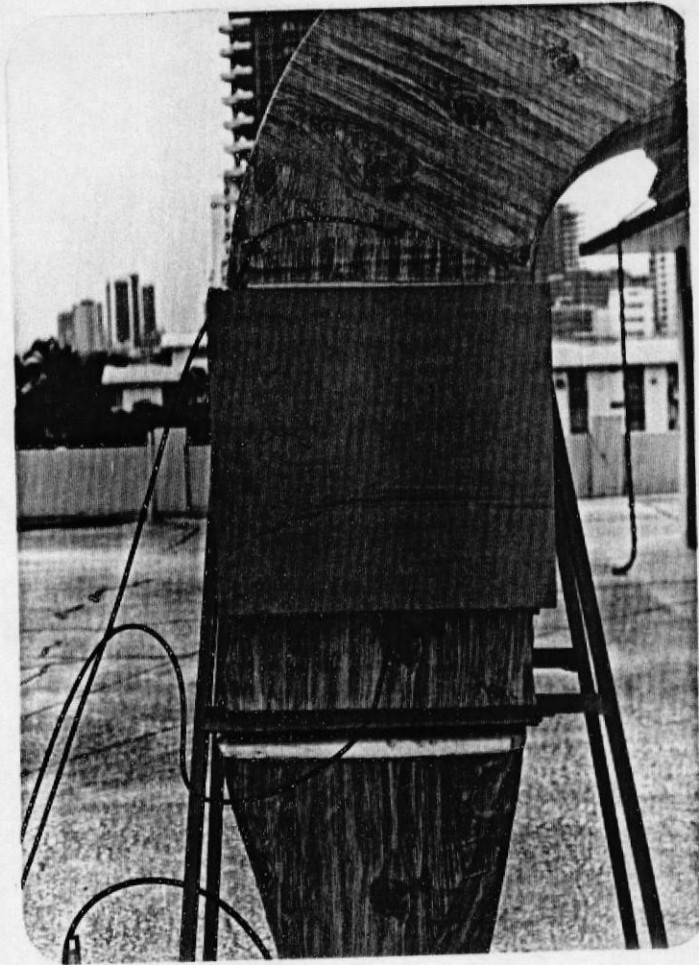
SALIDA DE AIRE DEL SEGUNDO COLECTOR



INSTRUMENTO PARA MEDIR EL FLUJO



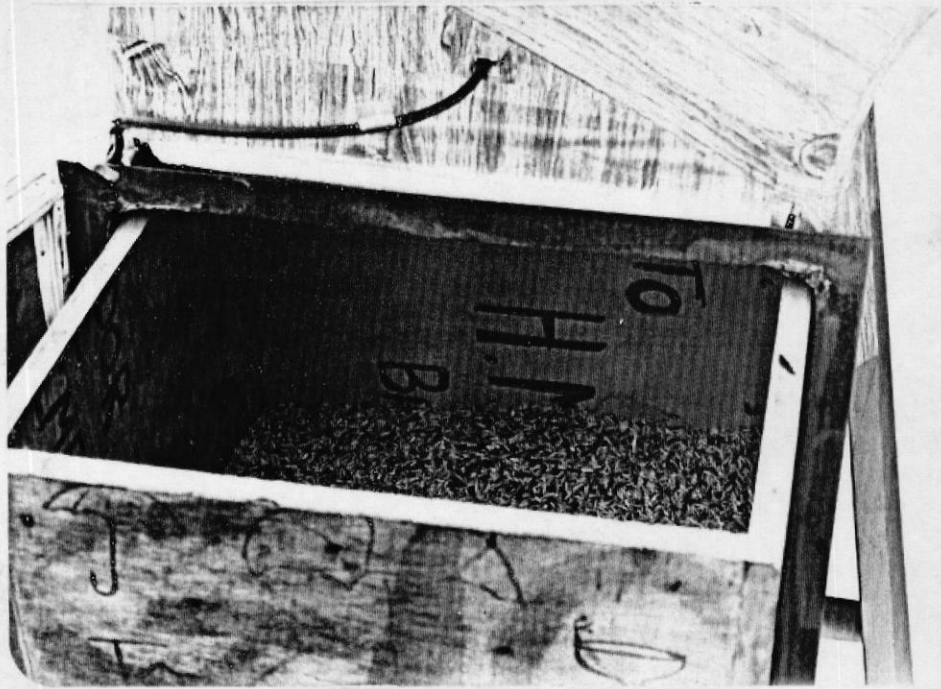
OBTENCION DE LA LECTURA



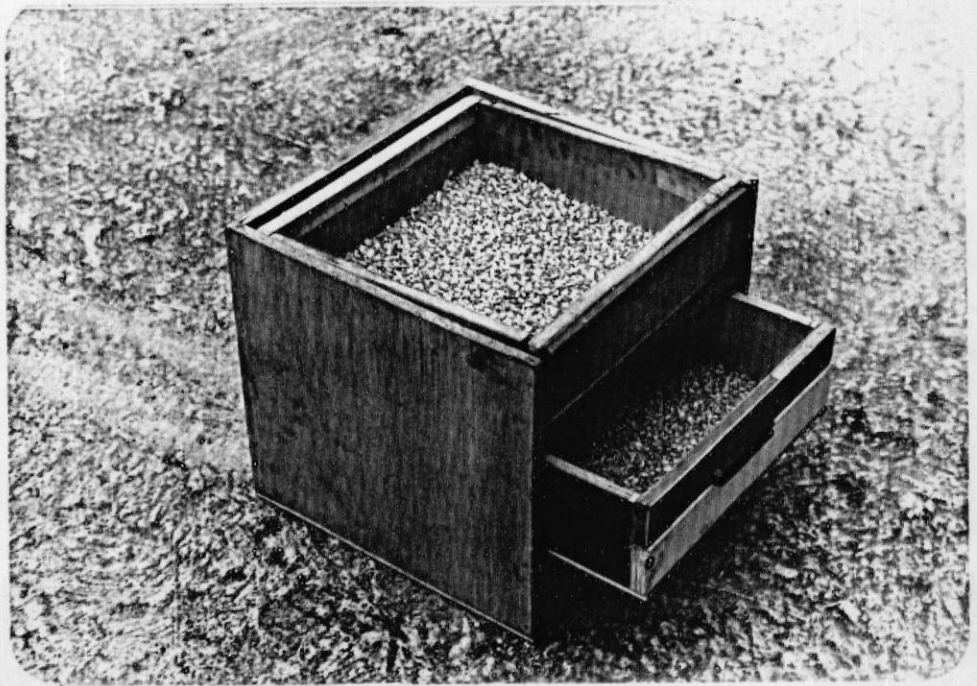
CABINA DE SECADO



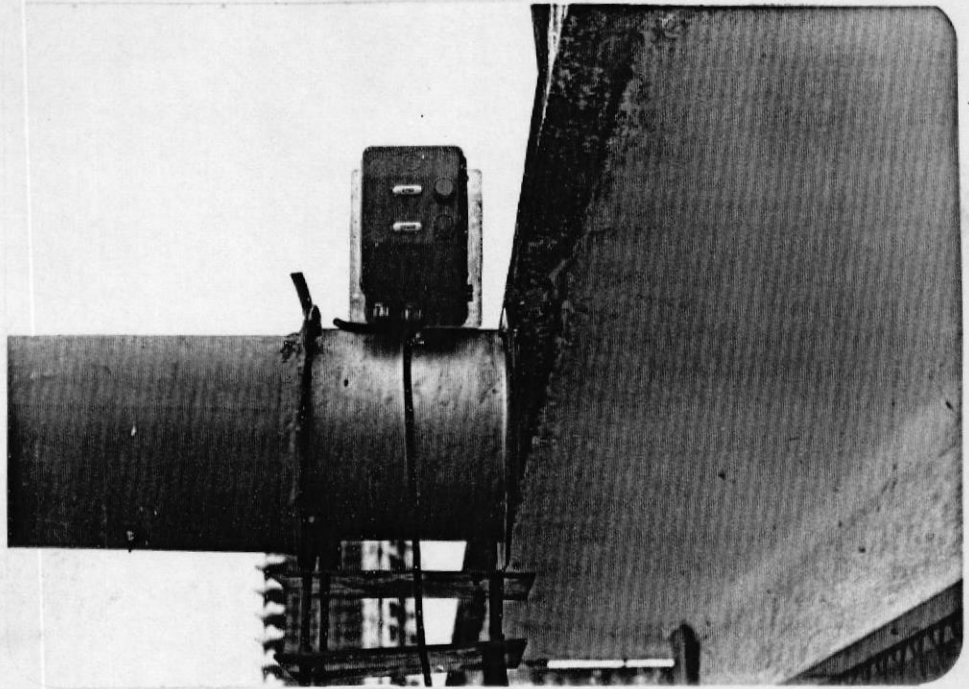
CARACTERISTICAS AISLANTES DE LA MANGUERA FLEXIBLE



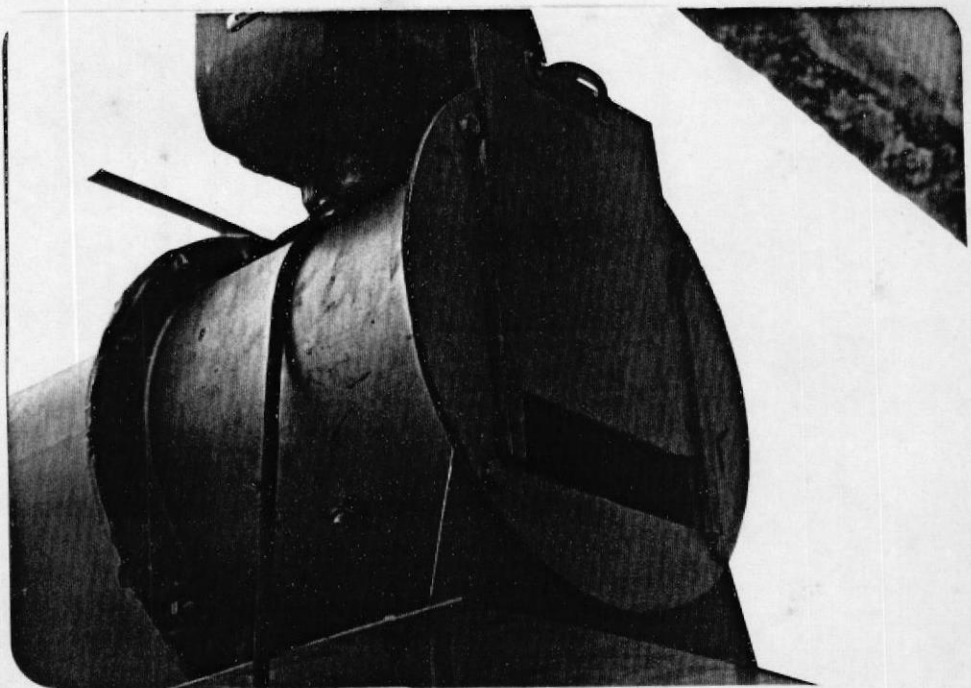
RECEPTOR DE GRANOS



RECEPTOR (BANDEJA) DE 3 CAMAS



EXTRACTOR DE AIRE



COMPUERTA PARA REGULAR EL FLUJO DE AIRE

Los colectores solares están hechos de plancha galvanizada de 810 mm de ancho, 2420 mm de largo y 180 mm alto. Sobre la superficie de la bandeja de los colectores, fueron colocados desviadores de flujo, con el objeto de darle al aire cierta turbulencia y así aprovechar mejor la transferencia de calor desde la plancha negra.

La plancha negra es una de zinc a la cual se le ha pintado utilizando pintura negro mate para darle un mayor coeficiente de absorción; está colocada sobre los desviadores que a la vez sirven de apoyo y está remachada a estos. Sobre la plancha negra se coloca la lámina de vidrio de 4 mm de espesor, que descansa sobre los bordes de la bandeja del colector, cuidando de que haya sellamiento perfecto.

Los canales del colector solar deben ser lo bastante grandes para que ofrezcan poca resistencia al paso del aire caliente. Una pérdida de presión de 2.5 mm de agua es satisfactoria. Los canales con una profundidad de 4 cms. o superior son aceptables si su longitud no es superior a los 3 Mts. Un flujo satisfactorio es de 3 a 5 Mts³ por minuto y por Mt² de colector solar. El techo negro de metal o de asfalto es necesario de cualquier forma.

Los colectores tienen cada uno de ellos una entrada y una salida para el aire. La salida del uno se une por medio de bridas con la entrada del otro, y la salida de este se comunica con la entrada de la cabina de secado por medio de una manguera flexible que se une por medio de una transición a la cabina de secado. Luego encontramos dentro de la cabina el lugar donde penetra la bandeja y se efectúa el pro

ceso de secado, la cabina está unida por medio de bridas a un codo que a su vez se une de la misma forma con una transición soldada en su extremo con un tramo de ducto redondo que se acopla al extractor.

Los colectores tienen cada uno de ellos un área de colección de 1.92 m^2 .

IV 1.3 MEDICIONES

Se realizaron las siguientes mediciones:

- Flujo de aire y sus temperaturas (en el medio ambiente, a la entrada y salida del colector solar, a la entrada de la cabina de secado).

- Radiación solar

- Humedad relativa del ambiente

- Humedad del grano

Las temperaturas fueron obtenidas por medio de termocuplas conectadas a un equipo cuya escala varía de 0 a $10 \text{ MV} \pm 0.3\%$ de exactitud y 0.1% de sensibilidad; con cuatro entradas con lecturas registradas cada tres segundos.

PRUEBAS CON ARROZPRUEBA No. 1

Peso del grano	4.62 Kg.
Tiempo de duración de la prueba	1.0 hr.
Hora del día	10:48 11:48 .a.m.
Temperatura media del ambiente	24°C
Temperatura media del aire entrando al producto.	37°C
Humedad relativa ambiente	78 %
Flujo del aire	16 $\frac{M^3}{min}$ / M^2 de cama
3 camas de 2 cm. cada una	
Humedad inicial del grano	20%

CAMA #	HUMEDAD (%)
1	13.05
2	14.30
3	14.55

* Humedad promedio 13.97 %

PRUEBA No. 2

Peso del grano	4:62 Kg.
Tiempo de duración de la prueba	1.0 hr.
Hora del día	10:00 11:00 .a.m.
Temperatura media del ambiente	25°C
Temperatura media del aire entrando al producto.	40°C
Humedad relativa ambiente	77 %
Flujo de aire	$16 \frac{M^3}{min} / M^2$ de cama
3 camas de 2 cm. cada una	
Humedad inicial del grano	20 %

CAMA #	HUMEDAD (%)
1	12:70
2	13:45
3	13:70

* Humedad promedio 13.28 %

PRUEBA No. 3

Peso del grano	4.62 Kg.
Tiempo de duración de la prueba	1.0 hr.
Hora del día	2:20 3:20 p.m.
Temperatura media ambiente	26°C
Temperatura media del aire entrando al producto.	45.5°C
Humedad relativa ambiente	59 %
Flujo de aire	$16 \frac{M^3}{min} / M^2$ de cama
3 camas de 3-2-1 cm. respectivamente	
Humedad inicial del grano	20 %

CAMA #	HUMEDAD (%)
1 (3 cm)	12.80 %
2 (2 cm)	14.20 %
3 (1 cm)	14.35 %

* Humedad promedio 13.53 %

PRUEBA No. 4

Peso del grano	6.93 Kg.
Tiempo de duración de la prueba	1.0 hr.
Hora del día	11:32 12:32 p.m.
Temperatura media ambiente	27°C
Temperatura media del aire entrando al producto	47°C
Humedad relativa ambiente	65 %
Flujo de aire	$16 \frac{M^3}{min} / M^2 \text{ cama}$
3 camas de 3 cm. cada una	
Humedad inicial del grano	21 %

CAMA #	HUMEDAD (%)
1	12:20
2	12:70
3	13:70

* Humedad promedio 12.87 %

PRUEBA No. 5

Peso del grano	6.93 Kg.
Tiempo de duración de la prueba	1.0 hr.
Hora del día	12:05 1:05 p.m.
Temperatura media ambiente	24.5°C
Temperatura media del aire entrando al producto.	36.5°C
Humedad relativa ambiente	69 %
Flujo de aire	$16 \frac{M^3}{min} / M^2$ cama
3 camas de 3 cm. cada una	
Humedad inicial del grano	21 %

CAMA #	HUMEDAD (%)
1	14.30
2	15.60
3	16.55

* Humedad promedio 15.48 %

PRUEBA No. 6

Peso del grano	9.24 Kg.	
Tiempo de duración de la prueba	1.0 hr.	
Hora del día	12:40	1:40 p.m.
Temperatura media ambiente	29°C	
Temperatura media del aire entrando al producto.	49.5°C	
Humedad relativa ambiente	52 %	
Flujo de aire	$16 \frac{M^3}{min} / M^2$	cama
3 camas de 4 cm. cada una		
Humedad inicial del grano	20.5 %	

CAMA #	HUMEDAD (%)
1	11.60
2	13.80
3	14.60

* Humedad promedio 13.33 %

PRUEBAS CON MAIZPRUEBA No. 1

Peso del grano	8.46 Kg.	
Tiempo de duración de la prueba	1.0 hr.	
Hora del día	8:52	9:52 a.m.
Temperatura media ambiente	25°C	
Temperatura media del aire entrando al producto.	34°C	
Humedad relativa ambiente	72 %	
Flujo de aire	$16 \frac{M^3}{min}$	$/ M^2$ cama
3 camas 2 cm. cada una		
Humedad inicial	22.7 %	

CAMA #	HUMEDAD (%)
1	16.75
2	16.75
3	16.75

* Humedad promedio 16.75 %

* Humedad al cabo de 1 hr. 37 min. = 13.7 %

PRUEBA No. 2

Peso del grano	8.46 Kg.	
Tiempo de duración de la prueba	1.0 hr.	
Hora del día	1:50	2:50 p.m.
Temperatura media ambiente	29°C	
Temperatura media del aire entrando al producto.	53.5°C	
Humedad relativa ambiente	57 %	
Flujo de aire	$16 \frac{M^3}{min}$	$/ M^2$ cama
3 camas 2 cm. cada una		
Humedad inicial = 22.7 %		

CAMA #	HUMEDAD (%)
1	14.4
2	15.3
3	16.1

* Humedad promedio 15.27 %

* Humedad al cabo de 1 hr. 30 min. = 12.5 %

PRUEBA No. 3

Peso del grano	12.69 Kg.	
Tiempo de duración de la prueba	1.0 hr.	
Hora del día	10:35	11:35 a.m.
Temperatura media ambiente	27°C	
Temperatura media del aire entrando al producto.	43.5°C	
Humedad relativa ambiente	60 %	
Flujo de aire	$16 \frac{M^3}{min} / M^2 \text{ cama}$	
3 camas 3 cm. cada una		
Humedad inicial = 22.7 %		

CAMA #	HUMEDAD (%)
1	16.2
2	16.2
3	16.7

* Humedad promedio 16.37 %

* Humedad al cabo de 1 hr. 30 min. = 13.5 %

PRUEBA No. 4

Peso del grano	16.9 Kg.
Tiempo de duración de la prueba	1.0 hr.
Hora del día	12:10 1:10 p.m.
Temperatura media ambiente	28°C
Temperatura media del aire entrando al producto.	50°C
Humedad relativa ambiente	55 %
Flujo de aire	$16 \frac{M^3}{min} / M^2 \text{ cama}$
3 camas 4 cm. cada una	
Humedad inicial del grano	22.7 %

CAMA #	HUMEDAD (%)
1	15.2
2	16.2
3	18.2

* Humedad promedio 16.5 %

* Humedad al cabo de 1 hr. 30 mín. = 14.2 %

IV 1.4 RESULTADOS

Basándonos en los datos obtenidos sobre la temperatura media del aire a la salida de los colectores y la energía promedio obtenida de estos con un determinado flujo de aire se puede dar una idea del espesor de la cama de granos que es aconsejable a usar.

LECTURAS TOMADAS DESDE LAS 9:00 A.M. HASTA LAS 5:00 P.M.

HUMEDAD AMBIENTE MEDIA %	TEMPER. AMBIENTE MEDIA. °C	TEMP. SALIDA DE COLEC. (MEDIA)	ENERG. PROMEDIO $\frac{\text{Kcal}}{\text{Hr}}$
44	31	59.5	1326
65.4	27.4	48.3	1078
60.4	28.2	54.2	1326
46.6	30.5	58	1233
47.3	29.7	57.7	1296

Estas mediciones se las hicieron durante cinco días de los cuales se alternaban días soleados, medio soleados y nublado. Pudiendo entonces a partir de estos valores obtener un promedio de energía utilizable que sería:

$$(1252 \pm 6\%) \text{ Kcal/hr}$$

De los cuales aproximadamente se pierden el 10% hasta llegar a la cabina de secado, esto se los analizará en el siguiente capítulo.

ENERGIA REQUERIDA POR HORA PARA SECAR ARROZ CON DIFERENTES
CONDICIONES INICIALES Y FINALES DE HUMEDAD

$$\dot{m} = 425 \frac{\text{lb aire}}{\text{Hr}}$$

PESO DE GRANO (KG)	HUMEDAD INICIAL (%)	HUMEDAD FINAL (%)	TEMPERATURA AMB. (°C)	HUMEDAD RELA.AMB. (%)	* TEMPERATURA MEDIA AIR. CAL. (°C)	ENERGIA REQ. (Kcal)
4.62	20	13.28	25	77	40	727
4.62	20	13.97	24	78	37	708
6.93	21	12.87	27	65	47	1078
6.93	21	15.48	24.5	69	36.5	677
9.24	20.5	13.33	29	52	49.5	1020

Partiendo de estos resultados, las condiciones que mas se aproximan a las pruebas realizadas son las correspondientes a 3 camas de 4 cm. cada una, lo que equivale a decir un promedio de secado de 9.24 kg/hr (con una extracción de humedad de 7.17%/hr ó 74 kg por día sol.

Este rendimiento se lo ha logrado con un área de colección 3.84 m², llevando el rendimiento de secado por metro cuadrado de colector tendríamos:

19.27 Kg/M² colector, de grano seco en 8 horas

En lo referente al maíz, podemos secar bajo las mismas consideraciones anteriores 11.28 kg/hr ó 90.24 kg por día, lo que equivale a un rendimiento de 23.5 kg por M² de colector.

Comparando entre secar maíz y arroz tenemos que, de este último se seca aproximadamente un 80 % menos en relación al maíz; esto se debe a la diferencia que existe en la difusividad de estos dos granos.

IV 1.4.1 ANALISIS COMPARATIVO CON UN SECADOR CONVENCIONAL

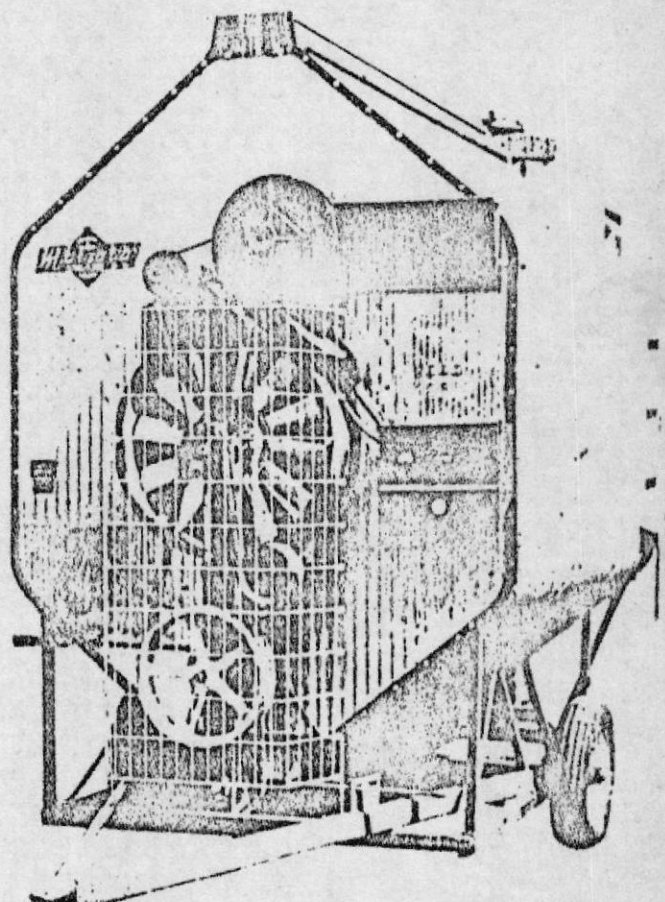
El secador convencional escogido para esta comparación extrae el 3 % de humedad a 2400 kg de arroz en 1 hr. Esto implica que los 7.17% de humedad los extraerá en 2.39 hr. lo que trae como resultado un rendimiento de secado de aproximadamente 1000 kg. por hora ó 8.000 kg por día (8 horas) con un consumo de energía de 442000 kcal/hr mas una potencia de 20 HP, con un caudal de aire de 470 M³/min. 93°C.

Con el sistema que se propone secaríamos los mismos 8000

* Entrando a las camas de granos

las más afamadas secadoras de sistema estático

**simplicidad
y rendimiento**



ESPECIFICACIONES

Peso	2.020 Kg.
Ancho	2.335 m.
Largo	5.605 m.
Altura	3.670 m.
Ancho de la columna de granos	48 cm.
Capacidad	7,87 Tn.
Presión estática	80 mm.
Caudal de aire	470m ³ /min.
Kilocalorías/hora	442.000
Potencia requerida	25 HP.

Este modelo corresponde a la más famosa unidad de sistema estático. Práctica, sencilla y económica, es tan segura para operar como fácil de transportar.

RENDIMIENTO HORARIO GARANTIZADO

Incluidos tiempos de carga, enfriado y descarga

Extracción de Humedad 3%

Trigo, maíz, cebada o sorgo	Kgs.	5.500
Girasol o avena	Kgs.	4.250
Arroz	Kgs.	2.400

kg en 8 horas haciendo uso de 415 m^2 de colector y con un caudal de aire de $291 \text{ M}^3/\text{min}$. con un requerimiento de energía de aproximadamente 111000 Kcal/hr ,. sin considerar las pérdidas.

	Secador Convencional	Secador Solar
Capacidad (kg)	8000	8000
Caudal de aire (M^3/min)	470	291
Kcal/hr	442000	111000

IV 1.5 OBTENCION DE LA CURVA DE SECADO

Para determinar las curvas de secado de grano con diferente contenido de humedad inicial y varios espesores de cama de grano, se procedió a tomar muestras de grano de la superficie de la cama, determinando su contenido de humedad y graficando su variación en función del tiempo.

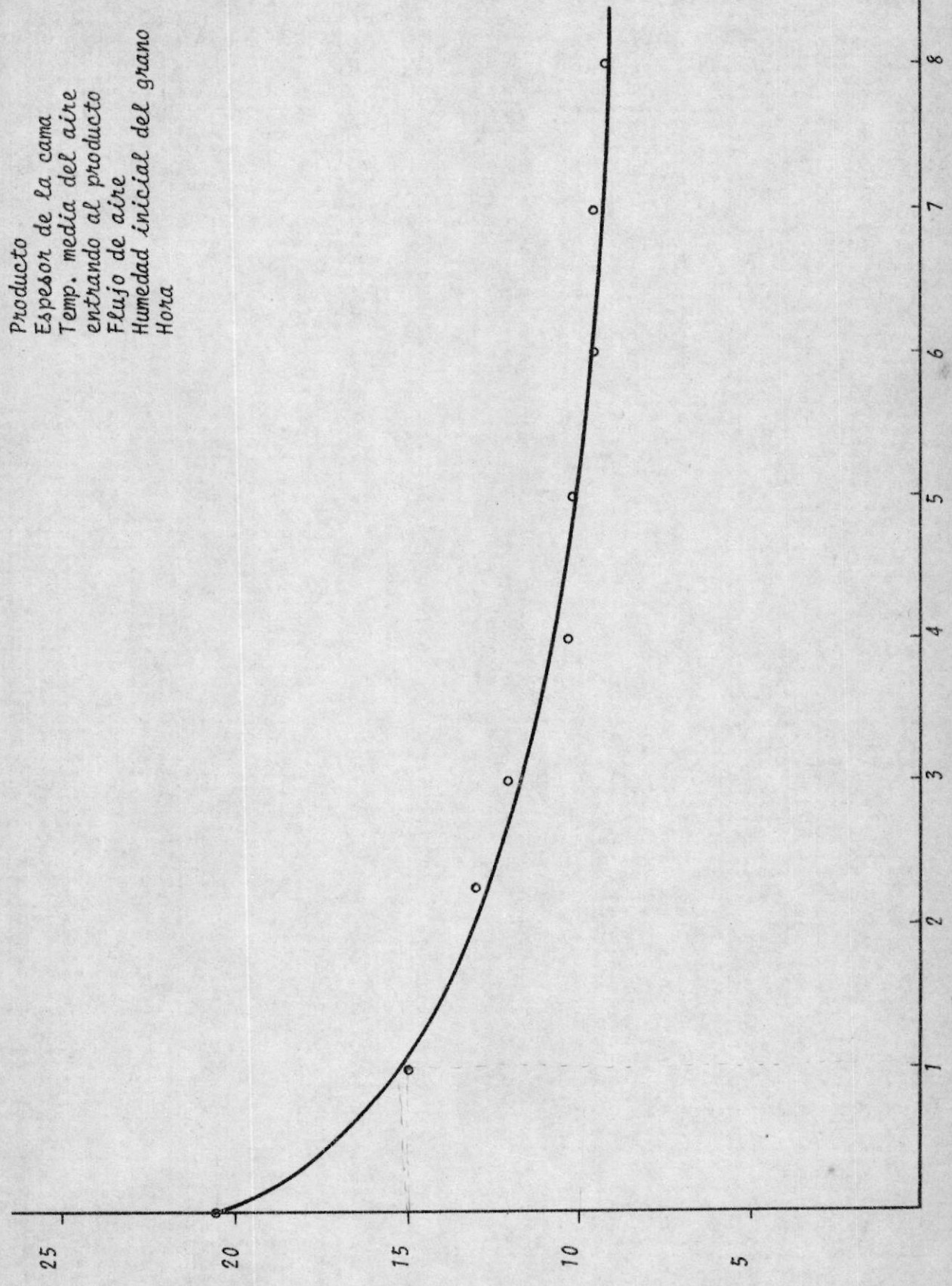
En las figuras 4.1, 4.2 y 4.3 se ilustran las curvas de secado para tres diferentes espesores de cama y luego se puede observar en la figura 4.4 la curva de secado para grano puesto en el suelo recibiendo libre y directamente la radiación solar.

IV 2 DETERMINACION DEL AREA DE COLECCION

IV 2.1 PERDIDAS TERMICAS EN LA CABINA DE SECADO.

He considerado como cabina de secado todo aquello que quede después que el aire caliente abandona los colectores, es decir, las pérdidas térmicas en la cabina será aquella energía que no logra llegar a la cama de granos.

Kg. agua/Kg. s.s. (%)



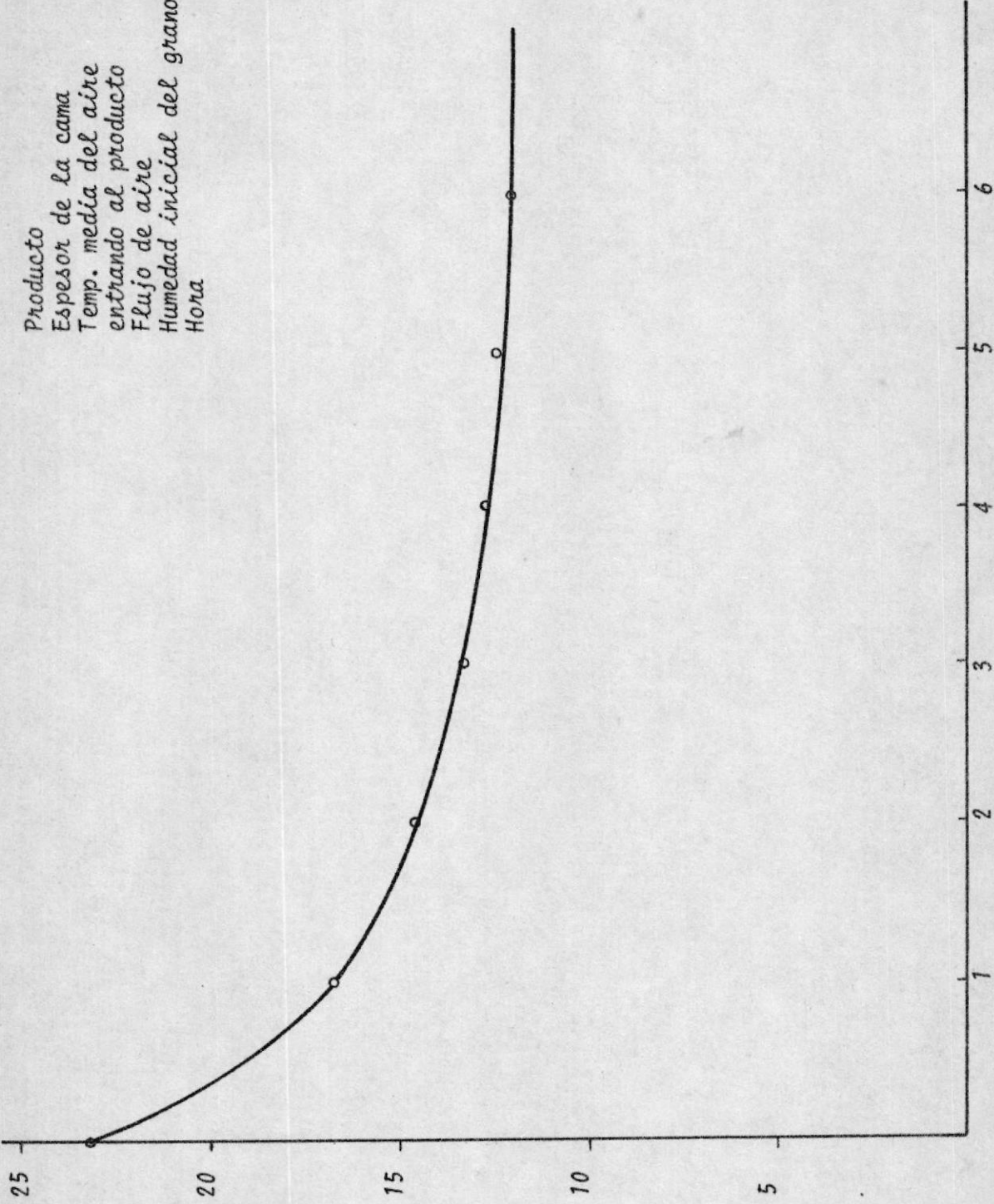
Producto
 Espesor de la cama
 Temp. media del aire
 entrando al producto
 Flujo de aire
 Humedad inicial del grano
 Hora

arroz
 2.5 cm.
 53.7°C
 160 M³/hr.
 20.5 %
 9 cm. 5 pm.

Tiempo (hr.)

Fig. 4.1

Kg. agua/Kg. s. s.



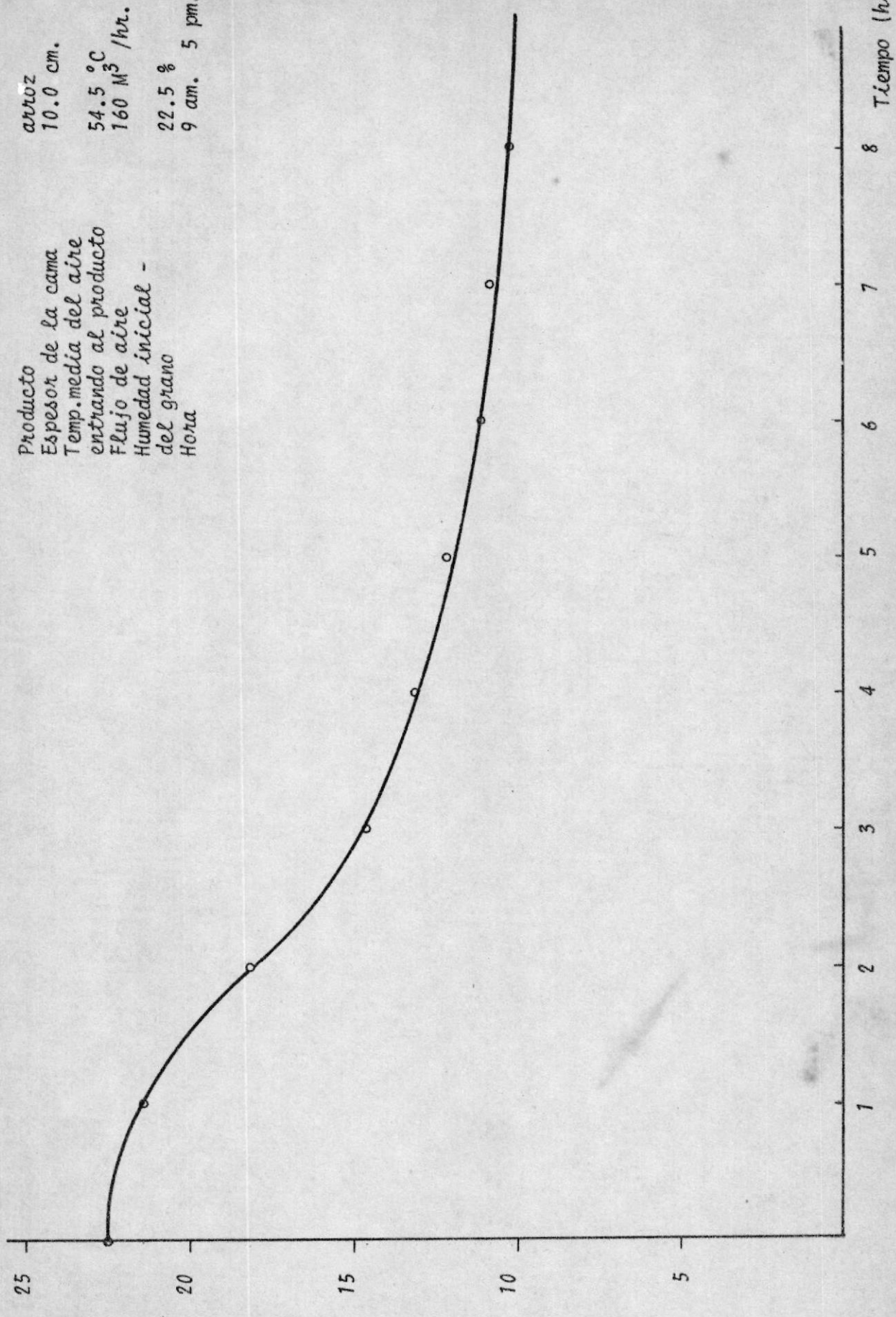
Producto
 Espesor de la cama
 Temp. media del aire
 entrando al producto
 Flujo de aire
 Humedad inicial del grano
 Hora

avioz
 5.0 cm.
 56 °C
 160 M³/hr.
 23.2 %
 10 cm. 4 pm.

Tiempo (hr.)

Fig. 4.2

Kg. agua / Kg. s.s. (%)



Producto
 Espesor de la cama
 Temp. media del aire
 entrando al producto
 Flujo de aire
 Humedad inicial -
 del grano
 Hora

arroz
 10.0 cm.
 54.5 °C
 160 M³ /hr.
 22.5 %
 9 am. 5 pm.

Fig. 4.3

Kg. agua / Kg. s.s.

Producto
Humedad inicial
del grano
20.5 %
arroz

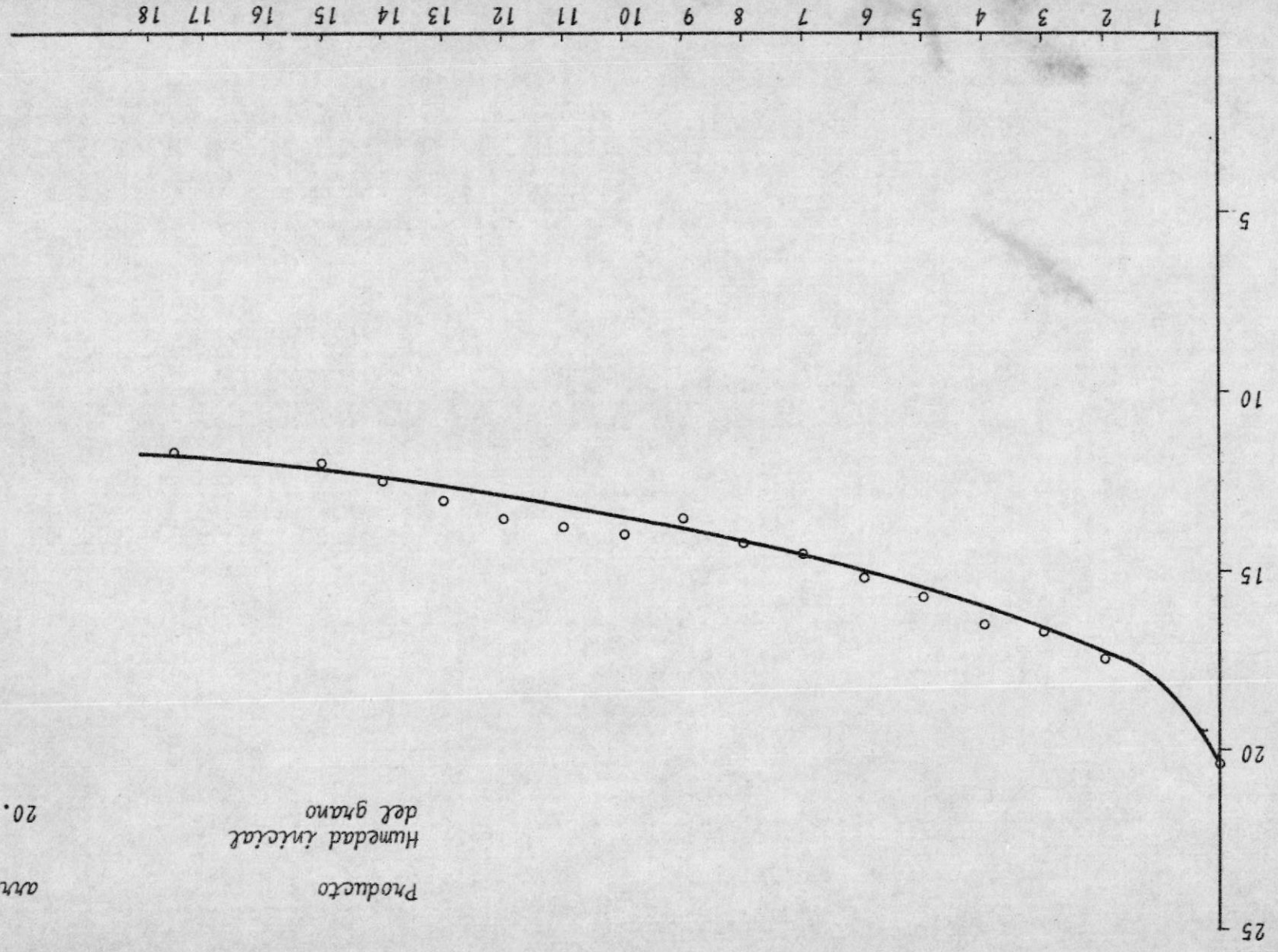


Fig. 4.4

Tiempo (hr.)

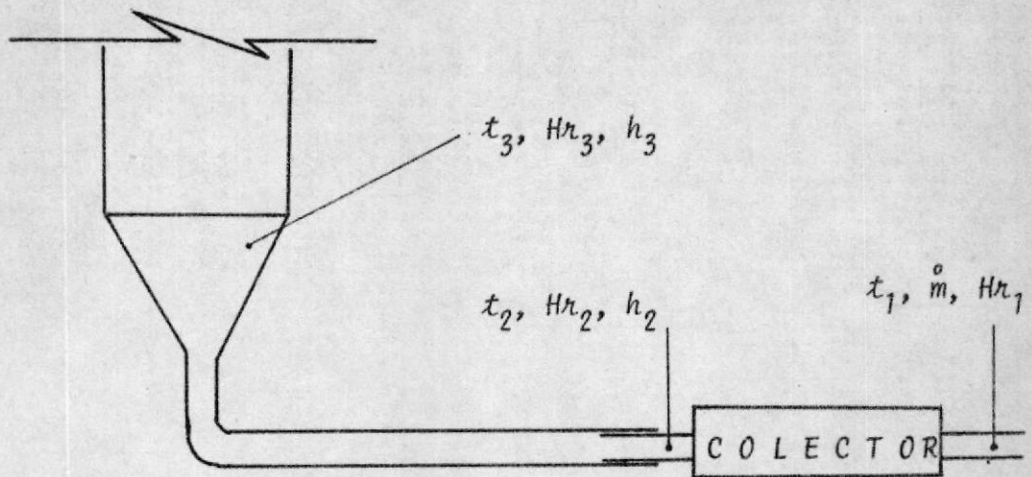


Fig. 4.5 Esquema del Sistema

- T_1 = Temperatura a la entrada del colector
 T_2 = Temperatura a la salida del colector
 T_3 = Temperatura a la entrada de la cama de granos
 Q_p = Energía perdida
 Hr_1 = Humedad relativa del aire ambiente
 h_2 = Entalpía del aire @ T_2
 h_3 = Entalpía del aire @ T_3
 \dot{m} = Flujo másico de aire

$$Q_p = \dot{m} (h_3 - h_2)$$

Medidas tomadas durante 1 hr.

11:32

12:32

$$Hr_1 = 65 \%$$

$$T_1 = 27^\circ\text{C}$$

$$T_2 = 51^\circ\text{C}$$

$$T_3 = 47^\circ\text{C}$$

De la tabla psicrométrica la entalpía del aire h_2 con $T_1 = 27^\circ\text{C}$ y $Hr_1 = 65\%$ y $T_2 = 51^\circ\text{C}$.

$$h_2 = 46.0 \text{ BTU/lb}$$

$$h_3 = 47.78 \text{ BTU/lb}$$


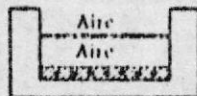



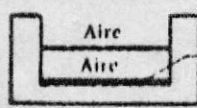
$$Q_p = 425 \frac{\text{lb}}{\text{hr}} (47.78 - 46.0) \frac{\text{BTU}}{\text{lb}}$$

$$Q_p = - 518.5 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}} = - 130.6 \frac{\text{Kcal}}{\text{hr.}}$$

La energía que se utilizó durante esta hora fue de 1020 Kcal; esto quiere decir que las pérdidas son del orden del 10%.

IV 2.2 ENERGIA UTIL

Se entiende por energía útil toda aquella que es posible obtener para realizar un trabajo. En nuestro caso, de toda la energía que llega a la superficie de la tierra, tanto como radiación directa y difusa con el sistema de colectores solares planos solo una parte de ésta puede ser aprovechable. En la tabla siguiente se anotan algunas posibilidades de diseño para colectores de calor solar de placa plana.

Diseño	Tipo de absorbente	Tipo de extracción de calor	Funcionamiento práctico a intensidades y muy elevadas de insolación
1. 	Negro	Aire circulante	~ 50° a 70° C cuando el 50% del calor es extraído
2. 	Negro	Agua circulante	~ 50° a 70° C cuando el 50% del calor es extraído
3. 	Negro	Aire circulante (o agua circulante)	~ 160° C cuando el calor no es extraído ~ 50° a 70° C cuando el 50% del calor es extraído
4. 	Negro	Aire circulante	> 160° C cuando el calor no es extraído
5. 	Negro	Aire circulante (o agua circulante)	> 160° C cuando el calor no es extraído
6. 	Selectivo	Aire circulante (o agua circulante)	~ 250° C cuando el calor no es extraído ~ 100° C cuando parte del calor es extraído

Selectivo negro = absorción elevada para la luz visible, baja emisión en la infrarroja (capas de semiconductor, capas de interferencia)

(fuente: *Electricidad Solar*)

Se puede notar claramente los diferentes rangos de temperatura que se pueden obtener en colectores de placa plana, tanto para el caso cuando el aire no es removido como para cuando el calor es extraído en un 50%. El diseño nuestro es parecido al No. 3 de la tabla, el cual indica que deben obtenerse temperaturas en ese rango con colectores 50 % efi-

cientes (este aspecto lo analizaremos más adelante).

De esta tabla se puede dar una idea de cuánta energía útil es posible obtener, a más por supuesto de considerar las pérdidas que tienen lugar desde la salida de los colectores hasta el lugar donde se encuentra el grano, que como vimos en la sección anterior oscilan en el orden del 10%.

IV 2.3 ENERGIA REQUERIDA PARA EL SECADO

El secado solar se puede producir directamente exponiendo el material a la radiación solar, con o sin cubierta transparente. También se puede realizar indirectamente por calentamiento a través de una corriente de aire de baja humedad relativa. Cuanto menos húmedo esté el aire que pasa, más agua se evaporará del material a través del que pase. El producto se puede almacenar en cajas profundas que ocupan poco espacio, y el calor necesario para la evaporación de la humedad se obtiene del aire caliente.

Puesto que el aire tiene una baja capacidad calorífica es necesario utilizar grandes volúmenes de aire y hacerlo pasar a través de impulsores. Este método indirecto de calentamiento de productos agrícolas, tiene la ventaja de impedir el sobrecalentamiento de algunas áreas y se puede utilizar para ahorrar combustible.

Como habíamos anotado anteriormente en esta misma sección, existen varias etapas en el mecanismo de secado de sólidos, cada una de las cuales puede ser determinada bajo ciertas condiciones. La superficie del sólido se calienta

por radiación directa o por la corriente de aire de manera que crece la presión de vapor del agua y se acelera su escape a la corriente circundante de aire. El agua se difunde hacia la superficie desde las capas interiores del material y el calor fluye hacia el interior desde la superficie del material. Cuanto más poroso sea el material, más rápido es el flujo de humedad y más lento el flujo de calor. El calor necesario es de unas 590 calorías por cada gramo de agua evaporada; se alcanza un estado estacionario (humedad de equilibrio) cuando el calor necesario para la evaporación y las pérdidas de calor igualan al calor total absorbido.

* ENERGIA REQUERIDA (Q_t)

- Q_1 = Calor para calentar la materia sólida
 Q_2 = Calor para calentar el agua del producto
 Q_3 = Calor para evaporar el agua del producto
 Q_4 = Pérdidas térmicas ($\sim 10\%$)
 Q_5 = Calor para "romper" la tensión superficial que forma la película de agua sobre el producto ($\sim 5\%$ del total).
 Q_6 = Calor requerido para calentar el aire

CALOR PARA CALENTAR LA MATERIA SOLIDA (Q_1)

$$Q_1 = m_s \quad C_s \quad \Delta T$$

- m_s = masa del sólido
 C_s = Calor específico
 ΔT = Diferencia de temperatura (entre la temperatura del grano y la del aire caliente).

$$Q_1 = 9.24 \text{ kg} \times 0.5 \frac{\text{Kcal}}{\text{kg}^\circ\text{C}} (49.5 - 29)^\circ\text{C}$$

$$Q_1 = 94.7 \text{ Kcal}$$

CALOR PARA CALENTAR EL AGUA DEL PRODUCTO (Q_2)

$$Q_2 = m_a C_a \Delta T$$

m_a = masa de agua

c_a = Calor específico del agua

ΔT = Diferencia de temperatura

$$m_a = \frac{H_i - H_f}{100 - H_f} \left(\frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg.sólido}} \right)$$

H_i = Humedad inicial

H_f = Humedad final

$$m_a = \frac{20.5 - 13.33}{100 - 13.33} = 0.08 \frac{\text{Kg agua}}{\text{Kg sólido}}$$

$$m_a = 0.08 \frac{\text{Kg. agua}}{\text{Kg sólido}} \times 9.24 \text{ Kg.sólido}$$

$$m_a = 0.76 \text{ Kg. agua}$$

$$Q_2 = 0.76 \text{ Kg} \times 1.0 \frac{\text{Kcal}}{\text{Kg}^\circ\text{C}} (49.5 - 29)^\circ\text{C}$$

$$Q_2 = 15.6 \text{ Kcal}$$

CALOR PARA EVAPORAR EL AGUA DEL PRODUCTO (Q_3)

$$Q_3 = m_a (h_2 - h_1)$$

h_2 = Entalpía del vapor saturado @ T

h_1 = Entalpía del líquido saturado @ T

T = 49.5°C (121.1°F)

$$h_2 = 1113.7 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}}$$

$$h_1 = 89.0 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}}$$

$$Q_3 = 0.76 \text{ kg} (1113.7 - 89) \frac{\text{BTU}}{\text{lb}} \times \frac{2.2 \text{ lb}}{\text{Kg.}} \times \frac{0.252 \text{ Kcal}}{\text{BTU}}$$

$$Q_3 = 431.8 \text{ Kcal}$$

$$Q_4 = 130 \text{ Kcal}$$

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$$

Podemos hacer una primera aproximación de Q_5

$$Q = 94.7 + 15.6 + 431.8 + 130 = 672.1 \text{ Kcal}$$

$${}^{\circ}\text{o} = Q_5 = 33.61 \text{ Kcal}$$

Segunda aproximación

$$Q = 705.21 \text{ Kcal}$$

$$Q_5 = 35.3 \text{ Kcal}$$

Calor necesario para el material = 707.5 Kcal

Comparando esta cantidad con la encontrada experimentalmente que era 1020 Kcal, la diferencia 312.5 Kcal es la que se lleva el aire al ser expulsado a la atmósfera todavía caliente, cuyo cálculo se muestra a continuación:

$$\frac{\text{Energía Requerida para el material}}{\text{Masa de aire. lb por hr} \times C} = \frac{2807.5}{423.7 \times 0.24} = 27.6^{\circ}\text{F}$$

$$\text{Temperatura media del aire expulsado a la atmósfera} = 121.1 - \underbrace{27.6}_{\text{}} = 93.5^{\circ}\text{F}$$

$$(Q_6) \text{ Calor requerido para calentar el aire} = 423.7 (93.5 - 84.2) 0.24 = 945.7 \text{ BTU}$$

$$Q_6 = 238.3 \text{ Kcal}$$

Energía requerida = + Energía requerida para el material
Energía requerida para calentar el
aire.

$$Q_t = Q + Q_b$$

$$Q_t = (707.5 + 238.3) \text{ Kcal}$$

$$Q_t = 945.8 \text{ Kcal.}$$

Que representa el 93% de la encontrada experimentalmente.

IV 2.4 PERIODO DE SECADO; INFLUENCIA DEL ESPESOR

Se conoce como período de secado el tiempo que el grano tarda en alcanzar una humedad determinada bajo condiciones de flujo, temperatura y humedad del aire.

En la sección IV 1.5 se describen las curvas de secado para condiciones iguales de flujo y una pequeña diferencia en lo referente a la temperatura.

Cabe recalcar acerca de que las humedades del grano no son humedades medias, sino la humedad en la superficie de la cama del grano (La humedad media es menor). Se nota fácilmente que una cama de 2.5 cm se seca en menor tiempo que una de 5 cm. y a su vez ésta en menor tiempo que una de 10 cm.

IV 2.5 FLUJO DE AIRE

El flujo de aire a utilizar se lo determinó partiendo de las recomendaciones que hacen personas que han experimentado en el secado industrial.

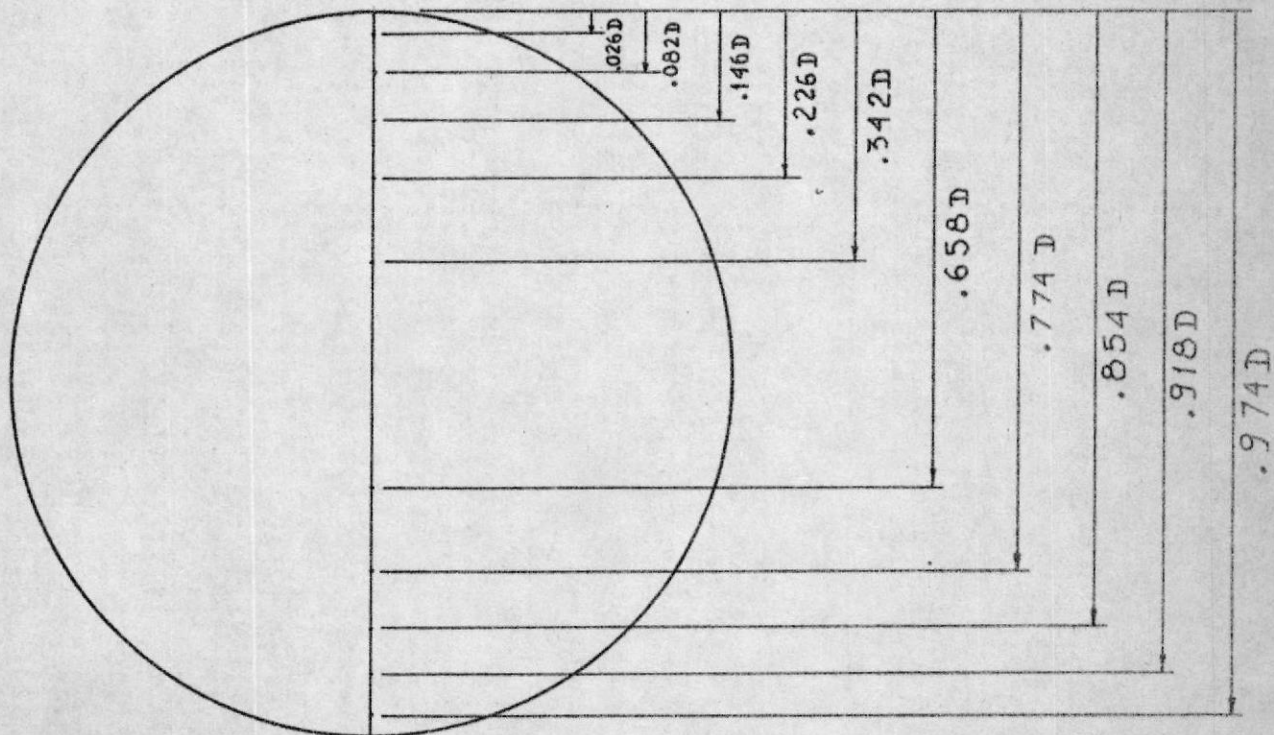
Es satisfactorio un flujo de 36 M^2 por minuto por cada M^2 de cama.

DETERMINACION DEL FLUJO DE AIRE

Para la determinación del flujo de aire se partió encontrando primero la velocidad media del aire en una sección transversal de la manguera flexible que lo conduce.

Se recomiendan de 6 a 12 localizaciones para ductos pequeños y de 20 a 40 para ductos muy grandes. Las localizaciones son puntos correspondientes a centros de iguales áreas anulares.

Para 10 puntos transversales



Posición del Pitot	Presión de veloc. (Cm. H ₂ O)	Velocidad (Ft/min)
1	0.068	652.9
2	0.093	764.3
3	0.103	804.5
4	0.105	814.3
5	0.108	824.0
6	0.108	824.0
7	0.105	814.3
8	0.105	814.3
9	0.100	794.7
10	0.068	652.9

$$\bar{V} = 776 \text{ Ft}/\text{min}; \quad A = 0.122 \text{ Ft}^2$$

$$\text{Caudal} = 94.6 \text{ Ft}^3/\text{min} = 160 \text{ M}^3/\text{hr} = 2.7 \text{ M}^3/\text{min}$$

IV 2.6 EFICIENCIA DEL COLECTOR SOLAR

LECTURAS TOMADAS DESDE LAS 9:30 A.M. HASTA LAS 4:30 P.M.

TEMP. SALIDA COLECTOR LECTURA (M _v)	TEMP. AMB. (°C)	HUMEDAD RELATIVA AMBIENTE (%)
0.6	24	70
1.05		
1.45	27	60
1.70		
1.85	27	57
1.90		
1.95	29	49
1.95		
1.90	31	42
1.85		
1.67	33	36
1.50	32.5	36

TEMP. SALIDA COLECTOR LECTURA (M_v)	TEMP. AMB. (°C)	HUMEDAD RELATIVA AMBIENTE (%)
1.28	32.5	34
1.05		
0.75	31	42
<u>1.497</u>	<u>29.7</u>	<u>47.3</u>

VALORES MEDIOS

Temp. salida colector = 59°C

Temp. entrada colector = 29.7°C

Humedad relativa Amb. = 47.3%

Flujo másico de aire = $423.7 \frac{\text{lb}}{\text{hr}}$

ENERGIA ADQUIRIDA POR EL AIRE (\bar{Q}_u)

$$\bar{Q}_u = \dot{m} \Delta h$$

$$\Delta h = h_2 - h_1$$

$$h_2 = \text{Entalpía a la salida del colector } T = 59^{\circ}\text{C}$$

$$h_1 = \text{Entalpía a la entrada del colector } T = 29.7^{\circ}\text{C y}$$

$$H_r = 47.3\%$$

$$h_1 = 34.09 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}} ; h_2 = 47.55 \frac{\text{BTU}}{\text{lb}}$$

$$\bar{Q}_u = 423.7 \frac{\text{lb}}{\text{hr}} \times (47.50 - 34.09) \frac{\text{BTU}}{\text{lb}}$$

$$\bar{Q}_u = 5681.8 \frac{\text{BTU}}{\text{hr}} \times 7.0 \text{ hr}$$

$$\bar{Q}_u = 39772.7 \text{ BTU}$$

Energía incidente sobre el colector solar durante las 7 horas fue:

$$Q_s = 1520 \frac{\text{BTU}}{\text{ft}^2}$$

Los colectores tienen un área total igual a 41.32 Ft^2

$$Q_s = 62806.4 \text{ BTU}$$

Entonces la eficiencia resultó:

$$N = \frac{Q_u}{Q_s} = 63.3 \%$$

IV 3 DETERMINACION DE LA POTENCIA DEL VENTILADOR

Para especificar la potencia del ventilador hace falta conocer la caída de presión del sistema. La caída particular de presión más importante es la que ocurre en el paso del aire a través del grano. Este fenómeno puede estudiarse como el flujo de un gas a través de una cama empacada o un medio póso, como (Foust, 1960)

$$-\frac{\Delta P}{L} g_c \frac{D_p^3}{\rho u^2} \frac{\epsilon^3}{(1-\epsilon)} = 150 \frac{(1-\epsilon)}{\text{Rep.}} + 1.75$$

Donde $-\Delta P$ es la caída de presión a través de la cama de granos, L es el alto de la cama. D_p es el diámetro equivalente de los granos, ρ es la densidad del aire, u es la velocidad del aire con respecto al grano, ϵ es la fracción de volumen de la cama no ocupada por sólidos, y Rep es el número de Reynolds referido a D_p . La ecuación expresada en el sistema inglés de unidades requiere de $g_c (= 32.174 \text{ lb Ft/lbf seg}^2)$ para ser consistente.

Dado que el problema al que se aplica esta relación presenta variaciones importantes de ρ y u a lo largo de la cama, además de las fuertes desviaciones con respecto del valor medio exhiben D_p y ϵ , se hace trabajo experimental con

cada tipo de grano para determinar la caída de presión para diferentes espesores de cama de granos y diferentes flujos de aire, como se muestra en las gráficas de la figura 4.6 experimentado con arroz.

En condiciones de trabajo es decir con 3 camas de 4 cm cada una y un flujo de $160 \frac{M^3}{H}$ el amperaje medido fue de 1.0 amp. con un voltaje de 220 V; por lo tanto la potencia consumida era de:

$$P = V I$$

$$P = 220 V \times 1.0 \text{ amp.} = 220 \text{ Vatios}$$

Conociendo la caída de presión estática a lo largo de todo el sistema.

$$FAN \text{ BHP} = \frac{CFM \times SP}{6356 \times E_{ffs}}$$

BHP Potencia al freno

CFM Flujo de aire (Ft^3/min)

SP Presión estática (pulgadas de agua)

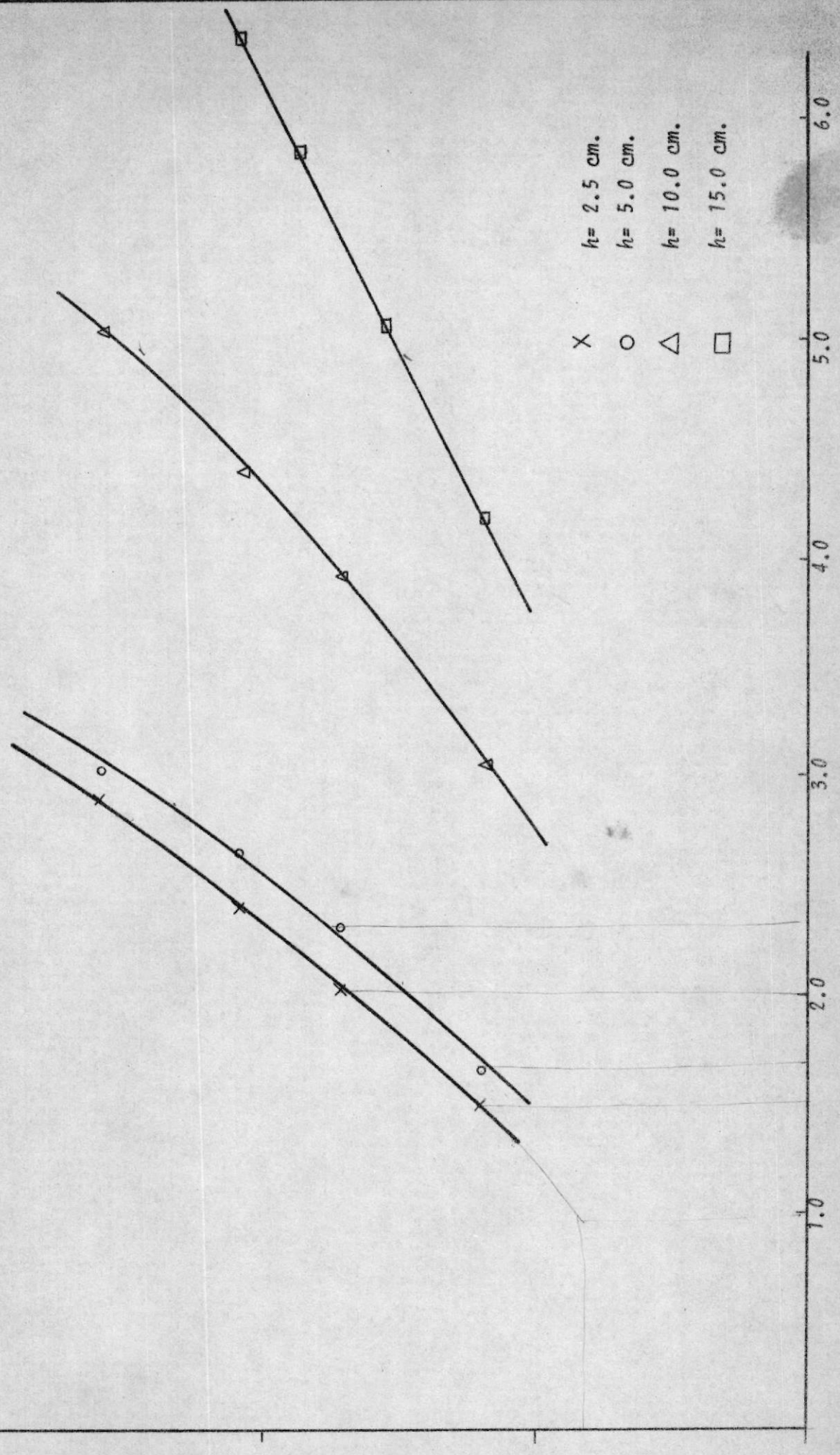
E_{ffs} Eficiencia del ventilador (decimal)

250

200

150

100



x $h=2.5$ cm.
o $h=5.0$ cm.
 Δ $h=10.0$ cm.
 \square $h=15.0$ cm.

Fig. 4.6

ΔP (mm. H₂O)

d) Del análisis de los resultados se obtiene la conclusión global de que el diseño de un secador solar de granos (calentador solar de aire más sistema de circulación de este aire de secado) puede hacerse en base a los criterios es-

natura del aire.

c) La humedad de equilibrio del grano es fijada por la tempe-

ciencia del calentador solar.

b) El gasto de aire y su temperatura son una función del apor-

te.

a) El tiempo necesario para que el grano alcance una determi-

nada humedad estará en función de:

se al presente trabajo podemos concluir lo siguiente:
La cantidad de grano por unidad de área de la cama de se-
cado y del gasto de aire, su temperatura y su humedad re-

Las cifras correspondientes a las pérdidas de granos y
a la carestía de alimentos hacen obligatorio considerar se-
riamente el desarrollo de la técnica del secado solar. En ba-
se al presente trabajo podemos concluir lo siguiente:
Existen la certeza de que la deficiencia en el secado y
la conservación de granos, particularmente del arroz, se tra-

duce en pérdidas del orden de 10.7 mil toneladas al año o
más del 7 % de la producción nacional. Estas pérdidas se pre-

sentan por igual en todas las zonas productoras.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CAPITULO V

tablecidos en este trabajo.

RECOMENDACIONES

- a) Realizar un mayor trabajo experimental que proporcione con mejor exactitud las variables de diseño para secadores de grano a nivel industrial.
- b) Efectuar trabajo experimental con granos diferentes al arroz y maíz.
- c) Diseñar, construir y operar otros calentadores solares de aire buscando un mejor aprovechamiento de la radiación solar.
- d) Las correlaciones disponibles no son concluyentes. Debe explorarse la adecuación del método a camas de grano hasta de 3 m. de altura.
- e) Más urgentemente, debe promoverse la construcción de un secador solar piloto que permita la comprobación o perfeccionamiento de las pruebas realizadas.
- f) Operar colectores solares con almacenadores de energía para que funcionen 24 hr/día con niveles térmicos más constantes.
- g) Los trabajos experimentales y teóricos realizados hasta ahora en el laboratorio de energía solar de la ESPOL, relativas al secado solar, son concluyentes en cuanto que demuestran la viabilidad técnica y económica del proceso. Ignorar sus ventajas sobre procesos tradicionales equivale a

aceptar las pérdidas en producción de las que se habla al principio de este trabajo.

Se recomienda promover la aceptación del sistema solar a todos los niveles privados y gubernamentales del ramo.

Engineering GUIDE with APPLICATION DATA AND METRIC CONVERSIONS

(Fuente: Protec. Inc. Miami Florida.)

BASIC FAN LAWS

VARIABLE	WHEN SPEED CHANGES	WHEN DENSITY CHANGES
VOLUME	Varies DIRECT with Speed Ratio $CFM_2 = CFM_1 \left(\frac{RPM_2}{RPM_1}\right)$	Does Not Change
PRESSURE	Varies with SQUARE of Speed Ratio $P_2 = P_1 \left(\frac{RPM_2}{RPM_1}\right)^2$	Varies DIRECT with Density Ratio $P_2 = P_1 \left(\frac{D_2}{D_1}\right)$
HORSEPOWER	Varies with CUBE of Speed Ratio $HP_2 = HP_1 \left(\frac{RPM_2}{RPM_1}\right)^3$	Varies DIRECT with Density Ratio $HP_2 = HP_1 \left(\frac{D_2}{D_1}\right)$

FRICTION LOSS PER 100 FEET OF ROUND DUCT (Inches Water Gauge)

PIPE SIZE	4"		5"		6"		8"		10"		12"			
	VEL. FPM	CFM	FL	CFM	FL	CFM	FL	CFM	FL	CFM	FL	CFM	FL	
2000	175	1.8	273	1.4	393	1.1	535	.90	690	.77	1002	.58	1571	.47
2200	192	2.2	300	1.6	432	1.3	580	1.1	768	.93	1200	.70	1728	.56
2400	209	2.6	327	1.9	472	1.6	642	1.3	838	1.1	1310	.82	1895	.65
2600	227	3.0	355	2.3	511	1.8	685	1.5	900	1.3	1420	.96	2040	.77
2800	245	3.4	382	2.7	550	2.1	748	1.7	977	1.5	1530	1.1	2300	.87
3000	262	3.9	409	3.0	588	2.4	802	2.0	1048	1.7	1638	1.3	2355	1.1
3200	279	4.5	437	3.3	628	2.7	855	2.3	1118	1.9	1748	1.4	2510	1.2
3400	297	5.0	464	3.6	668	3.1	910	2.6	1188	2.2	1858	1.6	2670	1.3
3600	314	5.6	492	4.3	707	3.4	962	2.8	1258	2.4	1965	1.6	2825	1.4
3800	332	6.2	518	4.6	746	3.8	1018	3.2	1327	2.7	2070	2.0	2980	1.6
4000	350	6.9	546	5.3	786	4.3	1070	3.5	1396	2.9	2184	2.2	3142	1.8
4200	367	7.8	573	5.8	825	4.6	1125	3.5	1467	3.2	2290	2.5	3300	2.0
4400	384	8.8	600	6.4	864	5.4	1176	4.4	1536	3.7	2400	2.8	3456	2.2
4600	418	10	654	7.6	944	6.4	1264	5.2	1676	4.4	2620	3.3	3770	2.6
5200	454	12	710	9.2	1022	7.2	1390	6.0	1818	5.2	2840	3.8	4080	3.1
5600	490	14	764	11	1100	8.4	1496	6.8	1954	6.0	3060	4.4	4400	3.5
6000	524	16	818	13	1176	9.6	1604	8.0	2096	6.8	3276	4.9	4710	3.9
7000	611	21	955	17	1375	13	1873	11	2445	8.6	3820	6.6	5500	5.3

PIPE SIZE	14"		16"		18"		20"		24"		30"			
	VEL. FPM	CFM	FL	CFM	FL	CFM	FL	CFM	FL	CFM	FL	CFM	FL	
2000	2140	36	2790	31	3540	28	4378	25	5280	22	6360	20	7810	15
2200	2350	46	3070	38	3890	33	4810	30	5810	27	6920	24	8610	18
2400	2560	54	3350	46	4240	40	5230	35	6330	31	7550	28	9300	22
2600	2780	64	3630	54	4600	47	5680	41	6870	37	8180	33	10240	25
2800	2990	73	3910	63	4950	54	6110	47	7390	43	8820	38	11050	29
3000	3210	84	4180	71	5310	63	6550	54	7920	48	9430	44	11720	33
3200	3420	95	4470	82	5660	70	6980	62	8450	55	10030	49	12410	37
3400	3630	111	4750	92	6020	78	7430	69	8970	62	10700	56	13090	42
3600	3840	127	5020	103	6370	87	7860	77	9500	68	11320	63	13780	47
3800	4060	143	5290	114	6720	97	8300	86	10020	76	11950	68	14500	53
4000	4280	160	5560	124	7080	107	8740	95	10560	84	12580	76	15240	58
4200	4490	176	5830	134	7430	117	9170	104	11100	96	13210	84	15970	64
4400	4700	192	6100	145	7780	127	9620	112	11620	104	13840	96	16700	70
4600	4910	208	6370	156	8130	137	10060	120	12160	113	14470	104	17440	76
5200	5560	266	7260	202	9200	179	11260	166	13740	155	16360	133	20560	108
5600	5980	298	7820	225	9900	202	12220	183	14780	171	17690	145	22080	120
6000	6420	332	8360	247	10620	223	13100	203	15620	188	18860	157	23940	133
7000	7470	444	9770	327	12380	302	15300	278	18480	255	22900	213	34800	177

ALTITUDE & TEMPERATURE CORRECTION FACTORS

Air Temp. (F.)	ALTITUDE (Feet)										
	0	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000
0	.87	.89	.91	.92	.94	.96	.98	.99	1.01	1.03	1.05
40	.94	.96	.98	1.00	1.02	1.04	1.06	1.08	1.10	1.12	1.14
70	1.00	1.02	1.04	1.06	1.08	1.10	1.12	1.14	1.16	1.18	1.20
80	1.02	1.04	1.06	1.08	1.10	1.12	1.14	1.16	1.19	1.21	1.23
100	1.06	1.08	1.10	1.12	1.14	1.16	1.19	1.21	1.23	1.25	1.28
120	1.09	1.12	1.14	1.16	1.18	1.20	1.23	1.25	1.28	1.30	1.32
140	1.13	1.15	1.18	1.20	1.22	1.25	1.27	1.29	1.32	1.34	1.37
160	1.17	1.19	1.22	1.24	1.26	1.29	1.31	1.34	1.36	1.39	1.42
180	1.21	1.23	1.26	1.28	1.30	1.33	1.36	1.38	1.41	1.43	1.46
200	1.25	1.27	1.29	1.32	1.34	1.37	1.40	1.42	1.45	1.48	1.51
250	1.34	1.36	1.39	1.42	1.45	1.47	1.50	1.53	1.56	1.59	1.62
300	1.43	1.46	1.49	1.52	1.55	1.58	1.61	1.64	1.67	1.70	1.74
350	1.53	1.56	1.59	1.62	1.65	1.68	1.72	1.75	1.78	1.81	1.85
400	1.62	1.65	1.69	1.72	1.75	1.79	1.82	1.85	1.89	1.93	1.96
450	1.72	1.75	1.79	1.82	1.86	1.89	1.93	1.96	2.00	2.04	2.08
500	1.81	1.85	1.88	1.92	1.95	1.99	2.03	2.07	2.11	2.15	2.19
550	1.91	1.94	1.98	2.02	2.06	2.10	2.14	2.18	2.22	2.26	2.30
600	2.00	2.04	2.08	2.12	2.16	2.20	2.24	2.29	2.33	2.38	2.42
650	2.10	2.14	2.18	2.22	2.26	2.31	2.35	2.40	2.44	2.49	2.54
700	2.19	2.23	2.27	2.32	2.36	2.41	2.46	2.50	2.55	2.60	2.65
750	2.28	2.33	2.37	2.42	2.47	2.51	2.56	2.61	2.66	2.71	2.76
800	2.38	2.43	2.48	2.52	2.57	2.62	2.66	2.72	2.76	2.81	2.86

Fans are rated at standard air: .075 lbs./cubic ft., 70°F at sea level; therefore, pressures corrected to standard must be used when selecting Fans from Fan rating tables or curves. Pressure at operating conditions x factor = pressure at standard. Horsepower at standard x factor = horsepower at operating conditions. Caution: size motor for highest density (lowest factor) condition at which it is expected to operate.

VELOCITY PRESSURES

(At Std. Density 0.075 / ft³)

VEL. FPM	VP In. Water	VEL. FPM	VP In. Water	VEL. FPM	VP In. Water
500	.016	1800	.202	4400	1.21
600	.022	2000	.249	4600	1.32
700	.031	2200	.302	4800	1.44
800	.040	2400	.359	5000	1.56
900	.050	2600	.421	5200	1.69
1000	.062	2800	.489	5400	1.82
1100	.075	3000	.561	5600	1.96
1200	.090	3200	.638	5800	2.10
1300	.105	3400	.721	6000	2.24
1400	.122	3600	.808	6200	2.40
1500	.140	3800	.900	6400	2.55
1600	.160	4000	.998	6600	2.72
1700	.180	4200	1.10	6800	2.88

FORMULA: $VP = \left(\frac{\text{Velocity}}{4005}\right)^2$

METRIC AND ENGLISH CONVERSIONS

UNITS MOST USED IN FAN APPLICATION

QUANTITY	STANDARD ENGLISH UNITS	STANDARD METRIC (SI) UNITS	OTHER UNITS				
			Psi	In. Hg	mm WG	mm Hg	Atm
PRESSURE	In. WG	Pascals					
	1	248.36	.03602	.07334	25.400	1.8628	.00245
	00403	1	.00015	.00030	.10227	.00750	.00001
	27.761	6894.7	1	2.0360	705.13	51.715	.06805
	13.635	3386.4	.49116	1	346.33	25.400	.03342
	.03937	9.7779	.00142	.00289	1	.07334	.00010
	.53681	133.32	.01934	.03937	13.635	1	.00132
	407.98	101325	14.696	29.921	10363	760.00	1
VOLUME FLOW	CFM	m ³ /s	m ³ /min	m ³ /hr	ℓ/s	ℓ/min	
	1	.000472	.02832	1.6990	.47195	28.317	
	2118.9	1	60.000	3600.0	1000.0	60000	
	35.314	.01667	1	60.000	16.667	1000	
	.58858	.00028	.01667	1	.27778	16.667	
	2.1189	.00100	.06000	3.6000	1	60.000	
	.03531	.00002	.00100	.06000	.01667	1	
	VELOCITY	Ft/Min	m/s	m/min	m/hr	mph	Knots
1		.00508	.30480	18.288	.01136	.00987	
196.85		1	60.000	3600.0	2.2369	1.9425	
3.2808		.01667	1	60.000	.03728	.03238	
.05468		.00028	.01667	1	.00062	.00054	
88.000		.44704	26.822	1609.4	1	.86839	
101.34		.51479	30.887	1853.2	1.1516	1	
ROTATING SPEED		RPM	rps				
	1	.01667					
DENSITY	LB/Ft ³	Kg/m ³					
	1	16.018					
POWER	HP	Watts					
	1	745.7					

Column 1 lists the English units now in common usage in the air moving industry. Column 2 lists the metric units which have been adopted as the metric standards by the Air Moving and Conditioning Association (AMCA). These units were established as the international standard units (SI) by the International Standards Organization and have been approved as standard by at least thirty countries.

MISCELLANEOUS CONVERSION FACTORS

LENGTH		AREA	
1 in = 2.54 cm	1 in ² = 6.4516 cm ²	1 Ft = 3048 m	1 Ft ² = .0929 m ²
1 yd = 9144 m	1 yd ² = .8361 m ²	1 mi = 1.6093 Km	1 mi ² = 2.5899 Km ²
1 naut mi = 1.1516 mi			
VOLUME		WORK/ENERGY	
1 in ³ = 16.3871 cm ³	1 Ft-lb = 1.3558 J	1 Ft ³ = .0283 m ³	1 W-sec = 1 J
1 ft ³ = 7.48 gal	1 Kw-hr = 3.6 x 10 ⁶ J	1 Ft ³ = 28.316 ℓ	1 erg = 10 ⁻⁷ J
1 yd ³ = 7646 m ³	1 erg = 1 dy-cm		1 kw = 10 ¹⁰ ergs/sec
FORCE		PRESSURE	
1 N = 100,000 dy	1 Pa = 1 N/m ²	1 lb = 444,822 dy	1 Pa = 10 dy/cm ²
1 N = 22480 lb	1 Pa = .000145 psi	1 N = 1 Kg-m/sec ²	1 psi = 6894.7 Pa
1 dy = 1 g-cm/sec ²	1 psi = .0703 kg/cm ²		1 lb/Ft ² = 4.884 Kg/m ²
POWER		HEAT	
1 hp = 745.7 W	1 Btu = 777.97 Ft-lb	1 hp = 550 ft-lb/sec	1 hp = 2545 Btu/hr
1 hp = 33000 ft-lb/min	1 hp = 1.014 metric hp	1 hp = 76.04 kg-m/sec	1 hp = .0761 boiler hp
1 hp = 75.00 Kg-m/sec	1 kw = 3414 Btu/hr		1 Ton = 12000 Btu/hr
MASS		METRIC PREFIXES	
1 g = 15.432 gr	deci = x .1	1 oz = 28.349 g	centi = x .01
1 lb = 453.59 g	milli = x .001		micro = x .00001
	deca = x 10		hecto = x 100
	kilo = x 1,000		mega = x 1,000,000

Water @ 68°F, 20°C. Hg @ 32°F, 0°C. Figures reflect gas column effect on water column pressure measurements.

TEMPERATURE

°F = 9/5C + 32

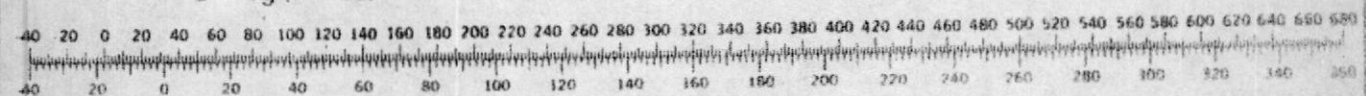
ABSOLUTE RANKIN (R)

R = F + 460

°C = 5/9 (F - 32)

ABSOLUTE KELVIN (K)

K = C + 273



SYMBOL	DEFINITION	SYMBOL	DEFINITION	SYMBOL	DEFINITION
Atm	atmospheres	hp	metric horsepower	mph	miles per hour
Btu	British thermal units	hr	hours	N	Newtons
C	Celsius (centigrade)	in	inches	naut mi	nautical miles
CFM	cubic feet per minute	J	Joules	oz	ounces
cm	centimeters	kg	kilograms	Pa	Pascals
dy	dynes	km	kilometers	psi	pounds per square inch
erg	ergs	knots	nautical miles per hour	rpm	revolutions per minute
F	Fahrenheit	kw	kilowatts	rps	revolutions per second
ft	feet	ℓ	liters	sec	seconds
g	grams	lb	pounds	Ton	Tons refrigeration
gal	gallons	m	meters	W	Watts
gr	grains	mm	millimeters	WG	water gauge
Hg	mercury	min	minutes		
hp	horsepower	mi	miles		

VELOCITIES REQUIRED FOR CONVEYING MATERIALS

Material	Approx. weight per cu. ft. in bulk	Average velocity to convey (ft. per min.)	Feet per inch of suction to pick up
Asphalt, coal	20	5500	3
Brick	28	6000	4
Clay	100	7000	5
Cement	14	5000	1 1/2
Coal	25	6000	2 1/2
Comp. ash	36	6000	4 1/2
Comp. metal	45	6500	3 1/2
Cotton, dry	5	3500	2
Cotton, wet	30	4500	2
Crushed coal	12	3500	2
Feather, soft	20	3000	3
Feather, dry	36	4000	2 1/2
Gravel, dry	12	3500	2 1/2
Gravel, wet	9	3500	2 1/2
Gravel, heavy	24	4000	3
Gravel, light	24	3500	2 1/2
Ice	46	6000	4
Wood, dry	5	3500	2

PRESSURE EQUIVALENTS

Water	Mercury	Cunzas	Pounds	Millimeters
1	0.733	5.763	0.360	25.4
2	1.467	1.153	0.720	50.8
3	2.200	1.729	1.081	76.2
4	2.934	2.305	1.441	101.6
5	3.667	2.882	1.801	127.0
6	4.400	3.458	2.161	152.4
7	5.134	4.034	2.522	177.8
8	5.867	4.611	2.882	203.2
9	6.601	5.187	3.242	228.6
10	7.334	5.763	3.602	254.0
11	8.067	6.340	3.962	279.4
12	8.801	6.916	4.322	304.8
13	9.534	7.493	4.682	330.2
14	1.027	8.069	5.043	355.6
15	1.100	8.645	5.403	381.0
16	1.173	9.222	5.763	406.4
17	1.247	9.798	6.124	431.8
18	1.320	10.374	6.484	457.2
19	1.393	10.951	6.844	482.6
20	1.467	11.527	7.204	508.0
21	1.540	12.103	7.565	533.4
22	1.613	12.679	7.925	558.8
23	1.687	13.256	8.285	584.2
24	1.760	13.832	8.645	609.6
25	1.834	14.409	9.005	635.0
26	1.907	14.985	9.365	660.4
27	1.980	15.561	9.725	685.8
28	2.054	16.138	10.085	711.2
29	2.127	16.714	10.445	736.6
30	2.200	17.290	10.805	762.0
31	2.274	17.867	11.165	787.4
32	2.347	18.443	11.525	812.8
33	2.420	19.019	11.885	838.2
34	2.494	19.596	12.245	863.6
35	2.567	20.172	12.605	889.0
36	2.640	20.748	12.965	914.4
37	2.714	21.325	13.325	939.8
38	2.787	21.901	13.685	965.2
39	2.860	22.478	14.045	990.6
40	2.934	23.054	14.405	1016.0
41	3.007	23.630	14.765	1041.4
42	3.080	24.207	15.125	1066.8
43	3.154	24.783	15.485	1092.2
44	3.227	25.359	15.845	1117.6
45	3.300	25.936	16.205	1143.0

AREAS AND CIRCUMFERENCES OF CIRCLES

Diam.	Area		Circumference	
	Sq. In.	Sq. Ft.	In.	Ft.
1	.7854	.0545	3.1416	.2618
2	3.1416	.2171	6.2832	.5236
3	7.0686	.4909	9.4248	.7854
4	12.5664	.8696	12.5664	1.0472
5	19.6350	1.3643	15.7080	1.3100
6	28.2744	1.9791	18.8496	1.5728
7	38.4846	2.7080	21.9912	1.8356
8	50.2656	3.5424	25.1328	2.0984
9	63.6174	4.4823	28.2744	2.3612
10	78.5399	5.5359	31.4160	2.6240
11	95.0331	6.7033	34.5576	2.8868
12	113.0976	8.0745	37.7000	3.1496
13	132.7353	9.6496	40.8424	3.4124
14	153.9366	11.4287	43.9848	3.6752
15	176.7144	13.4119	47.1272	3.9380
16	201.0816	15.6092	50.2696	4.2008
17	227.0404	18.0317	53.4120	4.4636
18	254.6034	20.6804	56.5544	4.7264
19	283.7836	23.5563	59.6968	4.9892
20	314.5930	26.6604	62.8392	5.2520
21	347.0448	29.9937	65.9816	5.5148
22	381.1512	33.5572	69.1240	5.7776
23	416.9250	37.3519	72.2664	6.0404
24	454.3684	41.3788	75.4088	6.3032
25	493.4846	45.6389	78.5512	6.5660
26	534.2760	50.1332	81.6936	6.8288
27	576.7458	54.8637	84.8360	7.0916
28	620.8972	59.8314	87.9784	7.3544
29	666.7344	65.0373	91.1208	7.6172
30	714.2604	70.4824	94.2632	7.8800
31	763.4790	76.1677	97.4056	8.1428
32	814.3044	82.0942	100.5480	8.4056
33	866.7404	88.2629	103.6904	8.6684
34	920.7900	94.6758	106.8328	8.9312
35	976.4564	101.3339	109.9752	9.1940
36	1033.7426	108.2382	113.1176	9.4568
37	1092.6526	115.3907	116.2600	9.7196
38	1153.1896	122.7934	119.4024	9.9824
39	1215.3566	130.4483	122.5448	10.2452
40	1279.1566	138.3574	125.6872	10.5080
41	1344.5926	146.5227	128.8296	10.7708
42	1411.6686	154.9462	131.9720	11.0336
43	1480.3886	163.6299	135.1144	11.2964
44	1550.7556	172.5758	138.2568	11.5592
45	1622.7726	181.7859	141.3992	11.8220
46	1696.4426	191.2622	144.5416	12.0848
47	1771.7686	201.0067	147.6840	12.3476
48	1848.7536	211.0214	150.8264	12.6104
49	1927.3906	221.3083	153.9688	12.8732
50	2007.6826	231.8694	157.1112	13.1360

STEEL GAUGES AND WEIGHTS

GAUGE	THICKNESS		WEIGHT	
	Inches	mm	lb/Ft ²	Kg/m ²
000	3/8	9.5250	15.300	74.754
00	11/32	8.7313	14.025	68.525
0	5/16	7.9375	12.750	62.295
1	9/32	7.1450	11.475	56.066
2	1/4	6.3500	10.200	49.836
3	.2391	6.0731	10.000	48.859
4	.2242	5.6947	9.375	45.805
5	.2092	5.3137	8.750	42.752
6	.1943	4.9352	8.125	39.698
7	.1793	4.5542	7.500	36.644
8	.1644	4.1758	6.875	33.591
9	.1496	3.7973	6.250	30.537
10	.1345	3.4163	5.625	27.483
11	.1196	3.0378	5.000	24.429
12	.1046	2.6568	4.375	21.376
13	.0897	2.2784	3.750	18.322
14	.0747	1.8974	3.125	15.268
15	.0673	1.7094	2.813	13.744
16	.0598	1.5189	2.500	12.215
17	.0538	1.3665	2.250	10.993
18	.0478	1.2141	2.000	9.772
19	.0418	1.0617	1.750	8.550
20	.0359	0.9119	1.500	7.329
21	.0329	8367	1.375	6.718
22	.0299	7595	1.250	6.107
23	.0269	6833	1.125	5.497
24	.0239	6071	1.000	4.886
25	.0209	5309	0.875	4.275
26	.0179	4547	.750	3.664
27	.0164	4166	.688	3.361

ABOVE ARE MANUFACTURERS' STANDARD GAUGES.
WEIGHTS ARE BASED ON DENSITY OF 501.84 lb/Ft³

FAN APPLICATION FORMULAS

$$d = 1.322 \times \frac{PB}{\sqrt{t + 460}}$$

$$TP = SP + VP$$

$$VP = \left(\frac{CFM}{A \times 4005} \right)^2 \left(\frac{V}{4005} \right)^2$$

$$FAN \ BHP = \frac{CFM \times TP}{6356 \times \eta_{F1}} = \frac{CFM \times SP}{6356 \times \eta_{F2}}$$

$$\text{For 3 phase motors: BHP input} = \frac{E \times I \times ME \times PI \times 1.73}{746}$$

$$\text{For 3 phase motors: KW input} = \frac{E \times I \times PI \times 1.73}{1000}$$

$$\text{For 1 phase motors: BHP output} = \frac{E \times I \times ME \times PI}{746}$$

$$\text{For 1 phase motors: KW input} = \frac{E \times I \times PI}{1000}$$

To plot a System Curve where SP_1 and CFM_1 are known, use the following formula to find other curve points:

$$SP_2 = SP_1 \left(\frac{CFM_2}{CFM_1} \right)^2$$

To determine round duct equivalent of rectangular duct for same friction loss and volumetric capacity:

$$DR = 1.285 \sqrt[5]{\frac{(ab)^3}{a+b}}$$

SYMBOL DEFINITION

A	area (Ft ²)
a	side a of rectangular duct
b	side b of rectangular duct
BHP	brake horsepower
CFM	air volume flow (Ft ³ /min.)
d	air density (lb/Ft ³)
DR	Diameter of round duct
E	volts
EH	fan efficiency (decimal)
°F	temperature (degrees Fahrenheit)
I	amps
Kw	kilowatts
ME	motor efficiency (decimal)
PB	barometric pressure (inches mercury)
PF	power factor
SP	static pressure (inches WG)
TP	total pressure (inches WG)
VP	velocity pressure (inches WG)
V	velocity (Ft/min)

— Mixtures of Air and Saturated Water Vapor* (Fuente: The Trane Company. Manual.)
 (Based on 29.92 in. Barometric Pressure)

TEMP. F	PRESSURE OF SATURATED VAPOR		WEIGHT OF SATURATED VAPOR PER POUND OF DRY AIR		VOLUME IN CU. FT.		ENTHALPY HEAT CONTENT IN BTU OF 1 LB. OF DRY AIR ABOVE 0 F	ENTHALPY HEAT OF VAPOR, BTU	SPECIFIC HEAT CONTENT IN BTU OF 1 LB. OF DRY AIR WITH VAPOR TO SATURATE IT
	IN. OF HG. ABSOLUTE	P.S.I.A.	POUNDS	GRAINS	OF 1 LB. OF DRY AIR	OF 1 LB. OF DRY AIR + VAPOR TO SATURATE IT			
0	.0376	.0185	.000787	5.51	11.58	11.59	0.0	0.835	0.835
2	.0418	.0205	.000874	6.12	11.63	11.65	0.480	0.928	1.408
4	.0463	.0227	.000969	6.76	11.69	11.70	0.961	1.030	1.991
6	.0513	.0252	.001074	7.52	11.75	11.75	1.441	1.142	2.593
8	.0568	.0275	.001189	8.32	11.78	11.80	1.922	1.256	3.188
10	.0629	.0309	.001315	9.21	11.83	11.86	2.402	1.401	3.803
12	.0695	.0341	.001454	10.18	11.89	11.91	2.882	1.550	4.432
14	.0767	.0377	.001606	11.24	11.94	11.97	3.363	1.713	5.076
16	.0846	.0416	.001772	12.40	11.99	12.02	3.843	1.892	5.735
18	.0933	.0458	.001953	13.67	12.04	12.08	4.324	2.088	6.412
20	.1027	.0504	.002152	15.06	12.09	12.13	4.804	2.302	7.106
22	.1131	.0555	.002369	16.56	12.14	12.19	5.284	2.536	7.826
24	.1243	.0610	.002606	18.24	12.19	12.24	5.765	2.792	8.557
26	.1366	.0671	.002865	20.06	12.24	12.30	6.248	3.072	9.317
28	.1497	.0738	.003147	22.03	12.29	12.35	6.724	3.377	10.103
30	.1645	.0808	.003454	24.18	12.34	12.41	7.206	3.709	10.915
32	.1804	.0886	.003788	26.52	12.39	12.47	7.686	4.072	11.750
34	.1978	.0972	.004144	29.06	12.44	12.49	8.167	4.448	12.609
36	.2167	.1066	.004524	31.81	12.49	12.55	8.647	4.841	13.490
38	.2372	.1168	.004928	34.78	12.54	12.61	9.128	5.251	14.393
40	.2594	.1278	.005358	37.98	12.59	12.67	9.609	5.678	15.318
42	.2833	.1396	.005814	41.42	12.64	12.73	10.092	6.123	16.265
44	.3089	.1522	.006296	45.11	12.69	12.79	10.578	6.585	17.234
46	.3362	.1656	.006804	49.06	12.74	12.85	11.066	7.064	18.225
48	.3653	.1800	.007338	53.28	12.79	12.91	11.556	7.561	19.238
50	.3962	.1954	.007898	57.78	12.84	12.97	12.048	8.076	20.273
52	.4289	.2118	.008484	62.56	12.89	13.03	12.542	8.609	21.330
54	.4634	.2292	.009096	67.64	12.94	13.09	13.038	9.160	22.409
56	.5000	.2476	.009734	73.04	12.99	13.15	13.536	9.729	23.510
58	.5387	.2670	.010400	78.76	13.04	13.21	14.036	10.316	24.633
60	.5796	.2874	.011092	84.82	13.09	13.27	14.538	10.921	25.778
62	.6228	.3088	.011812	91.24	13.14	13.33	15.042	11.544	26.945
64	.6684	.3312	.012560	98.04	13.19	13.39	15.548	12.185	28.134
66	.7164	.3546	.013336	105.24	13.24	13.45	16.056	12.844	29.345
68	.7668	.3790	.014140	112.86	13.29	13.51	16.566	13.521	30.578
70	.8196	.4044	.014972	120.92	13.34	13.57	17.078	14.216	31.833
72	.8748	.4308	.015832	129.44	13.39	13.63	17.592	14.929	33.110
74	.9324	.4582	.016720	138.44	13.44	13.69	18.108	15.660	34.409

* ALL DATA EXCEPT THIRD AND FIFTH VERTICAL COLUMNS ARE FROM CHAPTER 3, HEATING VENTILATING AIR-CONDITIONING GUIDE, 1950 USED BY PERMISSION.

(Continued)

TEMP. F	PRESSURE OF SATURATED VAPOR		WEIGHT OF SATURATED VAPOR PER POUND OF DRY AIR		VOLUME IN CU. FT.		ENTHALPY HEAT CONTENT IN BTU OF 1 LB. OF DRY AIR ABOVE 0 F	ENTHALPY HEAT IN VAPOR, BTU	ENTHALPY HEAT CONTENT IN BTU OF 1 LB. OF MOIST AIR WITH WATER TO SATURATE IT
	IN. HG. ABSOLUTE	P.S.I.A.	POUNDS	GRAINS	OF 1 LB. OF DRY AIR	OF 1 LB. OF DRY AIR + VAPOR TO SATURATE IT			
75	.8750	.4298	.01882	131.7	13.48	13.88	18.018	20.59	38.61
76	.9047	.4443	.01948	136.4	13.50	13.92	18.258	21.31	39.57
77	.9352	.4593	.02016	141.1	13.53	13.96	18.499	22.07	40.57
78	.9667	.4748	.02086	146.0	13.55	14.00	18.740	22.84	41.56
79	.9990	.4907	.02158	151.1	13.58	14.05	18.980	23.64	42.62
80	1.0323	.5070	.02233	156.3	13.60	14.09	19.221	24.47	43.69
81	1.0665	.5238	.02310	161.7	13.63	14.13	19.461	25.32	44.78
82	1.1017	.5411	.02389	167.2	13.65	14.17	19.702	26.20	45.90
83	1.1379	.5589	.02471	173.0	13.68	14.22	19.944	27.10	47.04
84	1.1752	.5772	.02555	178.9	13.70	14.26	20.183	28.04	48.22
85	1.214	.5960	.02642	184.9	13.73	14.31	20.423	29.01	49.43
86	1.253	.6154	.02731	191.2	13.75	14.35	20.663	30.00	50.66
87	1.293	.6353	.02824	197.7	13.78	14.40	20.904	31.03	51.93
88	1.338	.6557	.02919	204.3	13.80	14.45	21.144	32.09	53.23
89	1.378	.6766	.03017	211.2	13.83	14.50	21.385	33.16	54.56
90	1.422	.6984	.03118	218.3	13.86	14.55	21.625	34.31	55.93
91	1.467	.7206	.03223	225.8	13.88	14.60	21.865	35.47	57.33
92	1.514	.7434	.03330	233.1	13.91	14.65	22.106	36.67	58.76
93	1.561	.7668	.03441	240.9	13.93	14.70	22.346	37.90	60.25
94	1.610	.7908	.03556	248.9	13.96	14.75	22.587	39.18	61.77
95	1.661	.8156	.03673	257.1	13.98	14.80	22.827	40.49	63.32
96	1.712	.8410	.03795	265.7	14.01	14.86	23.068	41.85	64.92
97	1.765	.8671	.03920	274.4	14.03	14.91	23.308	43.24	66.55
98	1.820	.8938	.04049	283.4	14.06	14.97	23.548	44.68	68.23
99	1.876	.9213	.04182	292.7	14.08	15.02	23.789	46.17	69.96
100	1.933	.9495	.04319	302.3	14.11	15.08	24.029	47.70	71.73
101	1.992	.9785	.04460	312.2	14.14	15.14	24.270	49.28	73.55
102	2.053	1.0082	.04606	322.4	14.16	15.20	24.510	50.91	75.42
103	2.115	1.0387	.04756	332.9	14.19	15.26	24.751	52.59	77.34
104	2.179	1.0700	.04911	343.8	14.21	15.33	24.991	54.32	79.31
105	2.244	1.1021	.0507	355.	14.24	15.39	25.232	56.11	81.34
106	2.311	1.135	.0523	366.	14.26	15.46	25.472	57.95	83.42
107	2.380	1.168	.0540	378.	14.29	15.52	25.713	59.85	85.56
108	2.450	1.203	.0558	391.	14.31	15.59	25.953	61.80	87.76
109	2.521	1.239	.0576	403.	14.34	15.66	26.194	63.82	89.99
110	2.600	1.277	.0594	416.	14.36	15.73	26.434	65.91	92.34
111	2.679	1.313	.0614	430.	14.39	15.80	26.675	68.08	94.72
112	2.751	1.351	.0633	443.	14.41	15.87	26.915	70.32	97.14
113	2.830	1.390	.0654	458.	14.44	15.95	27.156	72.63	99.61
114	2.912	1.430	.0675	473.	14.46	16.02	27.397	74.99	102.13
115	2.996	1.471	.0696	487.	14.49	16.10	27.637	77.44	104.70
116	3.082	1.514	.0719	503.	14.52	16.18	27.878	79.95	107.33
117	3.170	1.577	.0742	519.	14.54	16.26	28.119	82.45	110.00
118	3.260	1.601	.0765	536.	14.57	16.35	28.359	85.10	112.80
119	3.353	1.647	.0790	553.	14.59	16.43	28.599	87.80	115.66
120	3.447	1.693	.0815	570.	14.62	16.52	28.841	90.58	118.54
125	3.950	1.943	.0954	668.	14.75	16.99	30.044	105.8	136.64
130	4.527	2.223	.1116	781.	14.88	17.53	31.246	124.7	155.9
135	5.166	2.538	.1308	916.	15.00	18.13	32.452	146.4	176.0
140	5.884	2.890	.1534	1074.	15.13	18.84	33.655	172.0	205.7
145	6.683	3.282	.1803	1262.	15.26	19.64	34.859	202.5	244.4
150	7.572	3.719	.2125	1485.	15.39	20.60	36.063	239.2	292.1
155	8.550	4.204	.2514	1760.	15.52	21.73	37.267	283.5	349.8
160	9.626	4.743	.2990	2099.	15.64	23.09	38.472	337.0	416.3
165	10.800	5.337	.3581	2507.	15.77	24.75	39.677	400.5	492.0
170	12.20	5.992	.4327	3026.9	15.90	26.64	40.882	475.8	578.5
175	13.80	6.72	.5292	3704.4	16.03	28.81	42.087	564.1	676.1
180	15.29	7.51	.6578	4604.6	16.16	31.04	43.292	666.0	791.8
185	17.07	8.38	.8363	5854.1	16.28	33.59	44.498	783.2	927.7
190	19.02	9.34	1.099	7693.	16.41	36.40	45.704	918.0	1081.0
200	23.47	11.53	2.295	16005.	16.67	77.24	48.118	2529.0	2577.0

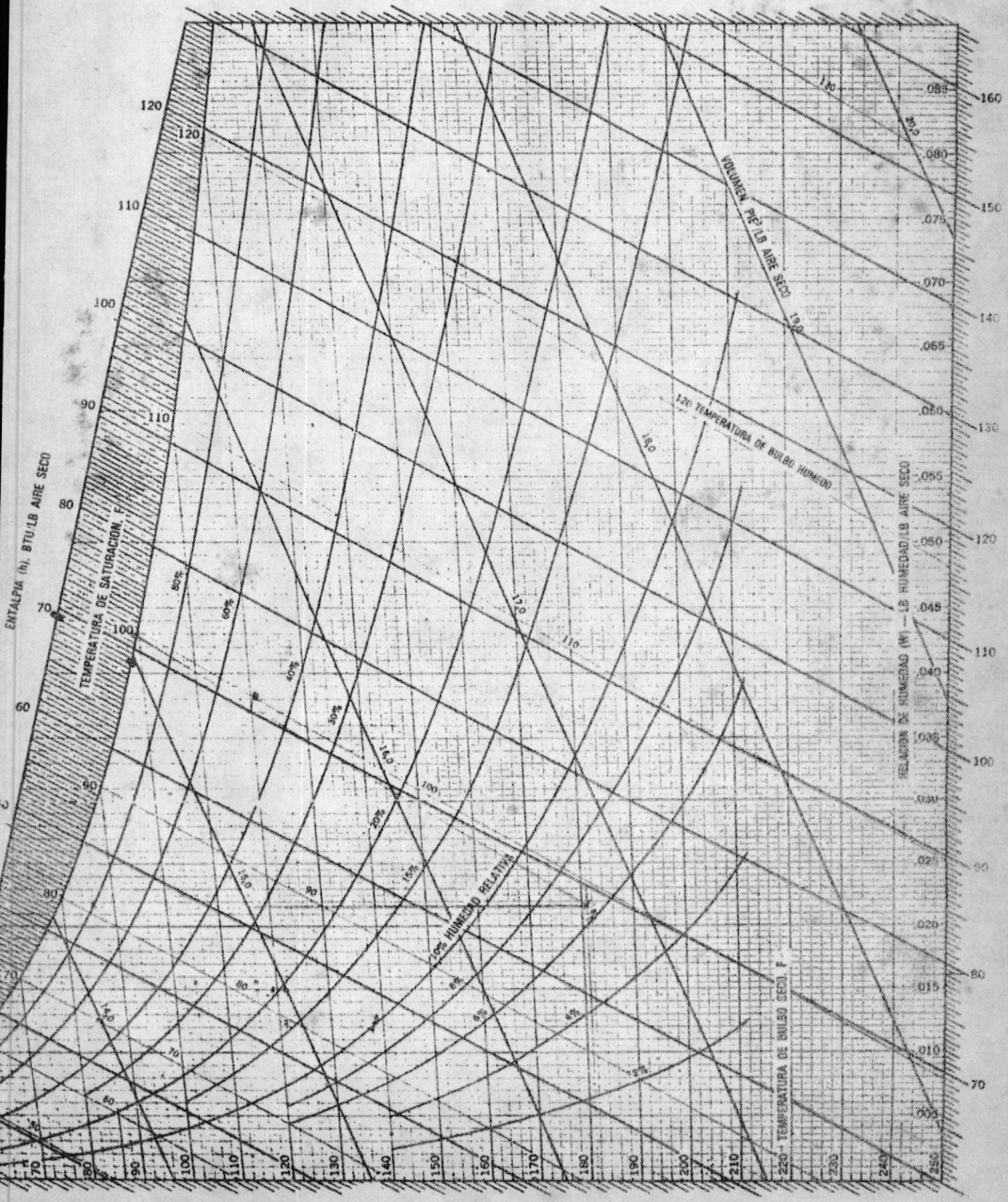
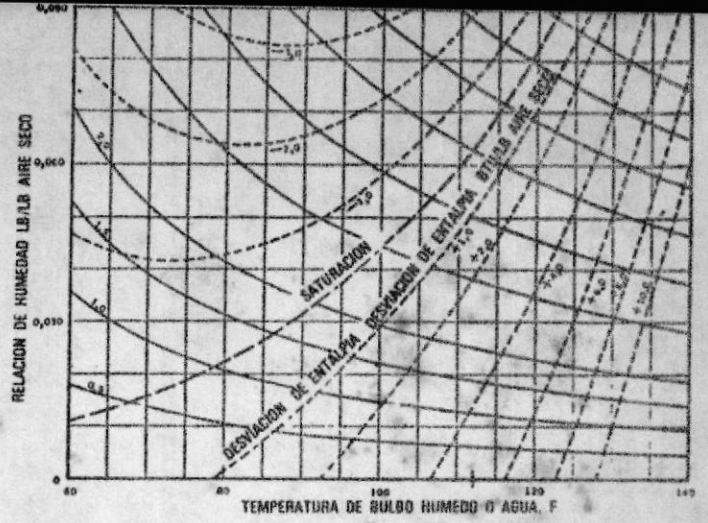
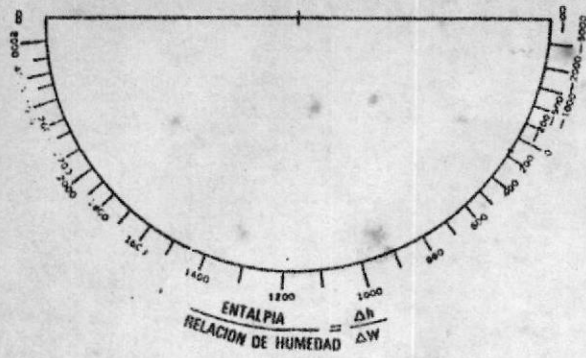
* ALL DATA EXCEPT THIRD AND FIFTH VERTICAL COLUMNS ARE FROM CHAPTER 3, HEATING VENTILATING AIR-CONDITIONING GUIDE, 1959. USED BY PERMISSION.

TEMPERATURA ALTA

PRESION BAROMETRICA, 760 MM Hg

COPYRIGHT 1963

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS, INC.





BIBLIOGRAFIA

- 1) Programa Nacional del arroz y maíz y Control de Piladoras.
- 2) Ramírez Genel, "Almacenamiento y Conservación de granos y semillas", Cía. Edit, Continental, México 1976.
- 3) Sherwood, T.K., "Ind. Eng. Chem.", vol 21, No. 12, 1929
- 4) Factores fisiológicos en secado y almacenamiento de granos. Capítulo 10 ASHRAE HANBOOK. 1974
- 5) Secado y Almacenamiento de granos. Capítulo 18 ASHRAE HANBOOK 1969.
- 6) Ingeniería del ámbito térmico. James L. Threlkeld



BIBLIOTECA